

Comparação dos níveis de THD entre turbinas DFIG e PMSG na integração de usinas eólicas em situações de falta

Phillipe L. S. Santana* Huilman S. Sanca*
Francisco das C. Souza Jr** Luiza R. Gumes*

* Engenharia Elétrica, CETEC, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, (e-mail: phillipe.luis@aluno.ufrb.edu.br/huilman.sanca@ufrb.edu.br/luizagumes@aluno.ufrb.edu.br).

** Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Caicó, RN, (e-mail: francisco.souza@ifrn.edu.br)

Abstract: In this paper, a comparative analysis of Total Harmonic Distortion (THD) between wind farms with double-fed induction generators (DFIG) and synchronous permanent magnet generators (PMSG) integrated into the grid is developed. The Fast Fourier Transform (FFT) technique to evaluate the output current signal THD in different fault conditions and indicate the best performance among the generators is used. Harmonic generation problems are associated with wind generation, due to the non-linear characteristics of its converters and non-linear loads connected to the grid side. The integration of two 10 MW wind farms with five 2 MW wind turbines is analyzed, using DFIG and PMSG turbines, operating in different fault occurrence scenarios, connected to 25 kV and 120 kV at 60 Hz systems. The results show that the PMSG presents better performance, with low THD, compared to the DFIG, for the analyzed cases.

Resumo: Neste trabalho, realiza-se uma análise comparativa da Distorção Harmônica Total (THD) entre parques eólicos com geradores de indução duplamente alimentados (DFIG) e geradores síncronos de ímãs permanentes (PMSG) integrados à rede. Utiliza-se a técnica da transformada rápida de Fourier (FFT) para avaliar a THD do sinal da corrente de saída em diferentes condições de faltas e indicar o melhor desempenho entre os geradores. Problemas de geração de harmônicos estão associados a geração eólica, devido as características não lineares de seus conversores e de cargas não lineares conectadas ao lado da rede. Analisa-se a integração de dois parques eólicos de 10 MW com cinco turbinas eólicas de 2 MW, utilizando-se turbinas DFIG e turbinas PMSG, operando em diferentes cenários de ocorrências de faltas, ligadas a sistemas de 25 kV e 120 kV a 60 Hz. Os resultados mostram que o PMSG apresenta melhor desempenho, com baixo THD, em comparação ao DFIG, para os casos analisados.

Keywords: DFIG; PMSG; FFT; Total Harmonic Distortion; Wind Farm; Electrical Faults

Palavras-chaves: DFIG; PMSG; FFT; Distorção Harmônica Total, Parque Eólico; Faltas Elétricas.

1. INTRODUÇÃO

A diversificação das fontes de geração de energia contribui para a confiabilidade e operacionalização do Sistema Interligado Nacional (SIN), com isso, a geração de energia elétrica por meio de complexos eólicos, apresenta diversos atrativos nos quais destacam-se o baixo impacto ambiental, o aumento de investimentos no país, entre outros. Com a notória representatividade que a geração eólica assume na matriz elétrica brasileira, faz-se necessário o entendimento do comportamento do Sistema Elétrico de Potência (SEP), com a injeção de uma considerável quantidade de energia elétrica vinda de parques eólicos, atentando-se para os mínimos requisitos de operação e segurança da interconexão de sistemas eólicos, diminuindo os riscos

associados a unidades de geração, linhas de transmissão e centros de cargas (Neves, 2014).

Turbinas eólicas de velocidade variável vêm sendo usadas em uma grande escala na geração de energia eólica atual. Desai et al. (2016) apresenta uma análise da Distorção Harmônica Total (THD) usando DFIG e gerador de indução gaiola de esquilo (SCIG - *Squirrel Cage Induction Generator*) e a implementação de alguns filtros como formas de mitigá-las, verificando-se que as turbinas do tipo SCIG apresentaram um menor índice de THD dentro das condições propostas.

O problema de geração de harmônicos em geradores DFIG também é analisado em Kumar et al. (2014), mediante FFT, em um dos seus estudos de caso, apresenta os níveis de THD na conexão do parque eólico à uma linha da transmissão, apresentado-se um resultado comparativo entre os níveis de THD em diferentes barramentos. Em

* Os autores agradecem ao CETEC - UFRB e IFRN pelo suporte para a realização desta pesquisa.

Memon et al. (2018), aplica-se a FFT para analisar e observar os níveis de harmônico em diferentes condições de faltas. No entanto, neste caso é utilizado um gerador PMSG na conexão com a linha de transmissão, podendo-se analisar os níveis de THD em cada tipo de falha na rede.

A implementação dos aerogeradores baseou-se nos modelos disponíveis na biblioteca *SymPowerSystems* do programa *MATLAB/Simulink*, por meio da ferramenta *FFT Analyzer* da janela *PowerGui*, foram analisadas as distorções harmônicas totais, permitindo a execução da FFT e o acesso aos dados das simulações. Com o resultado, pretende-se comparar dois tipos de turbinas eólicas quando expostas à operação, com diferentes cenários de ocorrências de faltas elétricas, analisando-as pelos níveis de THD, utilizando a FFT para a análise dos harmônicos e destacando o parque com melhor desempenho.

2. TURBINAS DFIG E PMSG

Em projetos de parques eólicos, cada vez mais a utilização de turbinas de velocidade variável torna-se presente. Segundo Schwanz (2013), em turbinas com velocidade variável, é possível utilizar geradores síncronos e máquinas de indução, sendo estas desenvolvidas para operação em uma longa faixa de operação da velocidade do vento. Comercialmente, a tecnologia líder de mercado, com a relação a utilização em parques eólicos é a DFIG, com um crescente destaque a PMSG, sendo esta uma tecnologia bastante promissora.

Na configuração das turbinas DFIG, conforme mostra-se na Fig. 1, (Rocha, 2018), observa-se que o estator da máquina é conectado diretamente à rede elétrica e o rotor é alimentado pela tensão produzida pelo conversor de potência. Para essa configuração é necessário a utilização de caixa de engrenagens, devido a sua construção com um número reduzido de polos, pois o gerador opera em velocidade bem superior à velocidade do rotor da turbina, necessitando, assim, de uma alta rotação (Oliveira, 2018).

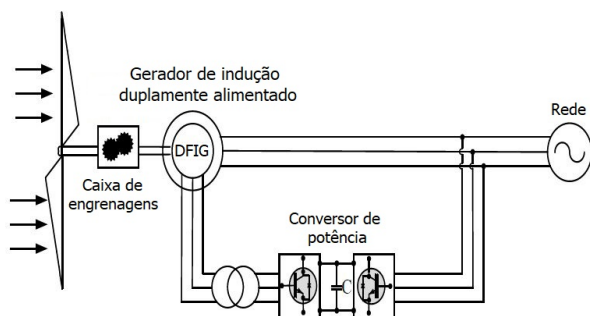


Fig. 1. Sistema de geração eólico do tipo DFIG.

Uma grande desvantagem do modelo DFIG, é a limitação de sua operação durante a ocorrência de faltas no sistema elétrico. Isso se explica porque as faltas podem causar um afundamento de tensão nos terminais do ponto de acoplamento comum (PAC) das turbinas eólicas. Esse afundamento levará a um aumento na corrente das bobinas do estator do DFIG, que fluirá pelo circuito do rotor e pelos conversores estáticos que estão no circuito (Cedraz, 2015).

O PMSG, que também apresenta a capacidade de operação em regime de velocidade variável, utiliza-se da topologia do tipo IV. Essa configuração é constituída de um gerador conectado à rede por meio de um conversor dimensionado para a potência nominal do aerogerador, conforme apresenta-se na Fig. 2 (Rocha, 2018).

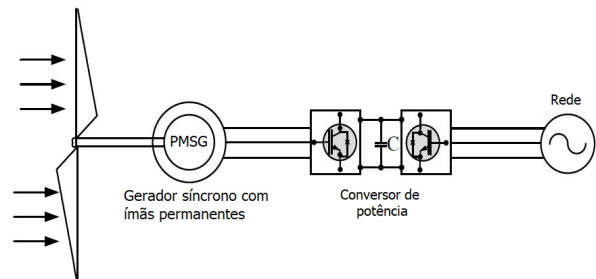


Fig. 2. Sistema de geração eólico do tipo PMSG.

De acordo com Lima et al. (2019), esse tipo de sistema dispensa o uso da caixa de engrenagens, devido o gerador se conectar diretamente à rede elétrica e ser construído com um número elevado de polos. Segundo Oliveira (2018), uma desvantagem dos aerogeradores PMSG é o custo de fabricação da máquina síncrona e também o fato de que a produção dos ímãs permanentes está concentrada em sua maioria na China, resultando em um custo inicial de instalação maior.

Ambos os sistemas utilizam conversores de potência do tipo back-to-back, constituídos por dois conversores. O primeiro conversor, sendo o conversor do rotor (*Rotor Side Converter*) para o caso do DFIG ou o conversor do gerador (*Generator Side Converter*) para o PMSG, são compostos por diodos e inversores trifásicos, que tem a função de controlar a potência ativa e reativa total que é injetada na rede pelo sistema, enquanto o segundo conversor, o conversor do lado da rede (*Grid Side Converter*), tem como papel controlar a tensão no barramento. Os dois conversores são interligados através de um elo CC e a tecnologia PWM (*Pulse Width Modulation*) é usada para controlar os conversores.

A potência dos conversores dos sistemas de geração DFIG corresponde a 30% da potência nominal da máquina, devido os conversores eletrônicos possuírem capacidade nominal significativamente menor do que a máquina de indução usada. Já para a configuração PMSG, o conversor assume uma nova característica, a FPC (*Full Power Converter*), já que toda a potência gerada deve ser comportada pelo conversor e a energia elétrica é gerada a uma frequência variável, proporcional à velocidade mecânica da turbina (Lima et al., 2019). De acordo com Corrêa (2015), embora tais componentes sejam mais caros e com maiores perdas elétricas que conversores parciais utilizados em um DFIG, um FPC proporciona um desacoplamento completo em relação à rede, garantindo uma menor sensibilidade do sistema a distúrbios externos ao parque eólico. De modo que a suportabilidade de geração em situação de falta ao sistema, é um importante tópico a ser analisado na comparação entre as tecnologias.

3. DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM PARQUES EÓLICOS

Segundo Schwanz (2013), as distorções harmônicas são um dos fatores de grande relevância a ser analisado dentre as medidas estabelecidas para a conexão de parques eólicos ao SIN, que tem como suas principais fontes geradoras de harmônicos na rede elétrica as cargas não lineares, transformadores e máquinas elétricas (síncronas e assíncronas).

De acordo com Magalhães (2010), as cargas não lineares são classificadas em três categorias em relação à natureza da distorção harmônica provocada. A categoria 1 inclui cargas com princípios de funcionamento baseado em descargas elétricas, como máquinas de solda. A categoria 2 inclui equipamentos com núcleo magnético, como transformadores e a categoria 3 inclui dispositivos baseados em conversores de potência, tais como retificadores e conversores de frequência, sendo estes que assumem o papel de serem os principais responsáveis, devido ao chaveamento das correntes nesses equipamentos, podendo originar componentes harmônicos de alta frequência.

De acordo com Lima et al. (2019), um dos fatores relacionados à produção das distorções harmônicas pelo processo de chaveamento PWM é dependente no número de pulsos da comutação. A maioria dos conversores tem número de pulsos igual a 6 ou 12 e os conversores geram harmônicos de tensão e corrente em ambos os lados AC e CC. Que podem ser expressos por:

$$h = a.m_f \pm 1, \quad (1)$$

sendo, h a ordem harmônica, m_f é o índice de modulação de frequências e a é um inteiro (1, 2, 3, 4 ...n).

O órgão responsável pela fiscalização dos indicadores da qualidade de energia quando se trata de sistemas de transmissão no Brasil é o Operador Nacional do Sistema (ONS), através do Procedimento de Rede, Submódulo 2.8, sendo responsáveis por determinar quais os indicadores serão adotados e quais os limites aceitáveis (ONS, 2016). Segundo Zolett (2020), a avaliação de indicadores é muito importante para definir o conteúdo e os impactos de harmônicos no sistema elétrico. Como indicadores, utiliza-se a Distorção Harmônica Individual (DHI) e Distorção Harmônica Total (DHT). E para este caso, utiliza-se da técnica matemática, transformada rápida de Fourier (FFT) para o cálculo desses índices de amplitude e ângulo das harmônicas podendo-se considerar separadamente cada componente harmônica e a distorção final determinada pela superposição das várias componentes constituintes do sinal distorcido.

A DHT é a relação de todas as correntes harmônicas de 2 a 50, com a corrente fundamental. Desta forma, sendo expressa como uma composição quadrática das distorções individuais, como mostrado em (2):

$$DHT(\%) = \sqrt{\sum_{h=2}^H DHT^2} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100, \quad (2)$$

sendo H a máxima harmônica a ser analisada no sistema. De acordo com ONS (2016), utiliza-se dois indicadores para a avaliação da distorção harmônica totais e individuais, que são o DTHI e DTHTS95%. O DTHTS95% é obtido através dos valores das medições de tensão superiores a 5% dos registros feitos obtidos em um dia, considerando medições com intervalos de tempo de 10 minutos, ao longo de 7 dias consecutivos, devendo-se utilizar o maior valor dentre os valores obtidos de cada fase, em cada intervalo de integralização.

4. METODOLOGIA

O sistema simulado apresenta-se na Fig. 3, este sistema é adaptado de (Barros and Barros, 2019). Ele consiste de um equivalente de rede de 120 kV, que se interliga a um alimentador de 25kV com 30 km de extensão através de um transformador de 120/25 kV; duas cargas não lineares conectadas à linha de transmissão, tendo uma carga total de 9,8 MW e 0,45 Mvar. Um parque eólico está conectado a uma rede de 25 kV, por meio de um transformador 25/0,575 kV. Primeiramente realizou-se as simulações com um parque eólico composto por cinco turbinas do tipo DFIG com capacidade geração de 2MW cada. Posteriormente realizou-se as simulações com outro parque com turbinas do tipo PMSG, também com capacidade de 2MW de geração cada. Ambas as turbinas com uma tensão nominal do estator de 575V e operando em uma frequência de 60 Hz. Todo o sistema é simulado sob velocidade de vento constante de 15 m/s (Mathworks, 2021a,b).

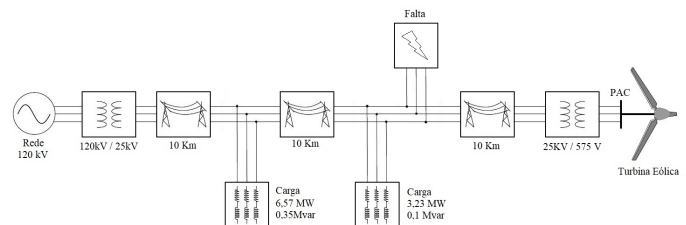


Fig. 3. Sistema teste Simulado.

No presente trabalho, ajustes quanto ao controle do chaveamento dos conversores foram realizados, para adaptar os parâmetros dos geradores a uma potência de 10 MW.

Programou-se as faltas a partir de qual condições de falha pretendia se analisar, ou seja, monofásica para terra, bifásica para terra e trifásica para terra, programando-as para um período de tempo limitado, simulados entre 0,3s e 0,5s aplicada após os 10 km da linha de transmissão.

A análise de distorção harmônica total é medida com a ferramenta *FFT Analyzer* da janela *PowerGui*, permitindo-se a execução de análises da Transformada Fourier e fornecendo acesso aos dados da simulação. Nesta ferramenta utiliza-se um algoritmo de transformação rápida de Fourier, o *power_fftscope*. O espectro dos dados simulados são exibindo por meio de um gráfico de barras relativo à frequência fundamental do sinal analisado, para este trabalho utilizaremos os níveis da THD em porcentagem como indicador para a comparação do melhor desempenhos dos parques.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das simulações realizadas, os dados foram tratados e plotados utilizando as próprias ferramentas de plotagem de gráficos disponíveis no *MATLAB/Simulink*. Desta forma, foi possível compreender o comportamento da THD em relação ao sinal de corrente e realizar uma análise comparativa entre turbinas do tipo DFIG e turbinas do tipo PMSG. Detalhadamente, quatro casos de operações são analisados para cada tipo de aerogerador:

- Cenário 1: Análise da THD sem a ocorrência de faltas;
- Cenário 2: Análise da THD com a ocorrência de falta monofásica - terra;
- Cenário 3: Análise da THD com a ocorrência de falta bifásica - terra;
- Cenário 4: Análise da THD com a ocorrência de falta trifásica - terra.

5.1 Análise da THD na presença da PMSG

5.1.1 Cenário 1: Análise da THD sem a ocorrência de faltas:

Na Fig. 4 apresenta-se o sinal de corrente sem nenhuma falha aplicada ao sistema. Desse modo, apresentando as características desse sinal no PAC do parque eólico.

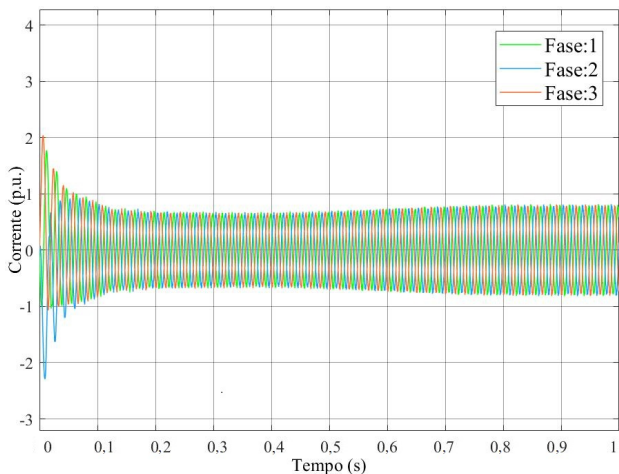


Fig. 4. Sinal da corrente turbina PMSG sem falha.

Observa-se a partir do sinal da onda de corrente, que mesmo sem condição de falta, há a presença de distorção harmônica, devido às características não lineares do conversor empregado pelo gerador eólico e cargas não lineares acopladas ao sistema.

Sem condição de falta a análise de THD na janela FFT da corrente de saída no parque eólico é apresentada na Fig. 5.

Observando-se a Fig. 5, aponta-se 3,79% de distorção harmônica total na forma de onda da corrente de saída analisada pela FFT. Explicado pela associação de cargas não lineares na rede de transmissão e pelas características não lineares dos equipamentos do sistemas. O gráfico em barras apresenta a ordem das harmônicas com maior participação na composição final do sinal.

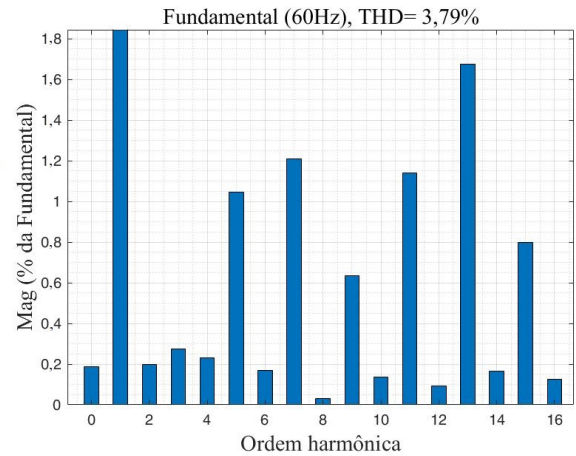


Fig. 5. Análise da FFT para o sinal de corrente.

5.1.2 Cenário 2: Análise da THD com a ocorrência de falta monofásica - terra:

Neste caso, uma falta fase - terra é aplicada por um período limitado de tempo. Há um aumento nos níveis de corrente e aumento da THD, conforme mostrado nos resultados da simulação de corrente de saída no parque eólico mostrado na Fig. 6.

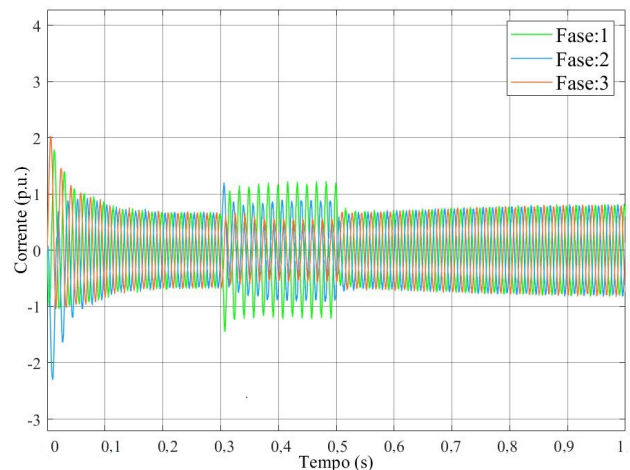


Fig. 6. Sinal da corrente turbina PMSG com falta monofásica - terra.

Em uma falta fase - terra a análise dos níveis de THD na janela FFT da corrente de saída no parque eólico é apresentada na Fig. 7. Também é observado a partir da análise FFT da forma de onda da corrente, que a distorção harmônica total aumenta até 4,84%, conforme mostrado, em comparação com 3,79% do THD na condição sem falha.

5.1.3 Cenário 3: Análise da THD com a ocorrência de falta bifásica - terra:

Neste caso, uma falta bifásica para à terra é injetada por um período limitado de tempo, e pode-se notar um aumento na instabilidade no sinal de corrente se comparado com a injeção da falta monofásica, conforme mostrado nos resultados da simulação na Fig. 8.

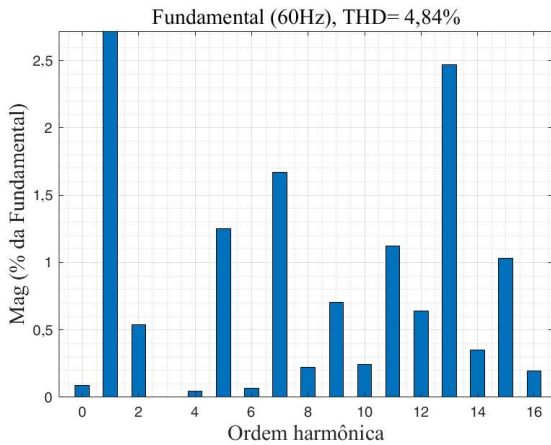


Fig. 7. Análise da FFT para o sinal de corrente.

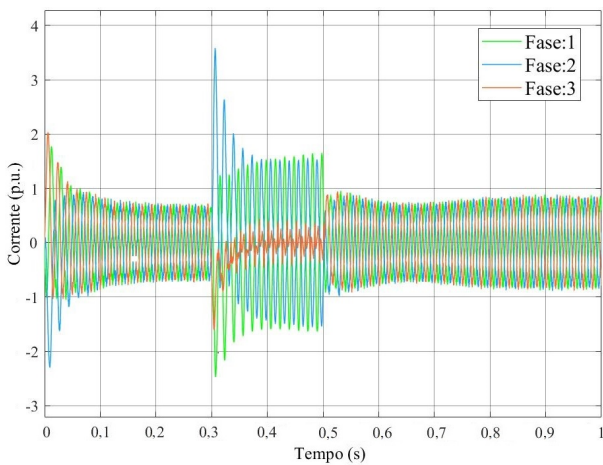


Fig. 8. Sinal da corrente turbina PMSG com falta bifásica - terra.

Na condição de falta bifásica para o terra, a análise THD na janela FFT da corrente de saída no parque eólico é apresentada na Fig. 9. Pode-se observar que novamente há um aumento nos níveis de THD analisados, chegando agora ao valor de 6,54%.

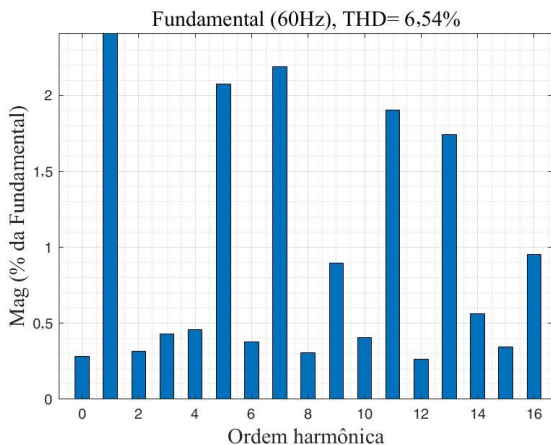


Fig. 9. Análise da FFT para o sinal de corrente.

5.1.4 Cenário 4: Análise da THD com a ocorrência de falta trifásica - terra:

Neste caso, três fases são expostas a condição de falta, sendo esta uma condição de falta muito rara em sistemas elétricos. Percebe-se um aumento bastante agressivo na instabilidade do sinal, seguindo por um decaimento, que pode ser explicado pelo sistema de proteção do parque eólico e pelo FPC, que fez o seu desligamento da rede proporcionando um desacoplamento completo, garantindo uma menor sensibilidade a distúrbios externos. Os resultados da simulação dos sinais de saída da corrente no parque eólico são mostrados na Fig. 10.

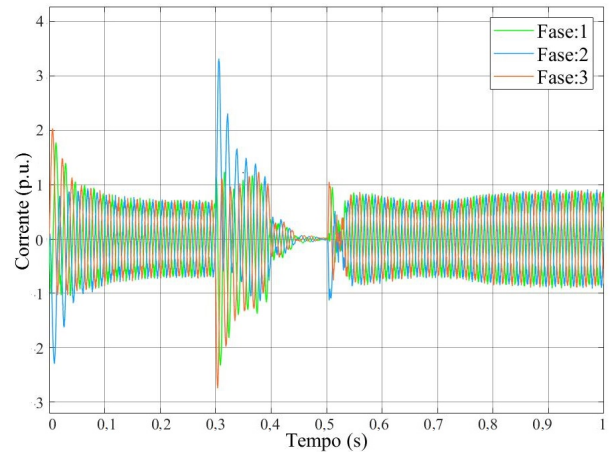


Fig. 10. Sinal da corrente turbina PMSG com falta trifásica - terra.

Nas três fases para a condição de falta à terra, a análise de THD na janela FFT da corrente de saída no parque eólico é apresentada na Fig. 11. Conforme observado na análise de THD, o THD atual aumenta à medida que a gravidade da falha aumenta, como ocorreu durante a falta trifásica - terra. Para este caso os níveis de THD chegaram a 7,26%.

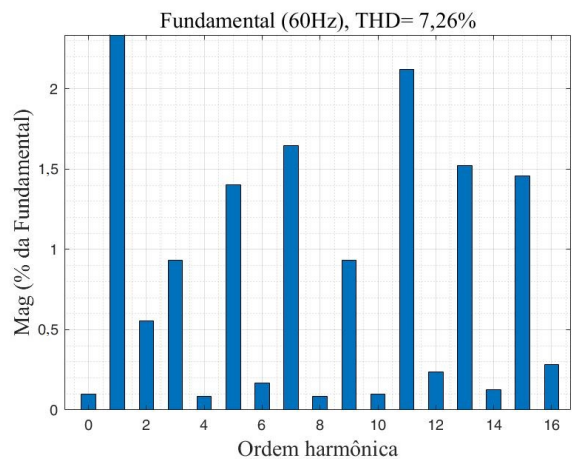


Fig. 11. Análise da FFT para o sinal de corrente.

Em resumo na Tabela 1, a Distorção Harmônica Total (THD) na corrente de saída aumenta com o nível de falha. Esse aumento de THD, pode acarretar em problemas já citados durante o trabalho, como por exemplo, afeta a

capacidade de potência, causa superaquecimento dos equipamentos, desligamentos desnecessários e pode danificar o equipamento, prejudicando sua vida útil, entre outros.

Tabela 1. Níveis de Distorção Harmônica Total (THD) na corrente para turbinas PMSG durante diferentes condições do sistema.

Condições do sistema	TDH no sinal da Corrente
Sem a ocorrência de faltas	3,79%
Falta monofásica - terra	4,84%
Falta bifásica - terra	6,54%
Falta trifásica - terra	7,26%

5.2 Análise da THD na presença do DFIG

5.2.1 Cenário 1: Análise da THD sem a ocorrência de faltas:

Na Fig. 12 apresenta-se o sinal de corrente sem nenhuma falha aplicada ao sistema, apresentando as características desse sinal no PAC do parque eólico com turbina do tipo DFIG.

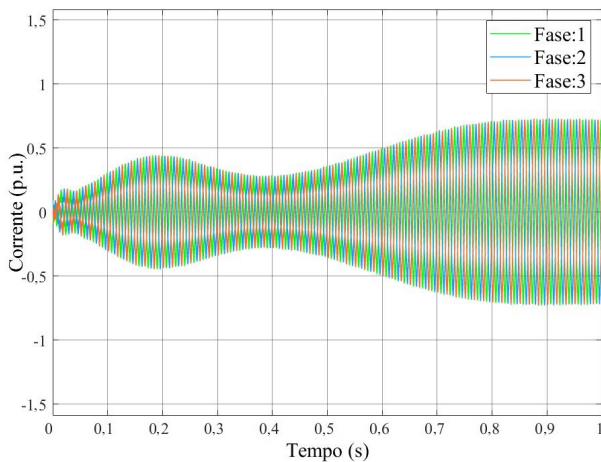


Fig. 12. Sinal da corrente turbina DFIG sem falha.

Sem condição de falta a análise de THD na janela FFT da corrente de saída no parque eólico é apresentada na Fig. 13.

A partir da observação do sinal de corrente, pode-se notar características um pouco diferente do sinal de corrente presente no gerador do tipo PMSG. Porém, assim como no gerador PMSG, mesmo sem a injeção de faltas, também é possível perceber a presença de distorções harmônicas com a análise do sinal de corrente do gerador DFIG. Estas distorções são explicadas pela não linearidade das cargas e dos outros elementos da rede, porém cada tecnologia tem suas particularidades, fazendo com que ocorram níveis de THD diferentes para cada sistema analisado. Neste caso, os níveis de distorção harmônica total na forma de onda da corrente de saída observada pela análise FFT, é de 4,92%, conforme mostrado na Fig. 13.

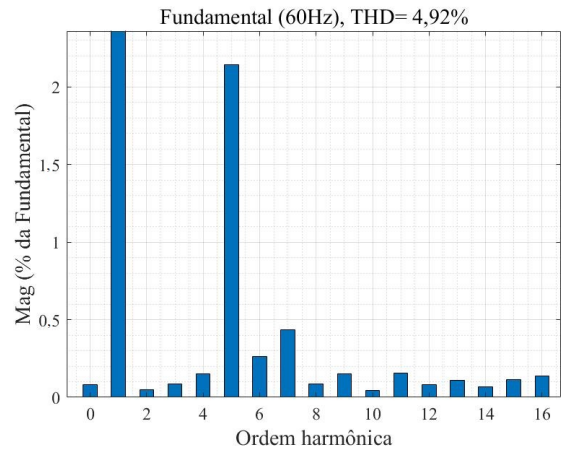


Fig. 13. Análise da FFT para o sinal de corrente.

5.2.2 Análise da THD com a ocorrência de falta monofásica - terra:

Uma única falta fase - terra, também é aplicada por um período limitado de tempo, um aumento nos níveis de corrente e o aumento da THD, conforme mostrado nos resultados da simulação de corrente de saída no parque eólico mostrado na Fig. 14.

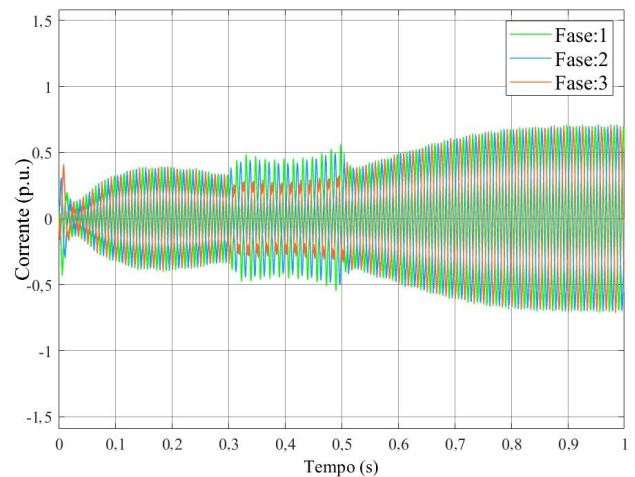


Fig. 14. Sinal da corrente turbina DFIG com falta monofásica - terra.

Assim como ocorreu nas análises anteriores, também é observado a partir da análise FFT da forma de onda da corrente, que a distorção harmônica total aumentou com relação a análise sem a ocorrência de uma falta, para este caso assumindo um valor de 5,39%. Os níveis de THD na janela FFT da corrente de saída no parque eólico é apresentada na Fig. 15.

5.2.3 Cenário 3: Análise da THD com a ocorrência de falta bifásica - terra:

Neste caso, a injeção de uma falta bifásica para à terra por um período limitado de tempo, fez com que as distorções de corrente também aumentassem conforme mostrado nos

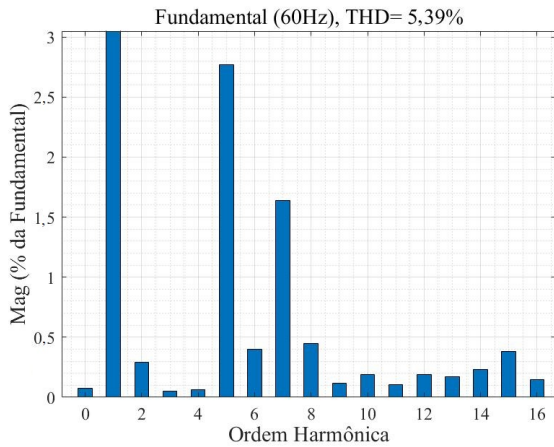


Fig. 15. Análise da FFT para o sinal de corrente.

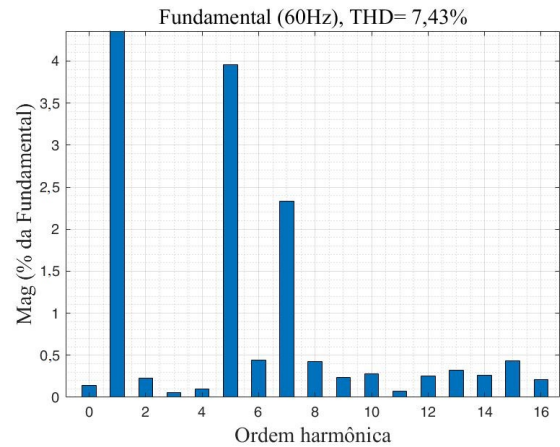


Fig. 17. Análise da FFT para o sinal de corrente.

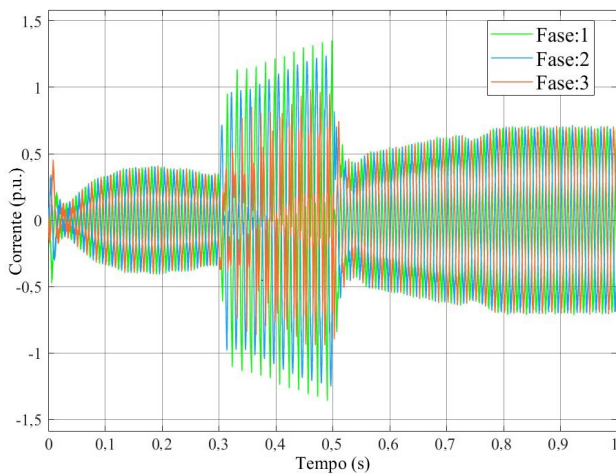


Fig. 16. Sinal da corrente turbina DFIG com falta bifásica - terra.

resultados da simulação do sinal de saída da corrente no parque eólico mostrado na Fig. 16.

Na condição de falta bifásica para o terra, a análise THD na janela FFT da corrente de saída no parque eólico é apresentada na Fig. 17. Pode-se observar que novamente há um aumento nos níveis de THD analisados, chegando agora ao valor de 7,43%, ultrapassando o valor máximo dos níveis de THD analisado nas simulações do parque com turbinas PMSG.

5.2.4 Cenário 4: Análise da THD com a ocorrência de falta trifásica - terra:

Por fim, novamente as três fases são expostas à condição de falta trifásica para o terra. Os resultados da simulação dos sinais de saída da corrente no parque eólico são mostrados na Fig. 18. Observando-se que mesmo após o fim da programação da ocorrência em 0,5s, os níveis no sinal de corrente se mantém elevados por alguns instantes, isso se explica devido a estabilização desse sistema ocorrer de forma mais lenta para esse tipo de falta.

A análise de THD na janela FFT da corrente de saída no parque eólico sobre a condição de falta trifásica para o terra, é apresentada na Fig. 19. Conforme observado anteriormente, o THD atual aumenta à medida que a

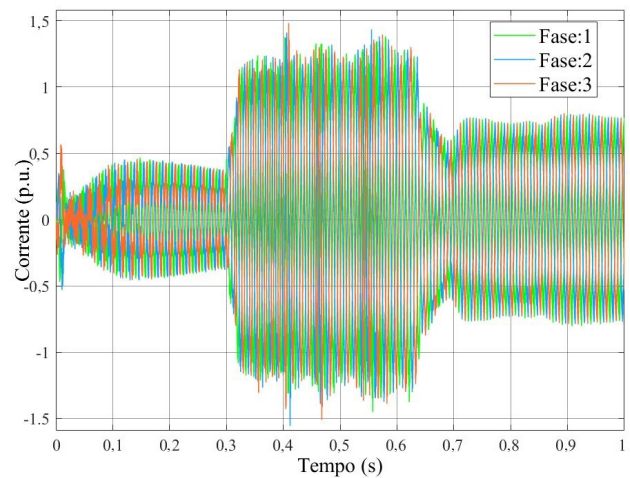


Fig. 18. Sinal da corrente turbina DFIG com falta trifásica - terra.

gravidade da falha aumenta. Para este caso os níveis de THD chegaram a 9,34%.

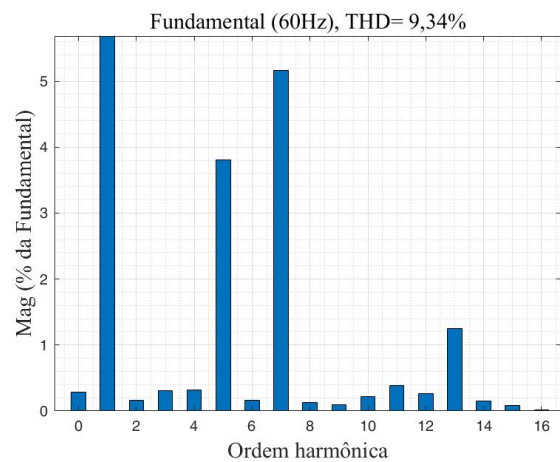


Fig. 19. Análise da FFT para o sinal de corrente.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos níveis de THD analisados para o gerador DFIG.

Tabela 2. Níveis de Distorção Harmônica Total (THD) na corrente para turbinas DFIG durante diferentes condições do sistema.

Condições do sistema	TDH no sinal da Corrente
Sem a ocorrência de faltas	4,92%
Falta monofásica - terra	5,39%
Falta bifásica - terra	7,43%
Falta trifásica - terra	9,34%

5.3 Comparação entre os níveis de THD

Os resultados obtidos indicam um melhor desempenho do parque eólico com PMSG em relação ao parque eólico com DFIG, quando exposto as mesmas condições de faltas no sistema, analisando a injeção de harmônicos na rede, sendo este um fator determinante na qualidade de energia elétrica. O Resultado da comparação entre os parques é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados da THD entre os parques eólicos PMSG e DFIG.

Turbinas	Sem Falta	Monofásica	Bifásica	Trifásica
PMSG	3,79%	4,84%	6,34%	7,26%
DFIG	4,92%	5,39%	7,43%	9,34%

Observa-se um aumento na instabilidade do sinal da corrente analisada à medida que a gravidade da falta aumenta para todos os cenários simulados em ambos os parques. O aumento da instabilidade, consequentemente ocasiona um aumento nos níveis de THD, sendo assim, turbinas PMSG apresentaram um melhor desempenho, podendo-se explicar esses resultados devido as vantagens apresentadas na arquitetura dos conversores utilizados pelos aerogeradores PMSG em situações de faltas.

6. CONCLUSÃO

Verificou-se que embora o conteúdo harmônico era menor no parque eólico PMSG em comparação com o parque eólico DFIG, ambos os parques estavam violando o limite harmônico de acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Com isso, a implementação de dispositivos de mitigação de harmônicas como D-STATCOM, filtros passivos, filtros de potência ativa, entre outros, será útil para limitar o conteúdo harmônico dos parques dentro dos limites permitidos. Conforme apresentado no artigo, é possível observar qual harmônico impacta diretamente na qualidade de energia em cada parque. Nas análises de parque PMSG é possível observar a predominância de harmônicas da 5^o, 7^o, 9^o e 11^o, enquanto nas análises do parque DFIG observa-se somente a predominância de harmônicas de 5^o e 7^o ordem. Também observa-se em todos os espectros analisados, a presença de uma componente harmônica de ordem zero, essa componente é explicada como sendo a componente CC desse sinal analisado. Assim, considerando apenas a distorção harmônica, para os diferentes casos de ocorrências de faltas, os resultados alcançados recomendam fortemente a seleção de máquinas PMSG tendo como base os parâmetros e condições propostas.

REFERÊNCIAS

Barros, L.S. and Barros, C.M.V. (2019). Análise da participação de um sistema de conversão de energia

eólica baseado em pmsg no controle primário da rede elétrica. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, volume 1.

Cedraz, V.Y.M.d.S. (2015). Estudo e simulação de sistemas eólicos. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana.

Desai, S.G., Mehtre, V.V., and Bankar, D. (2016). Harmonic analysis and mitigation in wind power plants. In *2016 Conference on Advances in Signal Processing (CASP)*, 43–48. IEEE.

Kumar, M., Sandhu, K., and Kumar, A. (2014). Simulation analysis and thd measurements of integrated pv and wind as hybrid system connected to grid. In *2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, 1–6. IEEE.

Lima, M.d.S. et al. (2019). Uma análise crítica das distorções harmônicas de correntes associadas a aerogeradores dfig.

Magalhães, C.M.S.d. (2010). Análise do impacto de conversores de frequência na qualidade da energia do sistema de distribuição de uma indústria de petróleo.

Mathworks (2021a). WIND Farm - DFIG detailed model. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/wind-farm-synchronous-generator-and-full-scale-converter-type-4-detailed-model.html>. Acesso em: 08 jul. 2021.

Mathworks (2021b). WIND Farm - synchronous generator and full scale converter (type 4) detailed model. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/wind-farm-synchronous-generator-and-full-scale-converter-type-4-detailed-model.html>. Acesso em: 08 jul. 2021.

Memon, S.H., Kumar, M., Memon, A.H., Memon, Z.A., and Soomro, S.A. (2018). Total harmonic distortion (thd) analysis of grid integrated permanent magnet synchronous generator (pmsg) with full scale converter (fsc) based wind farm. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 18(12), 232–238.

Neves, P.S. (2014). Interligação da geração eólica com o sistema elétrico de potência. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica.

Oliveira, J.P.J.d. (2018). Geradores síncronos a ímãs permanentes aplicados a aerogeradores: modelagem, obtenção de parâmetros e validação laboratorial.

ONS (2016). Procedimento de rede: Submódulo 2.8 – o operador nacional do sistema elétrico e os procedimentos de rede – visão geral. Rio de Janeiro, 2016c, 32p. Disponível em: <http://www.ons.br/procedimento/index.aspx>. Acesso em: 20 Jun. 2021.

Rocha, M.A. (2018). Modelagem e controle de gerador de indução duplamente alimentado para estudo de sistema de geração eólica.

Schwanz, D. (2013). Análise da distorção harmônica de um parque eólico através da sua modelagem no domínio do tempo e da frequência.

Zolett, B. (2020). Estudo dos supra-harmônicos inseridos por parques eólicos em sistemas de transmissão de energia elétrica.