

**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**ESTUDO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE
MODELO SIMPLIFICADO PARA ESTIMAR
CORRENTES HARMÔNICAS EM
AEROGERADORES**

**Autora: Thainá Rodrigues Fernandes
Orientador: Prof. Dr. Alex Reis**

**Brasília, DF
2021**



THAINÁ RODRIGUES FERNANDES

**ESTUDO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MODELO SIMPLIFICADO
PARA ESTIMAR CORRENTES HARMÔNICAS EM AEROGERADORES**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

**Brasília, DF
2021**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Fernandes, Thainá Rodrigues.

Estudo e análise de desempenho de modelo simplificado para
estimar correntes harmônicas em aerogeradores/ Thainá
Rodrigues Fernandes. Brasília: UnB, 2021. 46 p.: il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2021. Orientação: Prof. Dr. Alex Reis.

1. Aerogeradores. 2. Harmônicas. 3. Modelo simplificado. I. Reis,
Alex. II. Validação de modelo simplificado para estimar correntes
harmônicas em aerogeradores.

CDU Classificação

- A ficha catalográfica oficial deverá ser solicitada à Biblioteca pelo aluno após a apresentação.



**ESTUDO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MODELO SIMPLIFICADO
PARA ESTIMAR CORRENTES HARMÔNICAS EM AEROGERADORES**

Thainá Rodrigues Fernandes

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr. Alex Reis, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Me. Pedro Henrique Moraes Franco, IFG
Membro Convidado

Rodrigo Cesar Neves Mendonça, ANEEL
Membro Convidado

Brasília, DF
2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, **Isaura e Jozafá**, por todo suporte, amor, apoio incondicional e esforços dedicados à minha educação. As minhas tias **Auciliadora, Severina e Luiza**, e minha avó, **Vicência**, por todo amor e contribuição no meu crescimento e na minha formação como mulher. Agradeço ainda meus irmãos, **Thais** e **Caio**, pelo apoio em mais essa etapa.

Aos meus amigos, em especial meu companheiro da FGA, **Danylo**, agradeço a amizade e apoio, e por ter sido meu grande parceiro durante toda essa longa etapa da graduação.

À **Bruna**, agradeço por todo carinho, incentivo e parceria de grande importância na minha vida, e ainda pelo auxílio no desenvolvimento desse trabalho.

Ao meu orientador, Prof. **Alex Reis**, e aos membros da banca examinadora, **Pedro Franco** e **Rodrigo Mendonça**, agradeço por todo o apoio, confiança e ensinamentos constantes que foram essenciais para a realização desse trabalho.

RESUMO

A energia elétrica é um insumo fundamental para o desenvolvimento da sociedade e qualidade de vida da população. Atualmente, o crescimento da oferta de energia vem acompanhado de uma maior preocupação com o meio ambiente e com o emprego de fontes de energia mais limpas e renováveis, dentre as quais se destaca a energia eólica, que apresenta um crescimento expressivo nos últimos anos. Os sistemas de geração de energia eólica têm como uma de suas partes fundamentais o conversor de potência, que viabiliza a conexão do sistema com a rede elétrica, porém, a operação desse componente resulta em distorções na forma de onda da tensão e corrente no ponto de acoplamento à rede, afetando a qualidade da energia entregue. Essas distorções são conhecidas como harmônicas e inter-harmônicas. De forma a realizar a caracterização prévia da conexão de parques eólicos à rede elétrica e projetar ações preventivas quando necessário, podem ser utilizados modelos e ferramentas computacionais para simulações, entre eles modelos simplificados. Nesse contexto, este trabalho tem o objetivo de estudar e analisar o desempenho de um modelo simplificado para inversores, dedicado a estudos de harmônicas e inter-harmônicas, por meio da comparação de resultados simulados com as medições reais de um parque eólico. Para alcançar esse objetivo é proposto o estudo de sistemas eólicos de geração de energia, de forma a identificar os fatores que influenciam a produção das distorções harmônicas e inter-harmônicas em aerogeradores, bem como o estudo dos modelos de simulação de aerogeradores e da regulação brasileira que normatiza o acesso de parques eólicos a redes elétricas. O resultado da simulação mostrou que o modelo em análise é capaz de estimar de maneira satisfatória o espectro harmônico da corrente, o erro absoluto observado foi inferior a 0,2%, confirmando assim o bom desempenho do modelo.

Palavras-chave: Conversor de potência, fontes renováveis, geração eólica, harmônicas, inter-harmônicas, modelo simplificado, qualidade de energia.

ABSTRACT

The use of electric energy is essential to social development and life quality, nowadays the growth of the energy supply has been associated with the growth of concern about the environment and the use of cleaner and renewable energy sources, among those sources the wind energy stands out showing an expressive growth in recent years. The power converter is an essential part of wind power generation systems, this equipment is responsible for the appropriate grid integration of wind farms, however, the operation of this component affects the power quality by generating harmonic and interharmonics distortions in the current and voltage waveforms in the point of common coupling. In order to establish a previous analysis of the connection between wind turbines and the electrical network there can be used computer simulation models. This study is aimed to study and analyze a simplified model for simulation of harmonics in inverters, by comparing the results of the simulation and actual measurements of a wind farm. Furthermore, this work is conducted to study wind power generation systems, identifying influencing factors in the production of harmonics and interharmonics and the limits and standards established by Brazil's regulatory agents concerning power quality and harmonic distortions. The simulation outcome showed that the model in analysis accurately estimates the current's harmonic spectra, with an absolute error of less than 0,2%, thus confirming the accuracy of the simplified model.

Keywords: Harmonics, interharmonics, power quality, power converter, renewable energy sources, simplified model, wind generation.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS	XIII
1. INTRODUÇÃO	14
1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2 – OBJETIVOS.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 – ENERGIA EÓLICA	20
2.2 – TIPOS DE AEROGERADORES	20
2.2.1 – Gerador de indução com escorregamento variável.....	21
2.2.2 – Gerador de indução com conversor de potência	22
2.2.3 – Gerador de indução duplamente alimentado	22
2.2.4 – Gerador síncrono.....	23
2.3 – DISTORÇÕES HARMÔNICAS E INTER-HARMÔNICAS	25
2.4 – FATORES DE INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS	28
2.4.1 – Funcionamento do conversor	28
2.4.2 – Distorções harmônicas inerentes ao chaveamento PWM.....	29
2.4.3 – Distorções harmônicas inerentes ao tempo morto	31
2.4.4 – Distorções harmônicas inerentes à conexão com a rede	32
2.5 – MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	33
2.5.1 – Modelo detalhado	33
2.5.2 – Modelo simplificado	35
2.6 – REGULAMENTAÇÃO BRASILEIRA PARA A CONEXÃO ENTRE PARQUES EÓLICOS E A REDE ELÉTRICA.....	37
2.6.1 – Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes.....	37

2.6.2 – Submódulo 3.3 – Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão	38
2.6.3 – Nota Técnica ONS NT 09/2016 – “Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos novos acessos à rede básica para parques eólicos, solares e consumidores livres”	38
3. METODOLOGIA	40
3.1 – DESCRIÇÃO DO PARQUE EÓLICO.....	40
3.2 – DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS EMPREGADOS NO MODELO	43
3.3 – SIMULAÇÃO EM MODELO SIMPLIFICADO	45
3.4 – MÉTRICAS DE COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	49
4. RESULTADOS.....	51
4.1 – MEDIÇÕES DO PARQUE EÓLICO REAL.....	51
4.2 – MEDIÇÕES DA SIMULAÇÃO EM MODELO SIMPLIFICADO	53
4.3 – COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DA SIMULAÇÃO E DADOS OBTIDOS EM CAMPO	54
5. CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Limites de tensões harmônicas em porcentagem da tensão fundamental. .	38
Tabela 2.2 - Requisitos técnicos referentes a harmônicos para a conexão à rede.	38
Tabela 4.1 – Correntes harmônicas medidas no Aerogerador 03.....	52
Tabela 4.2 - Correntes harmônicas simuladas para o Aerogerador 03.....	54
Tabela 4.3 – Comparação entre DHTi simulado e real por meio do erro absoluto	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Evolução da capacidade eólica instalada mundial em MW por ano.....	15
Figura 1.2 - Evolução da capacidade instalada de geração eólica no Brasil.	16
Figura 2.1 - Diagrama de um aerogerador de indução com escorregamento variável. ..	21
Figura 2.2 - Diagrama de um aerogerador de indução com conversor de potência.	22
Figura 2.3 - Diagrama de um aerogerador de indução de duplamente alimentado.	23
Figura 2.4 - Diagrama de um aerogerador síncrono de rotor bobinado.	24
Figura 2.5 - Diagrama de um aerogerador síncrono de ímãs permanentes.	24
Figura 2.6 – Exemplo de distorção harmônica.	26
Figura 2.7 - Exemplo de distorção inter-harmônica.	27
Figura 2.8 - Diagrama do esquema de um conversor back-to-back.	29
Figura 2.9 - Regiões de operação do conversor de potência.	30
Figura 2.10 - Pulsos de acionamento considerando o tempo morto.	31
Figura 2.11 - Impacto do tempo morto das chaves na tensão/corrente de saída do inversor.	32
Figura 2.12 - Diagrama do modelo detalhado com a geração de uma (a) turbina eólica do tipo IV ou de um (b) módulo fotovoltaico.....	33
Figura 2.13 - Diagrama de blocos do modelo PWM com controle <i>VDC</i>	34
Figura 2.14 - Diagrama do modelo simplificado.....	35
Figura 3.1 – Diagrama unifilar da conexão do complexo eólico ao SIN.	42
Figura 3.2 – Diagrama unifilar do Circuito 01 do Parque Eólico 1.....	42
Figura 3.3 – Esquema do complexo eólico para simulação.	43
Figura 3.4 – Parâmetros do complexo eólico utilizados para simulação.....	44
Figura 3.5 – Visão geral do modelo simplificado no SIMULINK.....	46
Figura 3.6 – Circuito equivalente da turbina no modelo simplificado no SIMULINK..	47
Figura 3.7 – Unidade de processamento e controle no modelo simplificado no SIMULINK.....	48
Figura 4.1 – Espectro harmônico medido com injeção de potência de 60% da nominal.	53
Figura 4.2 - Espectro harmônico medido com injeção de potência de 100% da nominal.	53
Figura 4.3 – Comparação entre simulação e medição em campo para 60% da potência nominal.	55
Figura 4.4 - Comparação entre simulação e medição em campo para 80% da potência nominal.	56

Figura 4.5 – Comparação entre simulação e medição em campo para 100% da potência nominal. 56

Figura 4.6 - Comparação entre DHTi simulado e medido em campo para variações de 60% a 100% da potência nominal do aerogerador 57

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

Nomenclaturas:

AC	- <i>Alternating Current</i>
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	- Corrente Contínua
DC	- <i>Direct Current</i>
DM	- <i>Detailed Model</i>
FLL	- <i>Frequency-Locked Loop</i>
HM	- <i>Harmonic Model</i>
ONS	- Operador Nacional do Sistema Elétrico
PI	- Proporcional-Integral
PLL	- <i>Phase-Locked Loop</i>
PMSG	- <i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
PoC	- <i>Point of Connection</i>
Proinfa	- Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PWM	- <i>Pulse-Width Modulation</i>
QEE	- Qualidade da Energia Elétrica
RES	- <i>Renewable Energy Sources</i>
SEP	- Sistema Elétrico de Potência
SM	- <i>Simplified Model</i>
SPWM	- <i>Sinusoidal Pulse-Width Modulation</i>
THD	- <i>Total Harmonic Distortion</i>
WRSG	- <i>Wounded Rotor Synchronous Generator</i>

1. INTRODUÇÃO

O fornecimento de energia é fundamental para o desenvolvimento da sociedade moderna. Com o crescente avanço industrial, observa-se que o consumo energético é a base para praticamente todas as atividades econômicas, científicas e tecnológicas (KENNEDY; BACHMANN, 2016). No entanto, a importância da produção de energia vai além dos aspectos supracitados, sendo capaz de proporcionar uma melhoria na qualidade de vida e na condição social das pessoas (PINTO; SANTOS, 2017).

1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO

Com o aumento da população mundial e a modernização da sociedade, observa-se uma crescente demanda por novas fontes de energia, sendo acompanhada pelos debates acerca da preservação dos recursos ambientais e do desenvolvimento sustentável (FREITAS; DATHEIN, 2013).

A instalação de novas fontes de geração de energia elétrica depende de diversos aspectos, como a viabilidade econômica e a necessidade de garantir um fornecimento constante e estável. Além disso, deve-se prezar pelo emprego de fontes mais limpas, que proporcionam o uso consciente dos recursos naturais. Dessa forma, surge o conceito da geração elétrica por meio de fontes renováveis de energia (MOURA, 2017).

Dentre as fontes renováveis, destacam-se as gerações fotovoltaica, eólica, geotérmica, a biocombustíveis, entre outras. Com o emprego dessas fontes, pode-se reduzir a emissão dos gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono CO₂, além de possibilitar uma maior diversificação da matriz energética e elétrica (PINTO; SANTOS, 2017).

Em todo o mundo, a produção de energia elétrica por meio de fontes renováveis vem ganhando espaço, sendo a energia eólica uma das principais. Atualmente, a geração eólica tem apresentado resultados atrativos em vários países e, com isso, tem liderado a lista de fontes que não emitem gases de efeito estufa (GWEC, 2019). Essa fonte se baseia na conversão de energia mecânica em energia elétrica por meio de turbinas eólicas.

Dentre os motivos e atrativos que têm norteado o emprego da energia eólica, destacam-

se: tempo de implementação muito menor do que outras fontes de energia, custo de construção baixo se comparado com outras tecnologias, baixo impacto ambiental, além de propiciar instalações mais facilitadas sob o aspecto das montagens físicas. Nesse sentido, os interesses manifestados pela utilização de parques eólicos conduziram, até final de 2019, a uma capacidade total de geração instalada em todo mundo de cerca de 650,8 GW instalado, número este que reflete um aumento de cerca de 10% em relação ao ano de 2018 (WWEA,2020). Na atualidade, as maiores explorações desta fonte de energia se localizam na China, EUA, Alemanha, Espanha e Índia, os quais, cumulativamente, concentram cerca de 74% da capacidade mundial instalada. Outro ponto de destaque se refere ao percentual de participação de fontes eólicas em matrizes energéticas, o qual, para alguns países, a exemplo da Dinamarca e Portugal, já atingiu cerca de 25% de toda a energia elétrica consumida. A Figura 1.1 demonstra o crescimento da capacidade instalada de energia eólica em todo mundo entre os anos de 1981 e 2019.

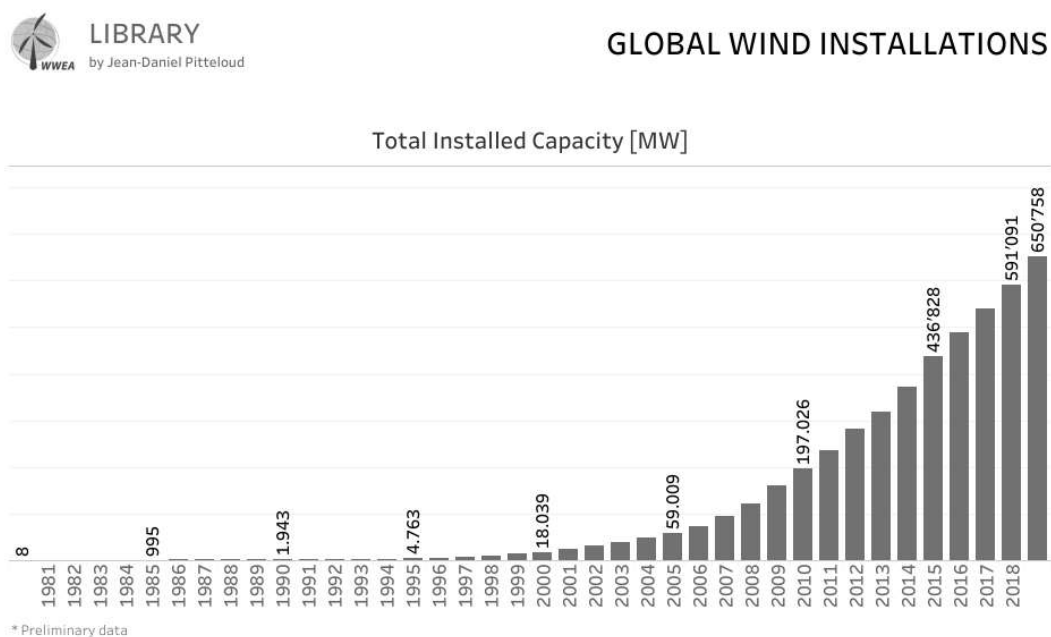


Figura 1.1 - Evolução da capacidade eólica instalada mundial em MW por ano.
Fonte: WWEA, 2020

No Brasil, a geração de energia elétrica se baseia principalmente na matriz hidrelétrica. Porém, como a dependência nessa fonte é expressiva, condições indesejadas no sistema podem ocorrer. Por exemplo, situações emergenciais são frequentemente registradas no setor energético devido a períodos de seca que obrigam os diversos reservatórios de água a operarem abaixo dos níveis mínimos. Por isso, destaca-se a importância da

diversificação da matriz energética e elétrica, empregando fontes que operam normalmente em períodos de escassez de chuva no Brasil, como é o caso, por exemplo, da geração solar e eólica (PINTO; SANTOS, 2017).

Com o objetivo de diversificar a matriz elétrica nacional, aumentando a participação das fontes renováveis, alguns programas e políticas públicas foram criados para fomentar a expansão do setor. Em 2002, o PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia foi instituído pela Lei nº 10.438/2002 e revisado pela Lei nº 10.762/2003. O PROINFA garantia a compra da energia pela Eletrobrás a um preço acima dos praticados pela geração hidrelétrica, e ainda, financiamentos de até 80% do investimento total das usinas, recursos estes advindos do BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Portanto, o PROINFA foi uma medida pioneira e positiva para o incentivo e a promoção da inserção dos parques eólicos no Brasil. No entanto, a estratégia mais atual utilizada a nível governamental, encontra-se baseada na inclusão desta geração através da realização de leilões de curto e médio prazos. No que tange sistemas de micro e minigeração de energia, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu por meio da Resolução Normativa nº 482/2012 o sistema de compensação de energia elétrica, incentivando a expansão de sistemas de geração distribuída. De forma geral, o incentivo proporcionado por essas políticas públicas contribuiu e segue contribuindo para o crescimento da inserção de diferentes fontes renováveis à matriz elétrica brasileira.

No que se refere à evolução da energia eólica no Brasil, a Figura 1.2 apresenta o histórico da capacidade instalada nova e acumulada (em GW) entre 2006 e 2019. Além disso, demonstra a estimativa de crescimento até o ano de 2024. Essa estimativa se trata da previsão de início de operação de usinas eólicas no SIN já aprovadas pela ANEEL (ANEEL, 2020).

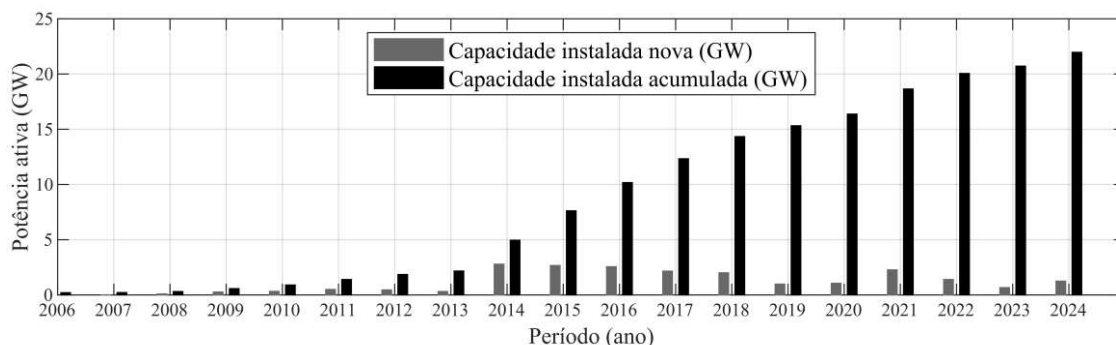


Figura 1.2 - Evolução da capacidade instalada de geração eólica no Brasil.

Com base na análise da Figura 1.2, verifica-se o crescimento da capacidade instalada de geração eólica no país. Em 2014, foi observada uma capacidade instalada acumulada de 5 GW, já a previsão para 2024 é que essa capacidade ultrapasse os 20 GW.

A integração de unidades eólicas às redes elétricas pressupõe o atendimento a diversos requisitos e procedimentos, os quais se encontram estabelecidos em documentos, normas específicas ou ainda em códigos de rede de cada país. Dentre outros quesitos, tais documentos contemplam questões atreladas com a operação em condições anormais de frequência e tensão, controles de potência ativa e reativa, impactos sobre os indicadores de distorções harmônicas e interharmônicas, flutuação de tensão e, por fim, a suportabilidade dos aerogeradores quanto a afundamentos de tensão.

Nesse contexto, cabe ressaltar que o sistema de conversão de energia eólica possui três partes fundamentais, a turbina eólica, o gerador elétrico e o conversor eletrônico. Dentre esses equipamentos, o conversor viabiliza a conexão do sistema com a rede elétrica por meio da operação de sistemas de controle e, além disso, obedece a parâmetros de operação e qualidade da energia estabelecidos em normas.

O inversor é responsável pela conversão do sinal em corrente contínua para corrente alternada (CC/CA). Essa conversão é realizada por meio do controle das chaves eletrônicas ou transistores de potência, sendo possível a obtenção da tensão senoidal, sincronizada e em fase com a tensão da rede (ROCHA, 2014). O processo de comutação das chaves é realizado em alta frequência, o que gera componentes harmônicos associados à frequência de chaveamento. Com isso, observa-se distorções nas formas de onda das tensões e correntes, o que afeta diretamente a qualidade da energia desses dispositivos. Além disso, as emissões harmônicas de inversores são fortemente influenciadas pela interação entre a operação e controle do conversor, as distorções pré-existentes na rede e a impedância harmônica do sistema.

Em função dos fatos anteriores, surge a necessidade do desenvolvimento e validação de modelos e ferramentas computacionais que permitam simular a conexão de parques eólicos, tendo por objetivo a caracterização prévia de funcionamento e, caso necessário, o projeto de ações preventivas para garantir a operação dentro dos limites admissíveis.

Nesse contexto, no que tange à modelagem de elementos não lineares, os modelos podem ser classificados em dois grupos: modelos estáticos, os quais são, em sua essência, representados por elementos com características de impedância, corrente ou potência constante; e modelos dinâmicos, que utilizam representações matemáticas, via funções de transferência ou equações diferenciais, por meio das informações obtidas de fabricantes. Dentre as limitações associadas com este último grupo, encontra-se a falta de informações públicas, a grande complexidade dos circuitos eletrônicos e a dificuldade de se encontrar um modelo matemático genérico.

Segundo Honrubia-Escribano et al. (2018), há na literatura modelos detalhados (DM) de aerogeradores para estudos de transitórios eletromagnéticos (*EMT-models*), e modelos simplificados (SM). Apesar de os primeiros gerarem resultados aderentes ao comportamento físico, eles necessitam, geralmente, de um elevado número de variáveis e equações que demandam grande esforço computacional, o que dificulta a execução de simulações de grandes usinas.

À luz destes fatos, este trabalho tem como objetivo o estudo e avaliação de desempenho de um SM de uma turbina eólica do tipo PMSG, a qual é constituída por um gerador síncrono e um conversor *back-to-back*. Este modelo tem por objetivo simular as correntes harmônicas e interharmônicas produzidas pelo aerogerador, sob diferentes condições de potência.

1.2 – OBJETIVOS

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo geral o estudo e análise de desempenho de um modelo simplificado de uma turbina eólica para estudos de distorções harmônicas e inter-harmônicas.

Com vistas a atingir o foco principal da pesquisa, os objetivos específicos deste trabalho são descritos:

- Identificar as topologias de sistemas eólicos de geração;
- Levantar os fatores que influenciam a produção de correntes harmônicas e inter-harmônicas em aerogeradores.

- Identificar os documentos regulatórios que normatizam o acesso de parques eólicos a redes elétricas, com enfoque em indicadores de distorções harmônicas;
- Implementar modelos de simulação de aerogeradores no domínio do tempo;
- Realizar uma análise de desempenho de um modelo simplificado, por meio de comparação dos resultados de simulações com medições reais;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – ENERGIA EÓLICA

A energia eólica é convertida em energia elétrica por meio de uma turbina eólica, a qual transforma a energia cinética do vento em energia mecânica. Posteriormente, a velocidade desse movimento é transmitida para o gerador, que transforma a energia mecânica em energia elétrica (PICOLO et al., 2014). Finalmente, a tensão produzida pelo gerador é submetida ao conversor de potência, ao filtro de acoplamento e ao transformador da turbina eólica, de modo a ser ajustada para a conexão com a rede elétrica (SILVEIRA, 2016).

O físico alemão Albert Betz explica que nem toda a energia disponível nos ventos pode ser extraída, sendo que o aproveitamento máximo teórico de uma turbina eólica é de 59% da energia total da massa de ar responsável pelo giro, quando o vento que deixa as pás do rotor possui um terço da velocidade inicial. Na prática, o rendimento das turbinas comerciais é da ordem de 40% (CARVALHO, 2006).

As turbinas eólicas iniciam sua operação a partir de determinada velocidade do vento, denominada *cut-in wind speed*, não sendo vantajoso operar em velocidades inferiores, visto que a potência disponível no vento é baixa. Por outro lado, quando a velocidade do vento atinge um valor elevado, a operação da turbina é interrompida. Esse limite máximo é conhecido como *cut-out wind speed*, sendo que velocidades superiores podem causar danos físicos ao equipamento devido a esforços mecânicos excessivos (CARVALHO, 2006). Quanto maior a velocidade do vento, maior será a potência obtida, porém, acima da velocidade nominal, a turbina passa a operar com potência constante (ROCHA, 2014).

2.2 – TIPOS DE AEROGERADORES

As turbinas eólicas podem ser classificadas como turbinas de velocidade fixa ou variável. As turbinas de velocidade fixa permitem a conexão do gerador diretamente à rede elétrica, sem a necessidade de conversores de potência. Entretanto, essas turbinas têm sido cada vez menos empregadas devido ao alto estresse mecânico e ao menor aproveitamento da

potência disponível no vento (SILVEIRA, 2016). Já as turbinas de velocidade variável têm sido mais empregadas em novas instalações, pois permitem melhores ajuste do fluxo de potência. A principal vantagem dessa topologia é o máximo rendimento aerodinâmico em uma ampla faixa de velocidades. Além disso, com o uso dos conversores, é possível efetuar o controle das tensões e correntes injetadas na rede, o que possibilita melhorias na qualidade da energia elétrica (ROCHA, 2014).

Dentre os sistemas de velocidade variável, quatro tipos de geradores eólicos podem ser destacados: gerador de indução com escorregamento variável, gerador de indução com conversor de potência, gerador de indução duplamente alimentado e gerador síncrono bobinado ou a ímãs permanentes.

2.2.1 – Gerador de indução com escorregamento variável

Nesta topologia são empregados uma caixa de velocidades, o gerador de indução com rotor bobinado, um conjunto de resistências conectadas ao rotor da máquina, um *soft starter* e um banco de capacitores. A variação da velocidade do gerador ocorre devido a variação do escorregamento, possibilitada pela alteração da resistência do rotor. A Figura 2.1 apresenta o diagrama elétrico do aerogerador de indução com escorregamento variável (ROCHA, 2014).

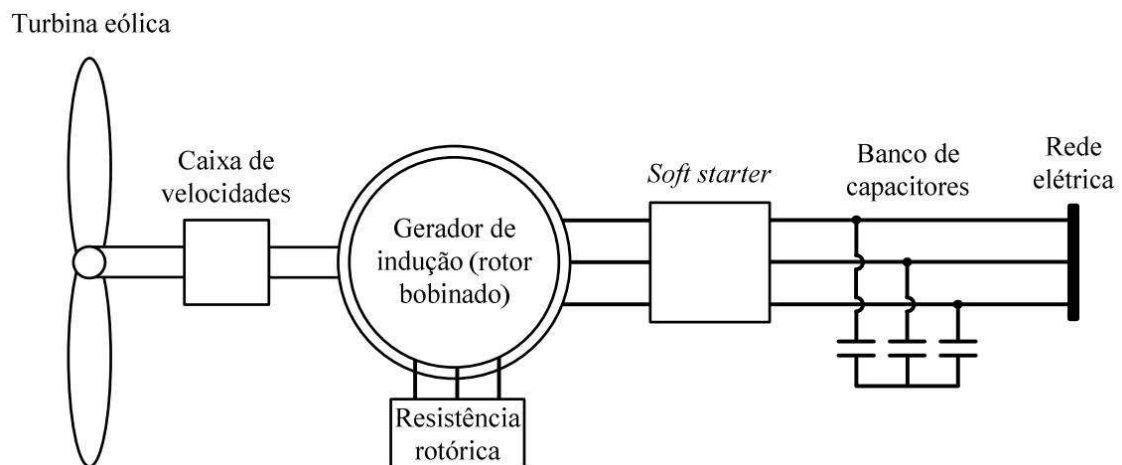


Figura 2.1 - Diagrama de um aerogerador de indução com escorregamento variável.
Fonte: ROCHA, 2014

2.2.2 – Gerador de indução com conversor de potência

Neste sistema a conexão com a rede é realizada por meio de um conversor de potência, que permite controle dos fluxos de potências ativa e reativa. Por meio do conversor, pode-se realizar o desacoplamento do gerador com a rede, reduzindo o impacto de distúrbios elétricos. Porém, nesse caso o conversor é projetado para a potência nominal aparente, o que torna necessário o uso de conversores de grande porte, aumentando assim os custos. Esse tipo de aerogerador necessita de excitação reativa, usualmente fornecida por bancos de capacitores. A Figura 2.2 apresenta o diagrama elétrico de um aerogerador de indução com conversor de potência pleno (ou *full converter*) (SILVEIRA, 2016).

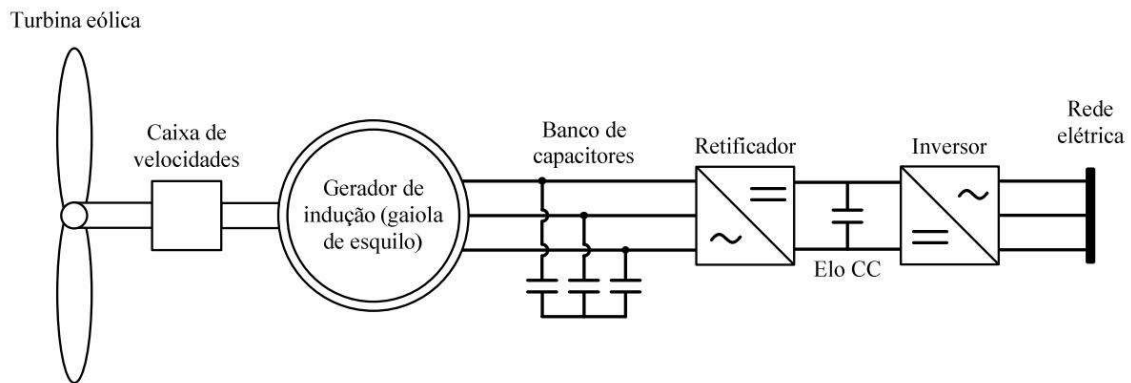


Figura 2.2 - Diagrama de um aerogerador de indução com conversor de potência.
Fonte: ROCHA, 2014

2.2.3 – Gerador de indução duplamente alimentado

O Gerador de Indução Duplamente Alimentado (*Doubly-Fed Induction Generator – DFIG*) é amplamente utilizado nas centrais eólicas industriais. Nesta topologia, encontra-se um gerador de indução com rotor bobinado, estando o estator conectado de forma direta à rede elétrica, determinando sua frequência síncrona. O rotor é interligado por meio de um conversor de potência *back-to-back*, que ajusta a frequência de excitação e permite um fluxo bidirecional de potência no sistema. O conversor pode ser dimensionado para cerca de 30% da potência nominal do gerador, o que reduz custos de produção e manutenção. Essa topologia tem a desvantagem de necessitar de uma caixa de velocidades e de anéis deslizantes no gerador, aumentando custos de manutenção mecânica. A Figura 2.3 exibe o diagrama elétrico de um aerogerador de indução duplamente alimentado (SILVEIRA, 2016).

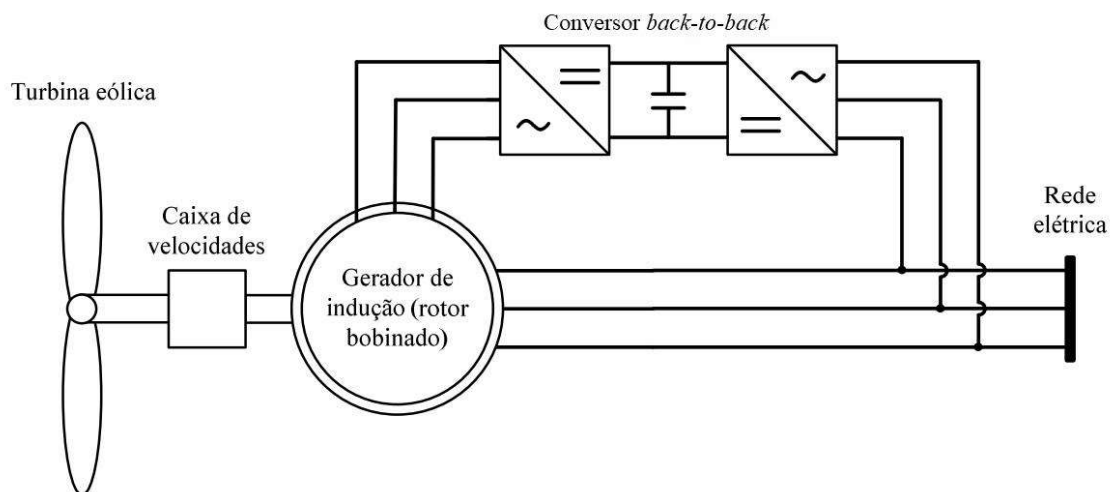


Figura 2.3 - Diagrama de um aerogerador de indução de duplamente alimentado.
 Fonte: ROCHA, 2014

2.2.4 – Gerador síncrono

Nesta configuração é empregado um conversor de potência pleno para realizar a conexão entre o gerador síncrono e a rede elétrica. Essa topologia não necessita da caixa de velocidades, pois o gerador pode ser construído em anel e com muitos polos, possibilitando o trabalho com baixas velocidades e a conexão direta da turbina ao gerador. O gerador pode ser de rotor bobinado ou de rotor a ímãs permanentes.

i. Gerador de rotor bobinado

O diagrama do Gerador Síncrono de Rotor Bobinado (GSRB) é apresentado na Figura 2.4. Essa tecnologia depende de um conversor para o circuito de campo, e os conversores estáticos têm a necessidade de serem dimensionados de acordo com a potência nominal do gerador (SILVEIRA, 2016).

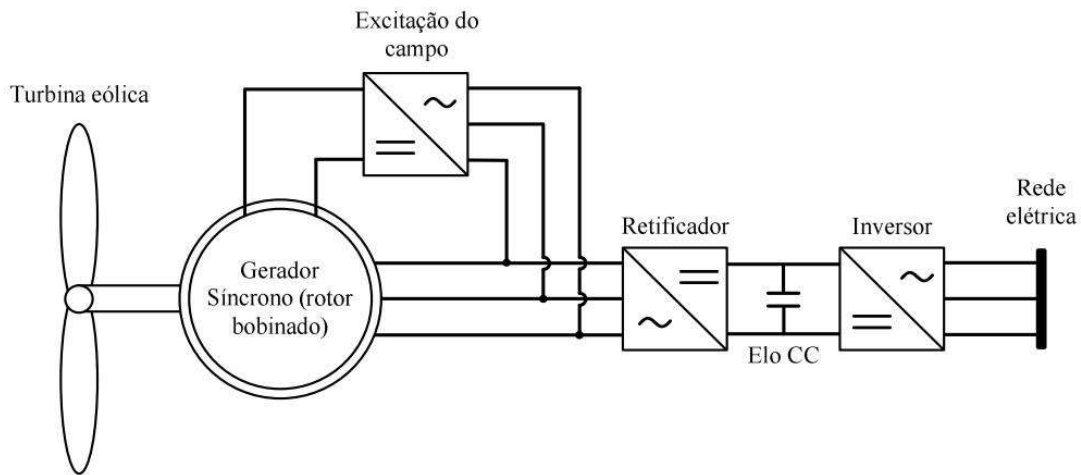


Figura 2.4 - Diagrama de um aerogerador síncrono de rotor bobinado.
 Fonte: ROCHA, 2014

ii. Gerador de rotor a imã permanente

O sistema com Gerador Síncrono de Imãs Permanentes (*Permanente Magnet Synchronous Generator – PMSG*), é conectado à rede com a utilização do conversor de frequência *back-to-back*. Essa topologia permite a operação em diversas velocidades, porém tem um custo mais elevado, pois utiliza imãs permanentes. A Figura 2.5 apresenta o diagrama elétrico do gerador síncrono de imãs permanentes (SILVEIRA, 2016). Tal topologia é empregada nos estudos deste trabalho.

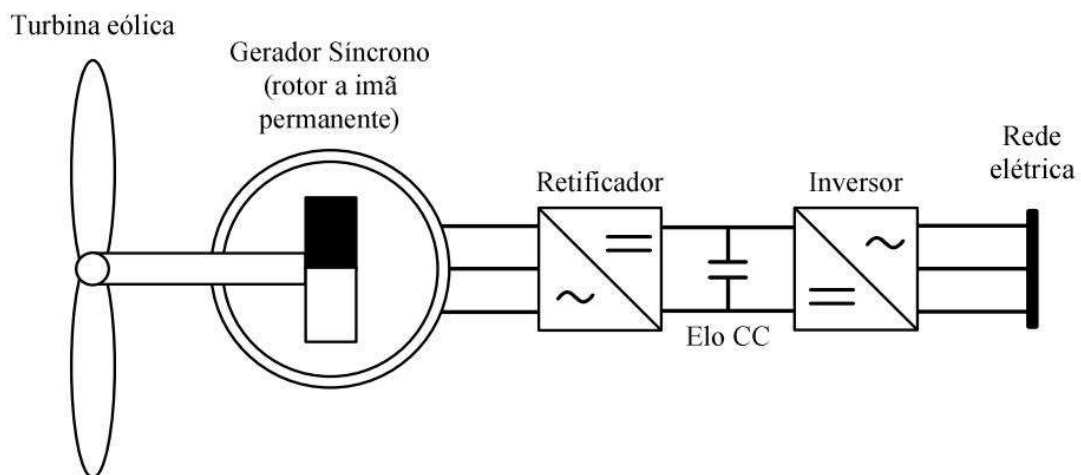


Figura 2.5 - Diagrama de um aerogerador síncrono de imãs permanentes.
 Fonte: ROCHA, 2014

2.3 – DISTORÇÕES HARMÔNICAS E INTER-HARMÔNICAS

Idealmente, o sinal das tensões e correntes elétricas distribuídas aos consumidores são senoidais, com frequência fundamental de 60 Hz ou 50 Hz (a depender do país). Porém, essa condição ideal não é encontrada em sistemas reais devido a diferentes distúrbios nas formas de ondas, como *flickers*, flutuações de tensão, variações na frequência elétrica e distorções harmônicas (COSTA, 2005).

As distorções harmônicas se caracterizam como sinais de tensão e/ou corrente cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental. Nesse contexto, ao se realizar a aquisição de um sinal, utiliza-se a transformada de Fourier para separar a componente fundamental e as respectivas componentes harmônicas. A Figura 2.6a apresenta a forma de onda fundamental, as harmônicas de 3ª e 5ª ordens são apresentadas em 2.6b e 2.6c, respectivamente, e, por fim, a Figura 2.6d exibe a soma das componentes harmônicas mencionadas com a componente fundamental (SILVEIRA, 2016).

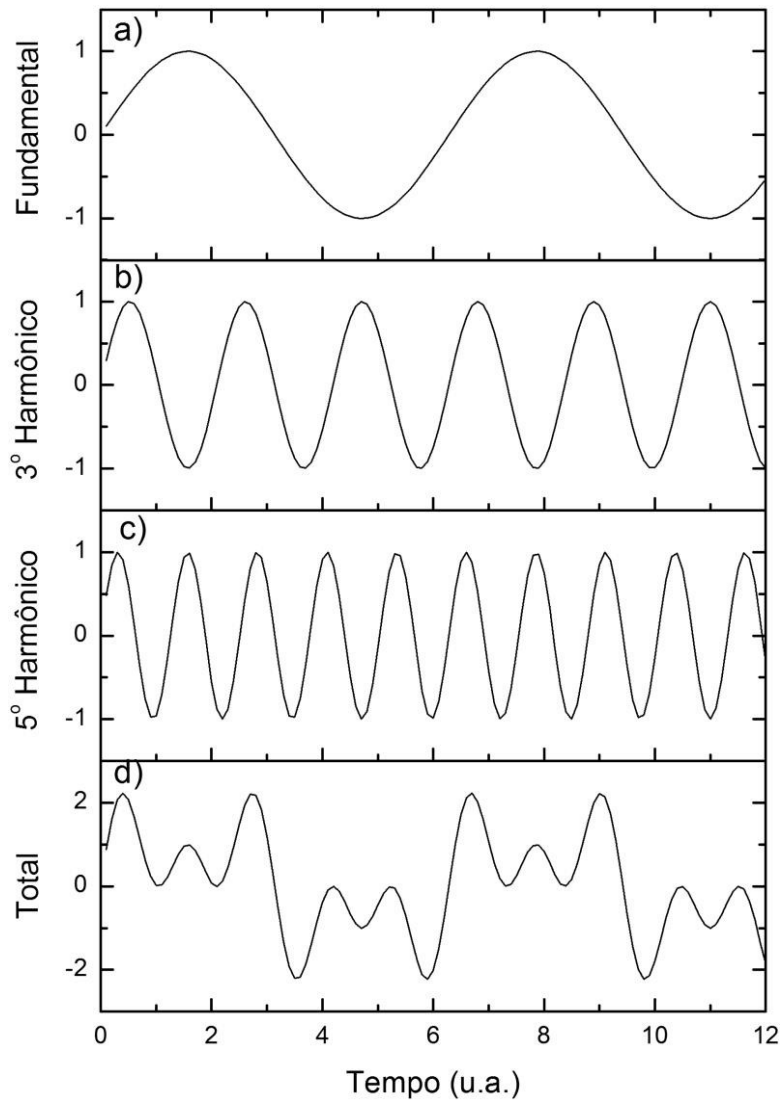


Figura 2.6 – Exemplo de distorção harmônica.
 Fonte: AZEVEDO et al., 2019.

As distorções harmônicas podem ser classificadas em Distorção Harmônica Individual (DHI) e em Distorção Harmônica Total (DHT). A DHI indica a amplitude de cada ordem harmônica, e a DHT estabelece um índice global das distorções harmônicas, sendo ambas relacionadas à frequência fundamental (SILVEIRA, 2016).

As equações (2.1) e (2.2) descrevem a DHT na tensão e na corrente, respectivamente. As equações (2.3) e (2.4) descrevem a DHI na tensão e corrente, respectivamente.

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 (\%) \quad (2.1)$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} I_h^2}}{I_1^2} \cdot 100 (\%) \quad (2.2)$$

$$DHI_V = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 (\%) \quad (2.3)$$

$$DHI_I = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100 (\%) \quad (2.4)$$

No qual V_h corresponde ao valor eficaz da tensão de ordem n , I_h ao valor eficaz da corrente de ordem n , V_1 ao valor eficaz da tensão fundamental, I_1 ao valor eficaz da corrente fundamental e h corresponde a ordem da componente harmônica.

Os componentes inter-harmônicos são múltiplos não inteiros da frequência fundamental, sendo assim se trata de todo o conteúdo espectral que não é harmônico. A Figura 2.7 apresenta o exemplo de uma forma de onda que contém componentes inter-harmônicos, podendo ser observado o comportamento aleatório provocado por este tipo de distorção (SILVEIRA, 2016).

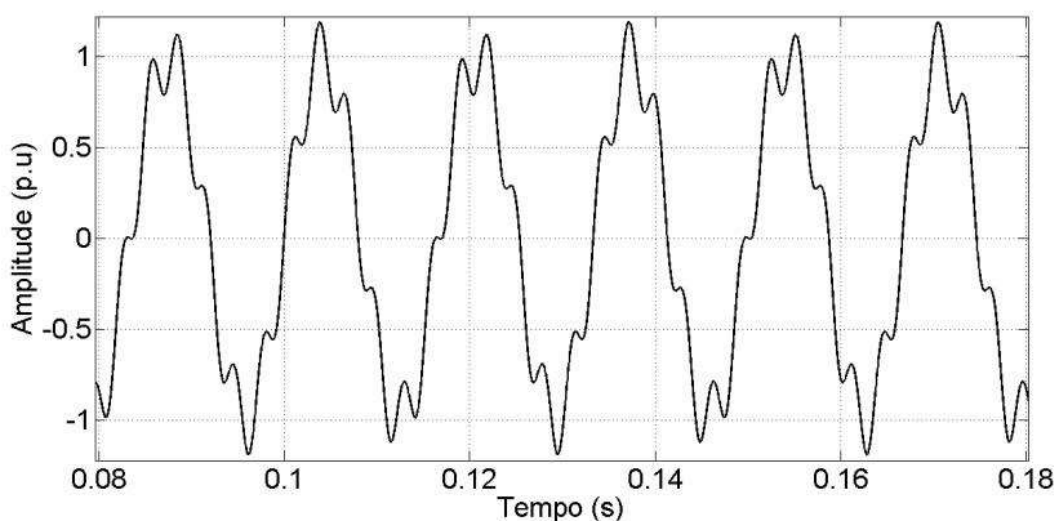


Figura 2.7 - Exemplo de distorção inter-harmônica.
Fonte: SILVEIRA, 2016

As distorções harmônicas e inter-harmônicas podem causar interferências nos sistemas de comunicação, diminuição da vida útil de equipamentos elétricos, oscilações mecânicas no funcionamento de máquinas elétricas, falha em dispositivos de proteção e mau funcionamento de equipamentos eletrônicos. Além disso, as inter-harmônicas podem ocasionar saturação de transformadores de corrente e *flickers* nas formas de onda (SILVEIRA, 2016).

A presença de cargas não lineares nos sistemas elétricos tem papel predominante na produção das distorções harmônicas e inter-harmônicas. Essas cargas têm como principal característica a não linearidade entre a tensão aplicada e a corrente demandada. Alguns exemplos de cargas não lineares são: reguladores de tensão, conversores que empregam dispositivos semicondutores, fornos a arco, *soft starter*. Dentre os equipamentos citados que provocam distorções nas formas de onda, os conversores de potência são amplamente discutidos na literatura, sendo empregados na integração das diversas fontes renováveis de energia (SILVEIRA, 2016).

2.4 – FATORES DE INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

A integração de sistemas de geração eólica à rede elétrica deve seguir padrões de qualidade de energia, estipulados por códigos de rede publicados em diferentes países. Nesse sentido, torna-se relevante a investigação das correntes harmônicas que são emitidas por aerogeradores, possibilitando a mitigação de impactos na qualidade da tensão do sistema elétrico.

A tensão/corrente de saída da unidade inversora de uma turbina eólica é um fator determinante no fluxo harmônico do sistema, outro fator importante são as características do ponto de acoplamento entre a turbina e a rede elétrica. Com base na topologia gerador síncrono a ímãs permanentes adotada neste trabalho, é possível identificar os principais fatores de influência na geração de distorções harmônicas.

2.4.1 – Funcionamento do conversor

O conversor é um dispositivo não-linear composto de três partes principais: o retificador, o barramento CC e o inversor. O gerador fornece uma tensão de saída alternada e frequência variável, o retificador realiza a transformação dessa tensão alternada em tensão contínua no barramento CC, e a tensão contínua no barramento é então convertida novamente pelo inversor em uma tensão alternada para a conexão com a rede (SILVEIRA, 2016).

O modelo investigado neste trabalho trata-se do conversor *back-to-back*. Esse tipo de conversor é composto por um retificador controlado, um inversor e o barramento CC entre ambos. O retificador frequentemente tem como função controlar o ponto de máxima potência fornecido pelo gerador. Já o inversor controla a tensão fornecida à rede, o fator de potência do sistema de geração e a tensão no barramento CC. Cabe ressaltar que esse tipo de conversor permite o fluxo bidirecional de potência entre o gerador e a rede (SILVEIRA, 2016). A Figura 2.8 apresenta o diagrama elétrico de um conversor *back-to-back*.

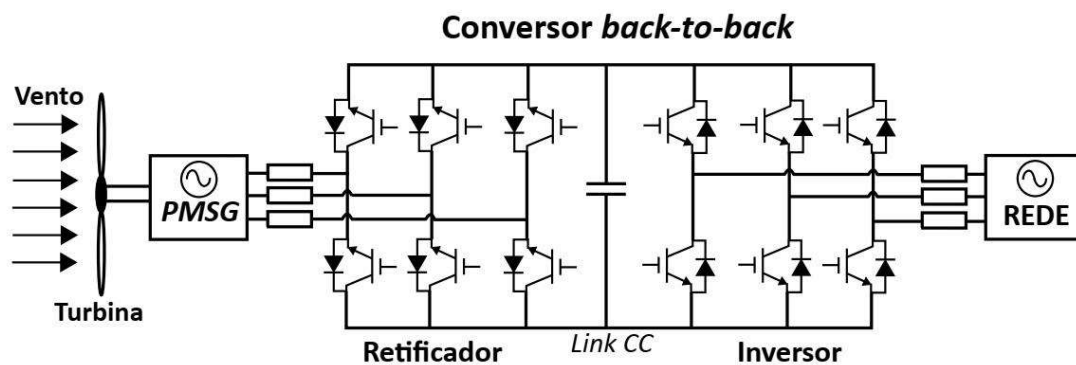


Figura 2.8 - Diagrama do esquema de um conversor back-to-back.
 Fonte: SILVEIRA, 2016

2.4.2 – Distorções harmônicas inerentes ao chaveamento PWM

O inversor funciona por meio do processo de comutação de chaves em alta frequência. Para realizar o processo de excitação de chaves é utilizada a técnica de modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation – PWM*). A PWM realiza uma comparação entre uma onda moduladora e uma onda portadora, sendo a técnica mais utilizada aquela que emprega como moduladora a onda senoidal (*SPWM*). A SPWM compara senóides com uma onda portadora triangular que estabelece a frequência de chaveamento do conversor *back-to-back* (SILVEIRA, 2016).

Existem dois fatores principais associados a produção de distorções harmônicas durante o processo de chaveamento: o índice de modulação de frequência (m_f) e índice de modulação de amplitude (m_a). Tais índices são definidos pelas equações (2.5) e (2.6), respectivamente (MOURA, 2017).

$$m_f = \frac{f_p}{f_m} \quad (2.5)$$

$$m_a = \frac{V_m}{V_p} \quad (2.6)$$

No qual f_p é a frequência da portadora, f_m é a frequência das moduladoras, V_m é a amplitude da onda moduladora e V_p é a amplitude da onda portadora.

O índice m_f está relacionado ao conteúdo harmônico de alta frequência presente na tensão de saída do inversor. O índice m_a está relacionado a amplitude da tensão de saída do inversor em frequência fundamental (MOURA, 2017). O índice de modulação de amplitude impacta sobre a tensão terminal, como pode ser observado na Figura 2.9, no qual são evidenciadas três regiões de operação.

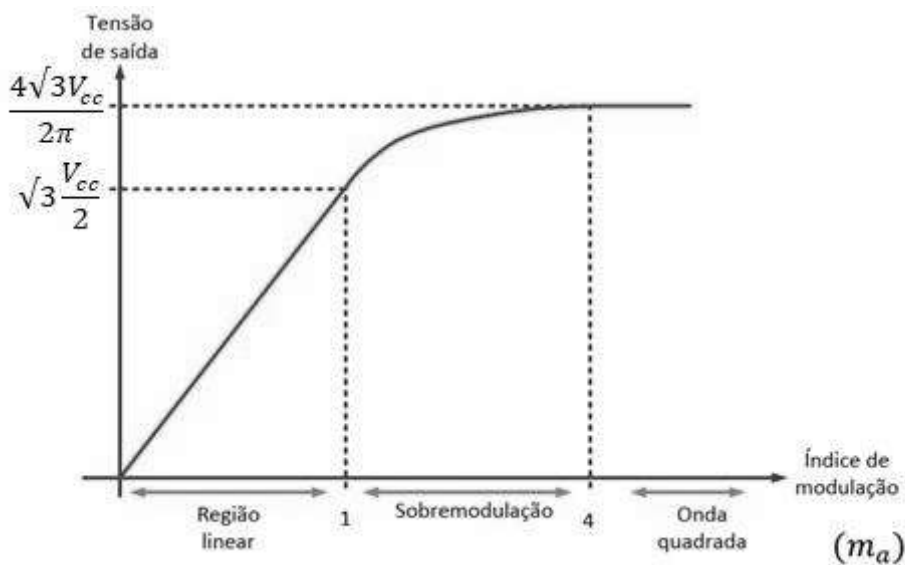


Figura 2.9 - Regiões de operação do conversor de potência.
Fonte: REIS, 2015.

Conforme pode ser observado na Figura 2.9, na região linear a tensão de saída do inversor sofre variações lineares com o índice de modulação de amplitude. O conteúdo harmônico nessa região possui uma componente fundamental dominante seguida de um conjunto de tensões harmônicas próximas da frequência de chaveamento. Já na região de sobremodulação a tensão de saída do inversor e o índice de modulação de amplitude estão relacionados de forma não linear. Nessa região de operação são produzidas componentes

harmônicas de baixa frequência nas tensões de saída do inversor. Por fim, na região de operação com onda quadrada a tensão de saída atinge seu pico, a variação do índice de modulação de amplitude não causa influência na tensão dos terminais do inversor. Dentre as harmônicas produzidas pelo inversor, destacam-se as ordens ímpares não múltiplas de 3 até a 13ª ordem, além das ordens com frequências maiores vizinhas da frequência de chaveamento (ROCHA, 2014).

2.4.3 – Distorções harmônicas inerentes ao tempo morto

O processo de chaveamento do conversor é realizado utilizando a técnica de tempo morto (T_m), que consiste em atrasos programados entre os pulsos de acionamento (MOURA, 2017). Essa técnica é empregada de modo a evitar a superposição de duas chaves de um mesmo braço, evitando assim um possível curto-circuito no barramento CC (SILVEIRA, 2016). Esse mecanismo está indicado na Figura 2.10.

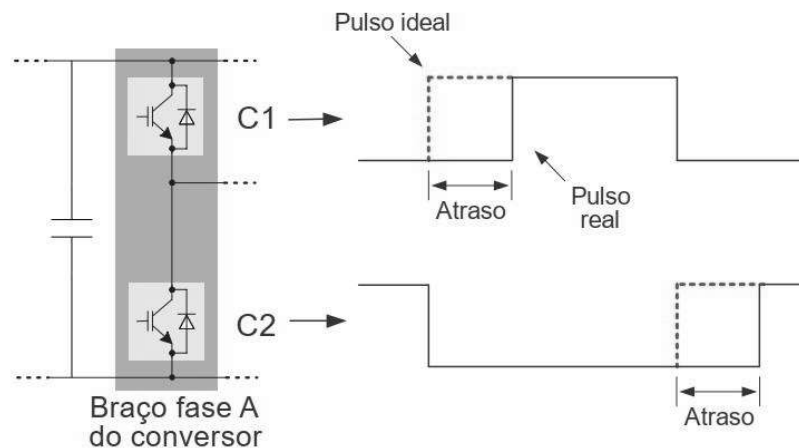


Figura 2.10 - Pulsos de acionamento considerando o tempo morto.
Fonte: MOURA, 2017

O emprego dessa estratégia garante a operação segura do conversor, porém, esse atraso causa impactos na forma de onda de tensão de saída do conversor. As distorções harmônicas inerentes ao tempo morto podem ser representadas simplificada pela sobreposição de uma onda quadrada defasada da tensão fundamental. Essa onda se encontra defasada em 180° da corrente que circula no sistema e possui uma amplitude dV , como descrito na equação (2.7)(2.7).

$$dV = MTmFV_{cc} \quad (2.7)$$

No qual M é o número de chaveamentos em um ciclo, T_m é o tempo morto, F é a frequência da fundamental e V_{cc} é a tensão no barramento CC.

A adoção de atrasos prolongados pode forçar o conversor a trabalhar na região de sobremodulação, o que pode intensificar a geração de distorções harmônicas (MOURA, 2017). A Figura 2.11 apresenta os efeitos do tempo morto sobre a tensão do inversor, provocando uma onda distorcida resultante nos terminais de saída.

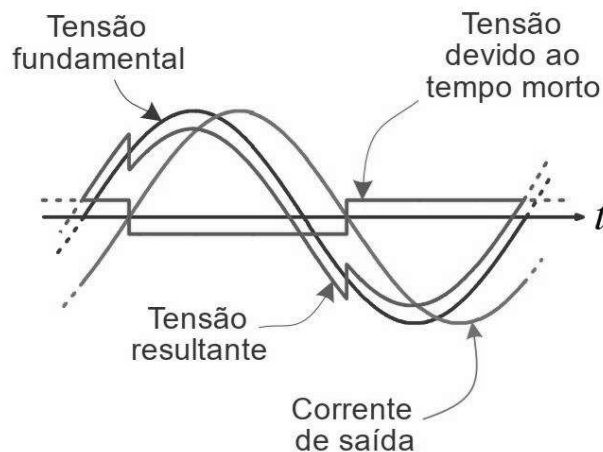


Figura 2.11 - Impacto do tempo morto das chaves na tensão/corrente de saída do inversor.

Fonte: MOURA, 2017.

2.4.4 – Distorções harmônicas inerentes à conexão com a rede

Para realizar a conexão com a rede, faz-se necessário o processo de sincronização que detecta a frequência e o ângulo de fase da tensão existente no ponto de acoplamento. Essas variáveis devem ser monitoradas continuamente e de forma precisa, pois não se tratam de grandezas contínuas (MOURA, 2017). Para realizar esse sincronismo em tempo real, os métodos *Phase-Locked Loop* (PLL) ou *Frequency-Locked Loop* (FLL) são empregados (SILVEIRA, 2016).

Distorções harmônicas de tensão pré-existent nos pontos de conexão afetam diretamente a operação dos métodos de sincronismo, o que influencia os níveis de emissões harmônicas dos conversores (MOURA, 2017). Isso ocorre porque as tensões e correntes medidas pelos sensores são também enviadas às malhas de controle do conversor. Consequentemente, a presença de distorções harmônicas e inter-harmônicas

nessas medições provocam distúrbios nas respostas das malhas de controle, afetando a qualidade de energia da turbina eólica (SILVEIRA, 2016).

2.5 – MODELOS DE SIMULAÇÃO

O desenvolvimento e validação de modelos computacionais para simular a conexão de fontes de energia renováveis, especialmente no que se refere a distorções da forma de onda, permitem a caracterização prévia do funcionamento do sistema, dessa forma, caso necessário, é possível projetar ações preventivas para que a operação seja realizada dentro dos limites adequados.

Existem modelos detalhados (DM) e modelos simplificados (SM) de aerogeradores para o estudo de transitórios eletromagnéticos. O modelo detalhado gera resultados mais próximos ao comportamento físico do sistema, porém, ele demanda um elevado número de variáveis e equações que exigem grande esforço computacional, o que torna complexo executar esse tipo de modelo para grandes usinas.

2.5.1 – Modelo detalhado

Na Figura 2.12 observa-se os principais elementos do DM, no caso desse estudo a geração primária trata-se de uma turbina eólica tipo IV. Esse tipo de turbina é composto por um gerador síncrono de rotor bobinado (WRSG – do inglês *wounded rotor synchronous generator*) ou um gerador síncrono com ímãs permanentes (PMSG – do inglês *permanent magnet synchronous generator*). A integração a rede é realizada por meio de um inversor trifásico a dois níveis e um filtro LC.

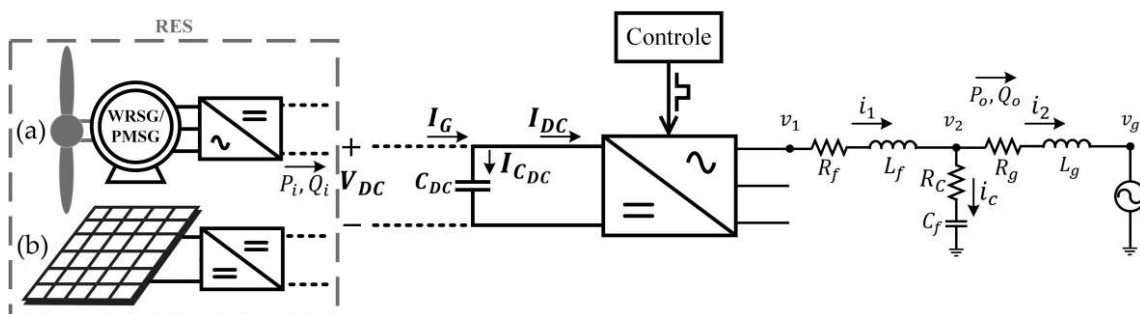


Figura 2.12 - Diagrama do modelo detalhado com a geração de uma (a) turbina eólica do tipo IV ou de um (b) módulo fotovoltaico.

No qual P_i é a potência ativa de entrada e Q_i a reativa; V_{DC} , I_G , $I_{C_{DC}}$ e I_{DC} são a tensão no barramento CC, a corrente gerada pela fonte primária, a corrente sobre o barramento CC e a corrente de entrada do inversor, respectivamente; C_{DC} é a capacitância total do barramento CC. No lado da conexão com a rede, R_f , L_f e C_f são a resistência, indutância e capacitância do filtro, respectivamente; R_c é a resistência de amortecimento; R_g e L_g são a resistência e indutância da rede; v_1 , v_2 e v_g são as tensões antes do filtro, depois do filtro e no PoC, respectivamente; i_1 , i_c e i_2 são as correntes antes do filtro, sobre o capacitor do filtro e depois do filtro; e P_o e Q_o são as potências ativa e reativa de saída, respectivamente. Neste estudo o fator de potência é considerado unitário. Logo, $Q_i = Q_o = 0$.

Existem diferentes estruturas de controle para o DM, neste trabalho é estudado o modelo com malha externa para controle da tensão no barramento CC (V_{DC}), esse sistema é o mais fiel para representar fenômenos relacionados a inversores do tipo fonte de tensão, sendo o mais adequado para representar emissões harmônicas. A Figura 2.13 apresenta o modelo PWM com controle V_{DC} .

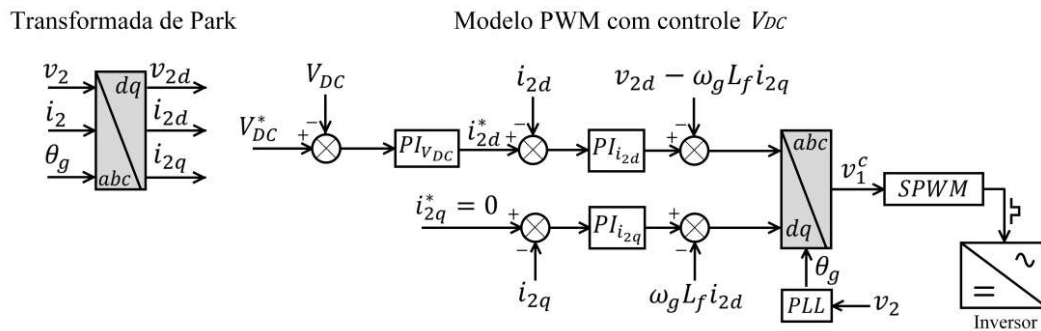


Figura 2.13 - Diagrama de blocos do modelo PWM com controle V_{DC} .

No qual $v_{2a,b,c}$ e $i_{2a,b,c}$ (a , b e c representando as fases) são as tensões e as correntes depois do filtro LC, respectivamente; $v_{2d,q}$ e $i_{2d,q}$ são as tensões e correntes referidas no domínio dq (eixo direto e em quadratura); θ_g e ω_g são o ângulo de fase e a frequência angular da rede; e $v_{1a,b,c}^c$ são as tensões de referência do SPWM.

Para implementar o DM é necessário um elevado número de equações que compreendam as diversas variáveis envolvidas. Além das variáveis já citadas, o modelo ainda deve levar em consideração variáveis relacionadas ao controle do inversor, a sincronização com a

rede elétrica e a estratégia de chaveamento. Sendo assim explicada a complexidade desse tipo de modelagem.

2.5.2 – Modelo simplificado

O modelo simplificado (SM) proposto trata-se de um modelo no domínio do tempo, com o objetivo de estimar o conteúdo harmônico levando em consideração os efeitos do tempo morto e do chaveamento. A implementação desse tipo de simulação busca a obtenção de resultados precisos em um sistema mais simples, e, conseqüentemente, com baixo tempo de simulação.

A Figura 2.14 apresenta o diagrama do modelo simplificado, a fonte de energia, nesse caso a turbina eólica, é substituída por uma fonte de corrente controlada, e, o inversor é substituído por um sistema que inclui os efeitos do chaveamento e do tempo morto. Nesse modelo as tensões de referência $v_{1a,b,c}^c$ são fornecidas pela estratégia de controle (modelo PWM com controle V_{DC}).

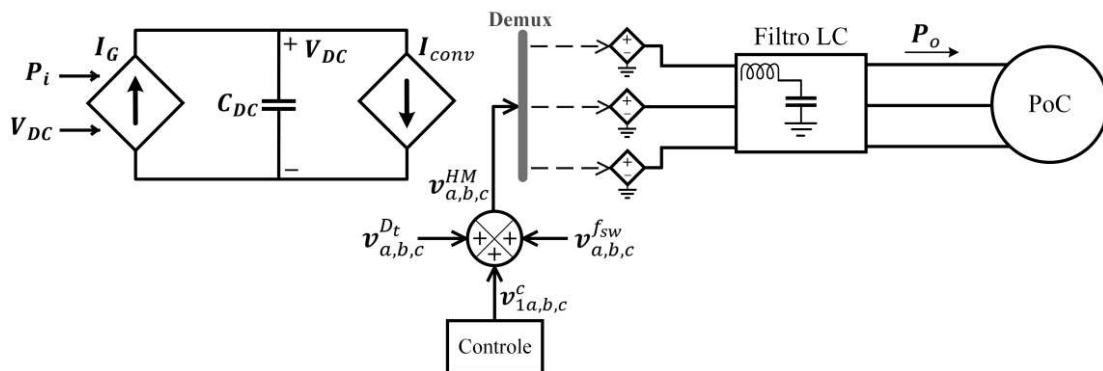


Figura 2.14 - Diagrama do modelo simplificado.

onde v_a^{fsw} , v_b^{fsw} e v_c^{fsw} são as tensões trifásicas que representam o efeito do chaveamento PWM e v_a^{Dt} , v_b^{Dt} e v_c^{Dt} são as tensões relacionadas ao tempo morto (D_t – do inglês *dead time*).

Para o cálculo da fonte de corrente I_G , a lei das correntes de Kirchhoff é aplicada no barramento CC da Figura 2.12, como demonstrado em (2.8).

$$I_G = I_{C_{DC}} + I_{DC} = C_{DC} \frac{dV_{DC}}{dt} + I_{DC} \quad (2.8)$$

O controle V_{DC} ajusta a tensão em torno de um valor constante de referência, sendo assim, o termo $\frac{dV_{DC}}{dt}$ é igual a zero. Logo, a corrente I_G é igual a I_{DC} . Ou seja, com o controle de V_{DC} , a potência total gerada P_i flui do inversor para a rede. Essa relação pode ser descrita conforme (2.9).

$$P_i = V_{DC} I_{DC} \quad (2.9)$$

A partir das equações (2.8) e (2.9), e considerando $I_G = I_{DC}$ é obtida a equação da fonte de corrente, descrita em (2.10). Sendo assim, observa-se que a fonte I_G depende apenas da potência gerada e da tensão no barramento CC.

$$I_G = \frac{P_i}{V_{DC}} \quad (2.10)$$

Na Figura 2.14 observa-se que, no primeiro estágio, é incluída uma outra fonte de corrente controlada (I_{conv}) em paralelo com o barramento CC. O acoplamento entre os lados DC e AC do modelo é possibilitado por essa fonte, o que significa que ela absorve potência de I_G e, ao mesmo tempo, é controlada pela potência ativa que é injetada no PoC. A fonte I_{conv} é modelada conforme descrito em (2.11).

$$I_{conv} = \frac{P_o}{V_{DC}} \quad (2.11)$$

No segundo estágio o inversor é substituído por três fontes controladas de tensão. Essas fontes operam na frequência fundamental e dependem da modulação do controle. As funções que descrevem os valores instantâneos das fontes são definidas em (2.12).

$$\begin{bmatrix} v_{1a}^c \\ v_{1b}^c \\ v_{1c}^c \end{bmatrix} = M \frac{V_{DC}}{2} \begin{bmatrix} \cos(\omega_g \cdot t) \\ \cos\left(\omega_g \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega_g \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

No qual v_{1a}^c , v_{1b}^c e v_{1c}^c são as tensões instantâneas proporcionadas pelo controle.

Utilizando o princípio da superposição são incorporadas as tensões $v_{a,b,c}^{f_{sw}}$ e $v_{a,b,c}^{D_t}$ à tensão

$v_{1a,b,c}^c$ de forma a obter a tensão $v_{a,b,c}^{HM}$ como observado na Figura 2.14.

O SM, ou *Harmonic Model* (HM), é obtido por meio de simplificações nos lados da geração e do conversor do lado da rede, esse modelo ainda utiliza o princípio da superposição para incorporar as dinâmicas do chaveamento, do tempo morto e das distorções pré existentes no ponto de conexão à tensão fundamental. Dessa forma, o número de variáveis e equações envolvidas na modelagem é consideravelmente reduzido em comparação ao DM.

2.6 – REGULAMENTAÇÃO BRASILEIRA PARA A CONEXÃO ENTRE PARQUES EÓLICOS E A REDE ELÉTRICA

A conexão de parques eólicos à rede elétrica está condicionada a parâmetros de operação e qualidade da energia estabelecidos em normas. No Brasil, o ONS define, por meio dos Procedimentos de Rede do Sistema de Transmissão, a regulamentação técnica para a conexão de parques eólicos em tensões superiores a 69 kV, bem como os indicadores de desempenho referentes à qualidade de energia elétrica. Os requisitos referentes às distorções harmônicas estão definidos em alguns módulos dos Procedimentos de Redes.

2.6.1 – Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes

Este submódulo faz parte do “Módulo 2 - Requisitos mínimos para instalações e gerenciamento de indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes”, onde estão apresentados os indicadores de desempenho da rede e dos barramentos dos transformadores de fronteira no que tange a qualidade de energia elétrica, além disso, estão apresentados os valores limites de referência para os distúrbios que afetam a qualidade de energia. São definidos nesse módulo indicadores de desempenho, sendo que a distorção de tensão harmônica se enquadra entre os indicadores de tensão.

Os limites de DHT_v , descrita na equação (2.1), e os limites individuais de tensões harmônicas de ordens de 2 a 50 estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Limites de tensões harmônicas em porcentagem da tensão fundamental.

13,8 kV ≤ V ≤ 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3 a 25	1,5 %			3 a 25	0,6 %		
		todos	0,6 %			Todos	0,3 %
≥ 27	0,7 %			≥ 27	0,4 %		
DHTvS95% = 3%				DHTvS95% = 1,5%			

2.6.2 – Submódulo 3.3 – Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão

Este submódulo faz parte do “Módulo 3 - Acesso às instalações de transmissão”, nele são definidos os requisitos técnicos necessários para a conexão das unidades geradoras à rede básica, aos barramentos dos transformadores de fronteira e às instalações de transmissão. Os requisitos técnicos que fazem referência aos harmônicos estão dispostos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Requisitos técnicos referentes a harmônicos para a conexão à rede.

Descrição	Requisito técnico mínimo
Distorção harmônica	O acessante deve assegurar que a operação de seus equipamentos, bem como outros efeitos em suas instalações, não causem distorções harmônicas no ponto de conexão à rede básica ou ao barramento de transformador de fronteira em níveis superiores aos limites individuais estabelecidos para os indicadores de distorção de tensão harmônica individual e total definidos no Submódulo 2.8.

2.6.3 – Nota Técnica ONS NT 09/2016 – “Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos novos acessos à rede básica para parques eólicos, solares e consumidores livres”

Nessa NT são apresentados aos futuros agentes de geração acessantes da rede elétrica ou atuais acessantes que buscam ampliações ou novos pontos de conexão, informações para suporte no que diz respeito à realização de estudos e campanhas de medição para avaliar o impacto de novas condições de conexão à rede básica quanto aos indicadores de conformidade de tensão, entre eles distorções harmônicas (ONS, 2016).

São explorados aspectos referentes aos efeitos de distorções harmônicas, e referentes à realização de campanhas de medição para que sejam obtidos dados que tornem possível a determinação dos valores dos indicadores correspondentes à distorção harmônica (ONS, 2016).

Além disso, são explorados aspectos relacionados à nova condição operacional da rede elétrica em função da conexão de instalações onde operam equipamentos não lineares, nessas instalações estão incluídos os parques eólicos. O Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede do Sistema de Transmissão apresenta orientações quanto à realização de estudos elétricos, porém, a NT 09/2016 tem como objetivo detalhar e complementar essas orientações, para que haja um melhor nivelamento no que tange as premissas dos estudos de qualidade de energia elétrica sobre os efeitos de distorções harmônicas.

3. METODOLOGIA

A análise de desempenho do modelo simplificado para estimação de correntes harmônicas e interharmônicas em unidades eólicas se baseia na comparação dos resultados de simulação com dados advindos de medições em instalações reais. Nesse contexto, esta seção apresenta aspectos da metodologia empregada para realização de tal tarefa.

3.1 – DESCRIÇÃO DO PARQUE EÓLICO

É analisado um complexo eólico localizado na região nordeste do Brasil. O complexo é subdividido em oito parques eólicos, com um total de 95 aerogeradores, do tipo IV, com conversor pleno, de potência nominal de 2,35 MW cada, totalizando uma potência instalada de 223,25 MW.

Uma rede de média tensão, em 34,5 kV, transporta toda a energia produzida a partir dos aerogeradores para a subestação coletora. Esta rede é composta pelos circuitos (nomeados de forma hipotética) a seguir:

→ Parque eólico 1

- Circuito 01 com 6 aerogeradores, totalizando uma potência de 14,1 MW
- Circuito 02 com 6 aerogeradores, totalizando uma potência de 14,1 MW

→ Parque eólico 2

- Circuito 01 com 6 aerogeradores, totalizando uma potência de 14,1 MW
- Circuito 02 com 5 aerogeradores, totalizando uma potência de 11,75 MW

→ Parque eólico 3

- Circuito 01 com 6 aerogeradores, totalizando uma potência de 14,1 MW
- Circuito 02 com 6 aerogeradores, totalizando uma potência de 14,1 MW

→ Parque eólico 4

- Circuito 01 com 6 aerogeradores, totalizando uma potência de 14,1 MW

- Circuito 02 com 6 aerogeradores, totalizando uma potência de 14,1 MW

→ Parque eólico 5

- Circuito 01 com 6 aerogeradores, totalizando uma potência de 14,1 MW

- Circuito 02 com 6 aerogeradores, totalizando uma potência de 14,1 MW

→ Parque eólico 6

- Circuito 01 com 7 aerogeradores, totalizando uma potência de 16,45 MW

- Circuito 02 com 5 aerogeradores, totalizando uma potência de 11,75 MW

→ Parque eólico 7

- Circuito 01 com 7 aerogeradores, totalizando uma potência de 16,45 MW

- Circuito 02 com 5 aerogeradores, totalizando uma potência de 11,75 MW

→ Parque eólico 8

- Circuito 01 com 6 aerogeradores, totalizando uma potência de 14,1 MW

- Circuito 02 com 6 aerogeradores, totalizando uma potência de 14,1 MW

Os parques se conectam por meio de uma linha compartilhada à uma subestação, que eleva a tensão de 34,5 kV dos circuitos coletores de cada parque a 230 kV, conforme a Figura 3.1.

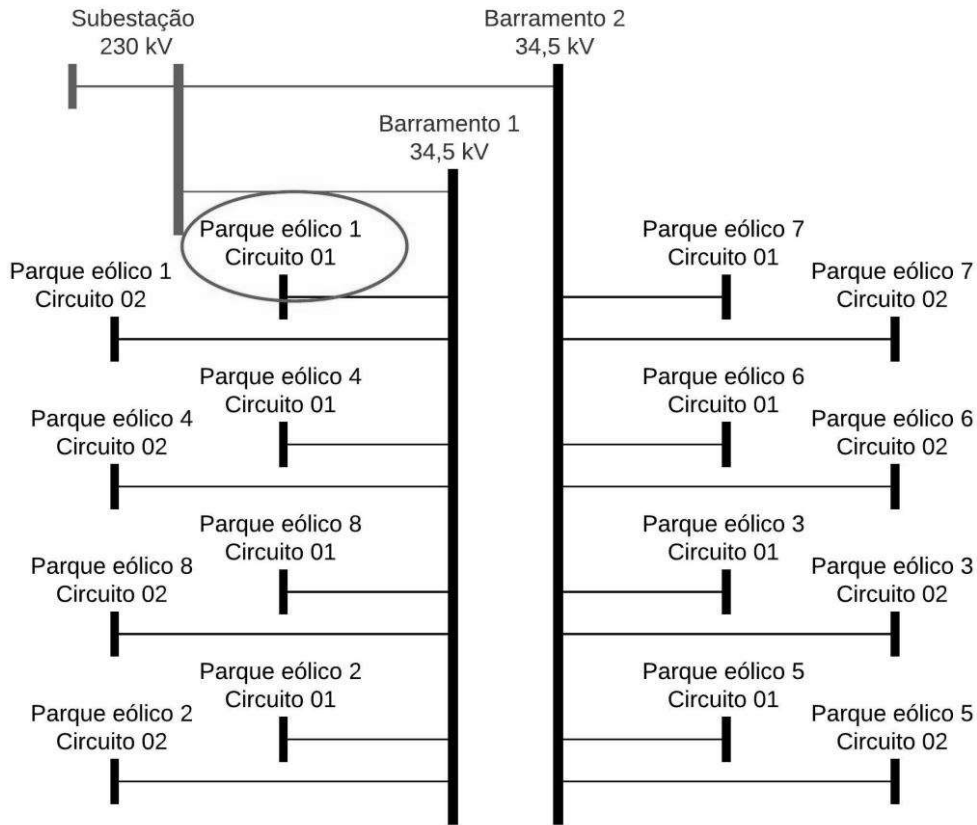


Figura 3.1 – Diagrama unifilar da conexão do complexo eólico ao SIN.

O estudo de caso se baseia em medições realizadas no ramal Circuito 01, do Parque Eólico 1, destacado na Figura 3.1. Como especificado anteriormente, o parque é composto pelos circuitos 01 e 02, que contém seis aerogeradores cada. A Figura 3.2 apresenta o diagrama unifilar do circuito 01, sendo possível observar os seis aerogeradores que o compõe.

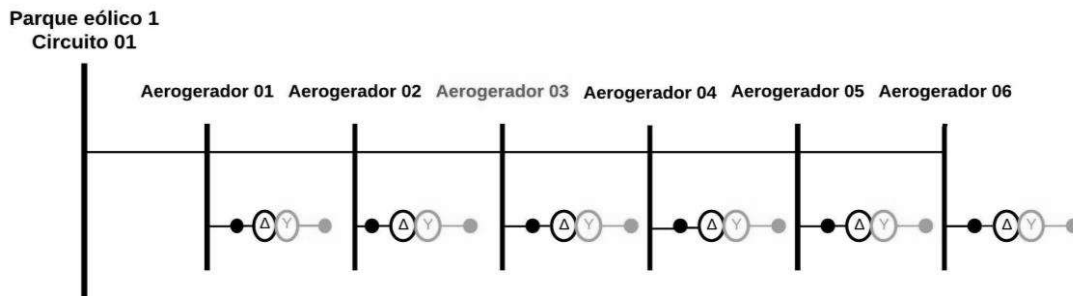


Figura 3.2 – Diagrama unifilar do Circuito 01 do Parque Eólico 1.

A comparação entre os resultados do modelo simplificado e as medições reais será realizada para uma turbina. O aerogerador selecionado é o Aerogerador 03, em destaque

na Figura 3.2.

3.2 – DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS EMPREGADOS NO MODELO

Para implementar a simulação do complexo eólico, utilizando o modelo simplificado, foram utilizados os dados reais da instalação, os dados foram obtidos com base no esquema descrito na Figura 3.3. Os parâmetros para simulação de cada bloco do esquema estão descritos na Figura 3.4.

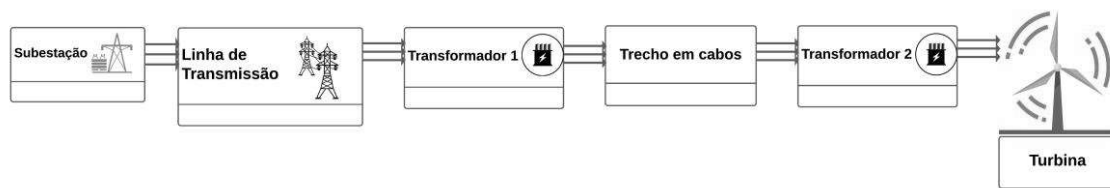


Figura 3.3 – Esquema do complexo eólico para simulação.

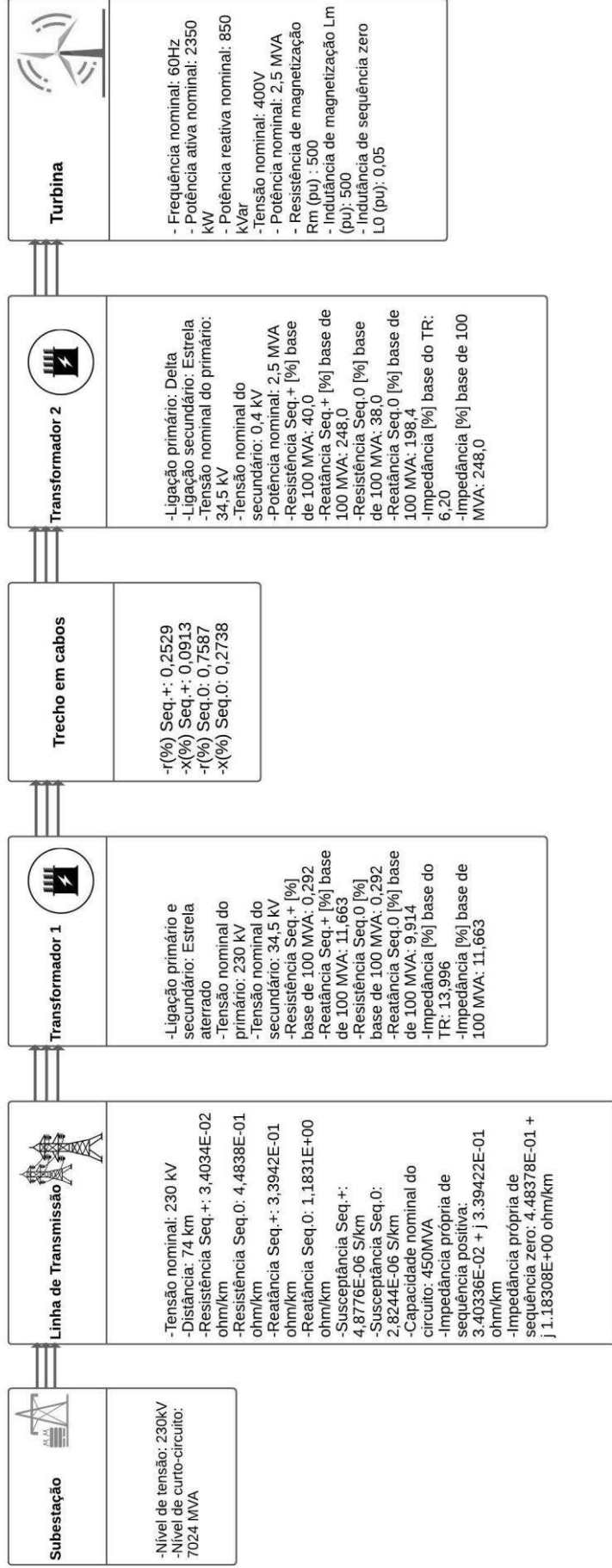


Figura 3.4 – Parâmetros do complexo eólico utilizados para simulação.

3.3 – SIMULAÇÃO EM MODELO SIMPLIFICADO

Foi implementado no software MATLAB o modelo de simulação simplificado, descrito na Figura 2.14, utilizando os parâmetros do complexo eólico em análise, para uma turbina específica, conforme descrito na Figura 3.4.

A simulação foi realizada por meio do aplicativo SIMULINK, do software MATLAB. Além dos parâmetros da instalação real, foram inseridos no modelo os efeitos relacionados ao chaveamento PWM, ao tempo morto e as distorções pré-existentes no ponto de conexão. A Figura 3.5 apresenta a visão geral do modelo simplificado implementado no SIMULINK. A Figura 3.6 apresenta o circuito elétrico equivalente da turbina, onde podem ser observadas as fontes de tensão e corrente, a Figura 3.7 apresenta a unidade de processamento e controle, ambos estão inseridos na caixa da turbina, em destaque na Figura 3.5.

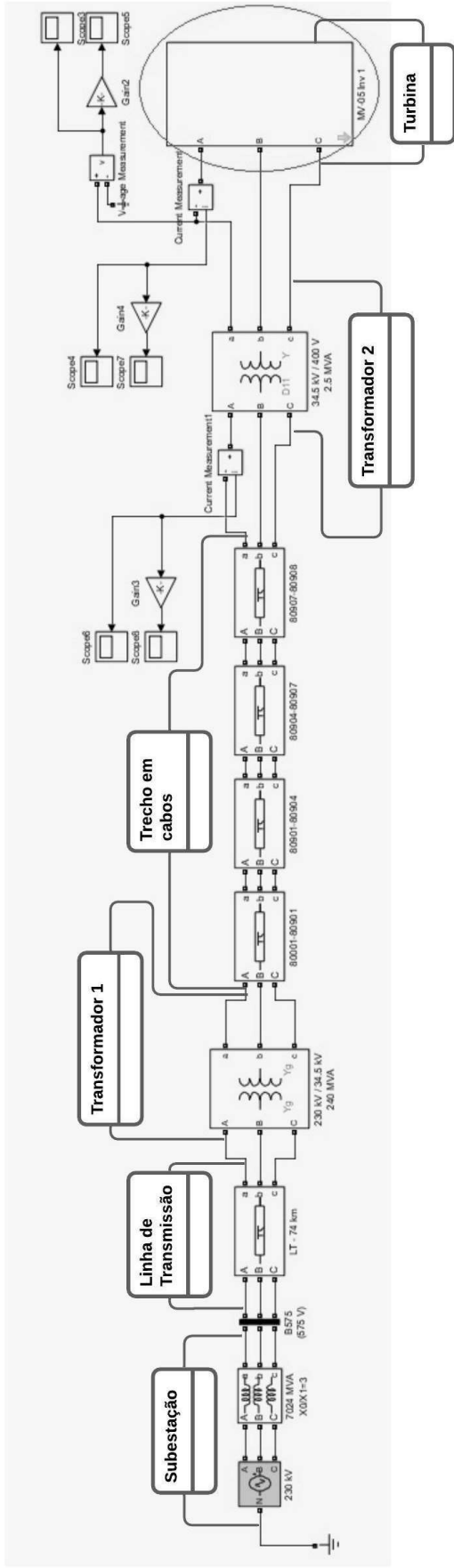


Figura 3.5 – Visão geral do modelo simplificado no SIMULINK.

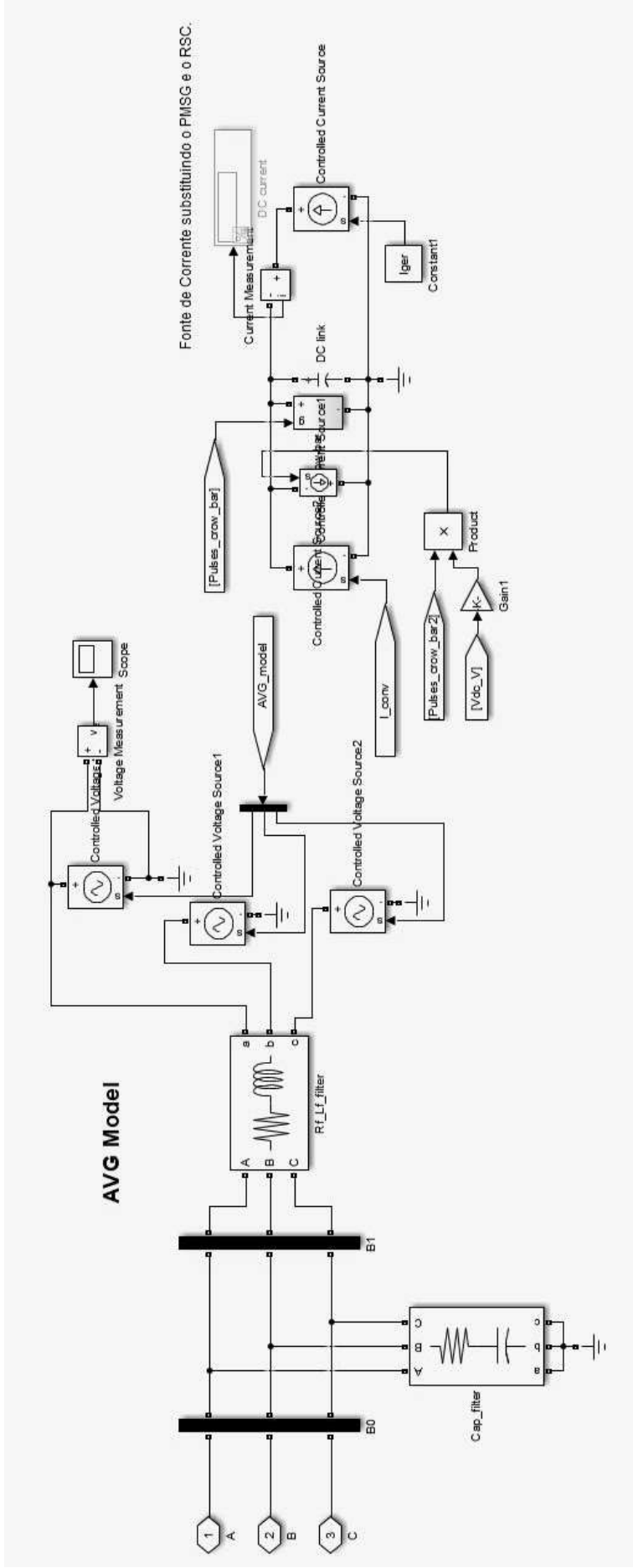
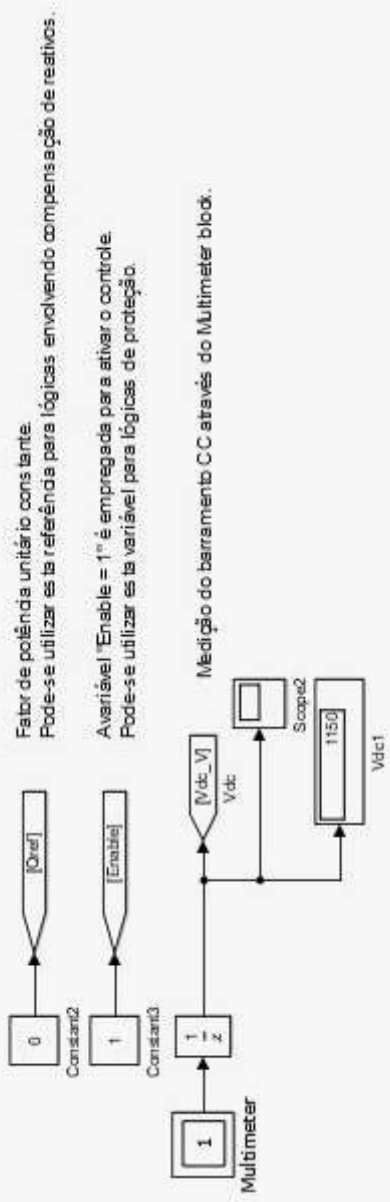
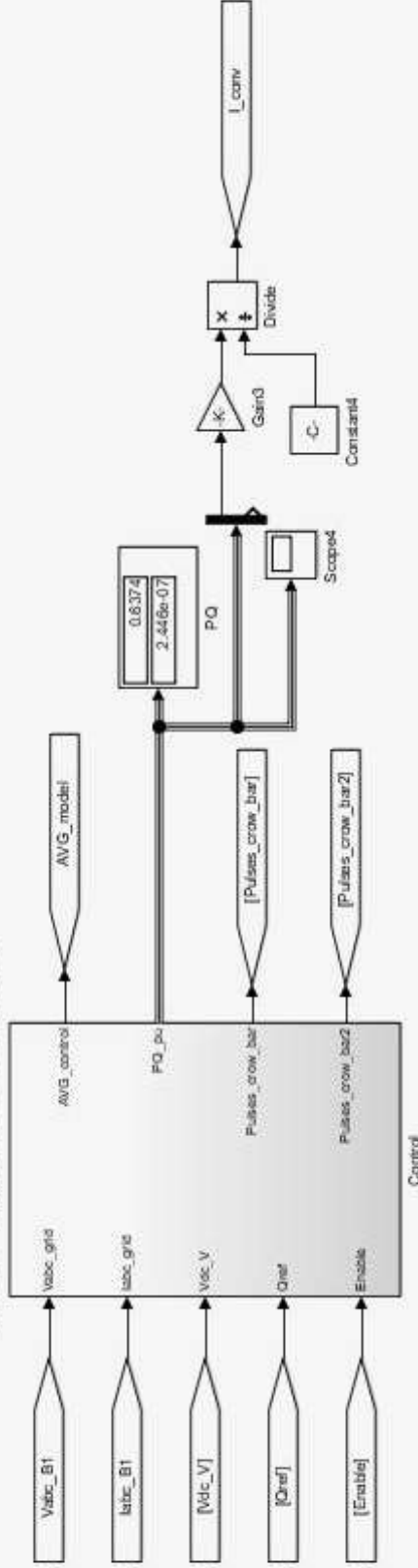


Figura 3.6 – Circuito equivalente da turbina no modelo simplificado no SIMULINK.

Processing and Control Unit



Fator de potência unitário constante.
 Pode-se utilizar a referência para lógicas envolvendo compensação de reativos.

Avariável Enable = 1^o é empregada para ativar o controle.
 Pode-se utilizar a variável para lógicas de proteção.

Medição do barramento CC através do Multimeter block.

Figura 3.7 – Unidade de processamento e controle no modelo simplificado no SIMULINK.

3.4 – MÉTRICAS DE COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

É comum que os resultados de cálculos e simulações não correspondam exatamente ao resultado real. Ainda que todo o processo tenha sido realizado de maneira correta, os resultados de uma simulação dependem de outros fatores como a precisão dos dados de entrada, a forma de representação desses dados no computador e das operações numéricas realizadas. Para quantificar os erros derivados da solução computacional são definidas medidas de erro. As medidas de erro mais utilizadas são o erro absoluto e o erro relativo (RUGGIERO; LOPES, 2000).

O erro absoluto (EA) é a diferença entre o valor exato de um número x e seu valor aproximado \bar{x} , conforme descrito na equação (3.1).

$$EA_x = |x - \bar{x}| \quad (3.1)$$

Geralmente o valor de x é desconhecido, o que impossibilita a obtenção exata do valor do erro absoluto. Em casos assim pode ser utilizado um limitante superior ou uma estimativa para o módulo do erro absoluto (RUGGIERO; LOPES, 2000).

O erro absoluto não leva em consideração a grandeza dos números em questão, sendo assim, dependendo da ordem de grandeza dos números envolvidos o erro absoluto pode ser insuficiente para avaliar a precisão entre dois resultados. Nesse tipo de situação o erro relativo é amplamente empregado (RUGGIERO; LOPES, 2000).

O erro relativo (ER) leva em consideração as dimensões dos valores em análise e é definido como o erro absoluto dividido pelo valor aproximado, geralmente é expresso em porcentagens, conforme descrito na equação (3.2).

$$ER_x = \left| \frac{EA_x}{\bar{x}} \right| \times 100\% = \left| \frac{x - \bar{x}}{\bar{x}} \right| \times 100\% \quad (3.2)$$

Nesse estudo será realizada a comparação entre medições reais e resultados de simulação, dessa forma o valor de x e \bar{x} são conhecidos. Os dados a serem comparados serão DHT e DHI, os valores numéricos dessas grandezas são pequenos, se encontram numa faixa

abaixo de 1, além disso, a tendência é que a diferença entre os valores encontrados na simulação e os valores reais seja mínima, dessa forma, a utilização do erro relativo pode sugerir um erro maior que o real.

Para o caso em estudo, o erro absoluto proporciona uma melhor visualização e entendimento do resultado. Sendo assim, a métrica para comparação dos resultados a ser utilizada nesse estudo será o erro absoluto.

4. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados associados ao desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso. Destaca-se que, realizou-se a análise de dados advindos da medição de qualidade de energia realizada após a entrada em operação do parque eólico, e então um comparação com as medições advindas da simulação, com parâmetros em conformidade com o parque eólico estudado, em modelo simplificado. Os dados estão sintetizados na sequência.

4.1 – MEDIÇÕES DO PARQUE EÓLICO REAL

No Parque Eólico 1 foram realizadas as medições no Aerogerador 03, destacado em vermelho na Figura 3.2, no período entre 17/06/2019 e 30/09/2019. As medições foram realizadas de forma a medir correntes harmônicas até a 50ª ordem, para variações de 0% a 100%, em intervalos de 10%, da potência nominal injetada.

Para realizar as medições no parque eólico foram utilizados analisadores de Qualidade de Energia Elétrica classe A da marca Fluke, modelo 1748. As principais características do equipamento são:

- Memória interna;
- Tensão máxima de entrada: 1.000 Vrms;
- Corrente máxima: 3.000 Arms;
- Avaliação de Distorção Harmônica de Tensão e Corrente de: CC e fundamental até 50ª ordem de acordo com a norma IEC 61000-4-7;
- Avaliação de Potência Ativa, Reativa, Aparente, TPF, DPF, Demanda e Energia;
- Avaliação de Flutuação de Tensão (Flicker): Pst e Plt;
- Avaliação de Desequilíbrio de Tensão e Corrente;
- Obtenção da forma de onda de tensão e corrente.

O medidor foi instalado no lado de média tensão do transformador (34,5 kV) do aerogerador, os resultados apresentados foram mensurados no padrão solicitado pela IEC 61400-21.

A análise dos dados indica o registro de correntes harmônicas apenas até a 3ª ordem e apenas para potências a partir de 60% da potência nominal do aerogerador, as correntes harmônicas são expressas como percentuais dessa potência. A Tabela 4.1 apresenta os resultados para o aerogerador estudado.

Tabela 4.1 – Correntes harmônicas medidas no Aerogerador 03.

Potência injetada (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Máx (%)
Ordem Harmônica (Hz)	Corrente harmônica medida (%)											
120	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,13	0,14	0,17	0,17
180	0	0	0	0	0	0	0,1	0,15	0,19	0,23	0,27	0,27
240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
420	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
480	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
540	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
660	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
720	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
780	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
840	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1080	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1320	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1380	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1440	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Na Figura 4.1 é apresentado um gráfico do espectro harmônico medido no aerogerador para uma injeção de 60% da potência nominal, e na Figura 4.2 para uma injeção de 100%.

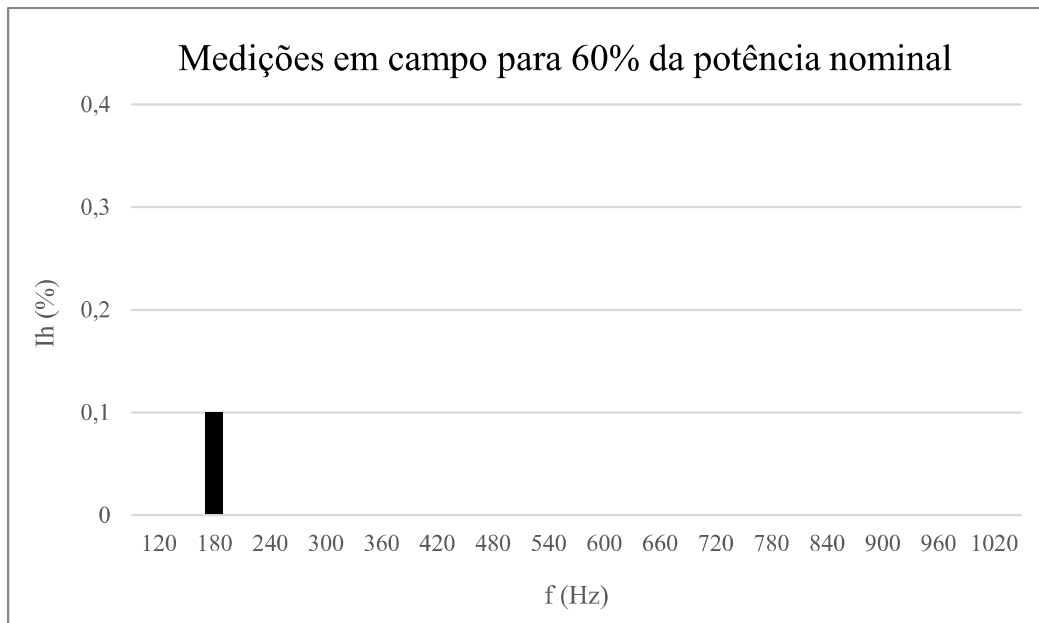


Figura 4.1 – Espectro harmônico medido com injeção de potência de 60% da nominal.

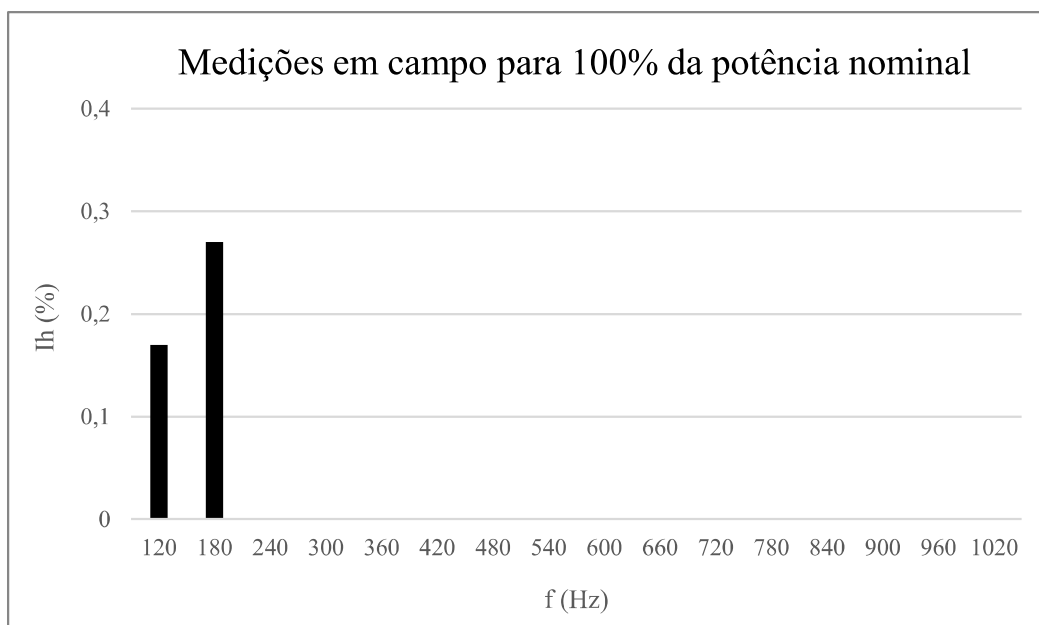


Figura 4.2 - Espectro harmônico medido com injeção de potência de 100% da nominal.

4.2 – MEDIÇÕES DA SIMULAÇÃO EM MODELO SIMPLIFICADO

Por meio do software MATLAB e Excel foram obtidos e tratados os resultados das simulações em modelo simplificado. O espectro harmônico foi obtido no MATLAB, por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), aplicada nas correntes no domínio do tempo.

Os resultados obtidos na simulação contemplam até a 50ª ordem, foram tratados e analisados os dados até a 25ª ordem, para variações de 60% a 100% da potência nominal injetada. Esses parâmetros foram selecionados devido aos resultados obtidos nas medições do parque eólico real. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Correntes harmônicas simuladas para o Aerogerador 03.

Potência injetada (%)	60	70	80	90	100	Máx (%)
Ordem Harmônica (Hz)	Corrente harmônica medida (%)					
120	0,1124	0,1242	0,13382	0,14986	0,16	0,16
180	0,2661	0,2691	0,26764	0,27327	0,28	0,28
240	0,0296	0,0345	0,03936	0,04408	0,05	0,05
300	0,0237	0,0276	0,03149	0,03526	0,04	0,04
360	0,0177	0,0207	0,02362	0,02645	0,03	0,03
420	0,0177	0,0207	0,02362	0,02645	0,03	0,03
480	0,0177	0,0207	0,02362	0,02645	0,03	0,03
540	0,0118	0,0138	0,01574	0,01763	0,02	0,02
600	0,0118	0,0138	0,01574	0,01763	0,02	0,02
660	0,0118	0,0138	0,01574	0,01763	0,02	0,02
720	0,0118	0,0138	0,01574	0,01763	0,02	0,02
780	0,0118	0,0138	0,01574	0,01763	0,02	0,02
840	0,0059	0,0069	0,00787	0,00882	0,01	0,01
900	0,0059	0,0069	0,00787	0,00882	0,01	0,01
960	0,0059	0,0069	0,00787	0,00882	0,01	0,01
1020	0,0059	0,0069	0,00787	0,00882	0,01	0,01
1080	0,0059	0,0069	0,00787	0,00882	0,01	0,01
1140	0,0059	0,0069	0,00787	0,00882	0,01	0,01
1200	0,0059	0,0069	0,00787	0,00882	0,01	0,01
1260	0,0059	0,0069	0,00787	0,00882	0,01	0,01
1320	0,0059	0,0069	0,00787	0,00882	0,01	0,01
1380	0,0059	0,0069	0,00787	0,00882	0,01	0,01
1440	0,0059	0,0069	0,00787	0,00882	0,01	0,01
1500	0,0059	0,0069	0,00787	0,00882	0,01	0,01

4.3 – COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DA SIMULAÇÃO E DADOS OBTIDOS EM CAMPO

Com o objetivo de avaliar o modelo simplificado, são efetuadas avaliações comparativas entre os resultados do SM e das medições realizadas em campo. Dessa forma é possível estudar a validação do modelo de simulação simplificado.

Na Figura 4.3 é possível observar o gráfico comparativo entre as correntes harmônicas medidas em campo e obtidas por meio da simulação, para uma injeção de 60% da potência nominal do aerogerador. A Figura 4.4 apresenta a mesma comparação para 80% da potência injetada e a Figura 4.5 para 100%.

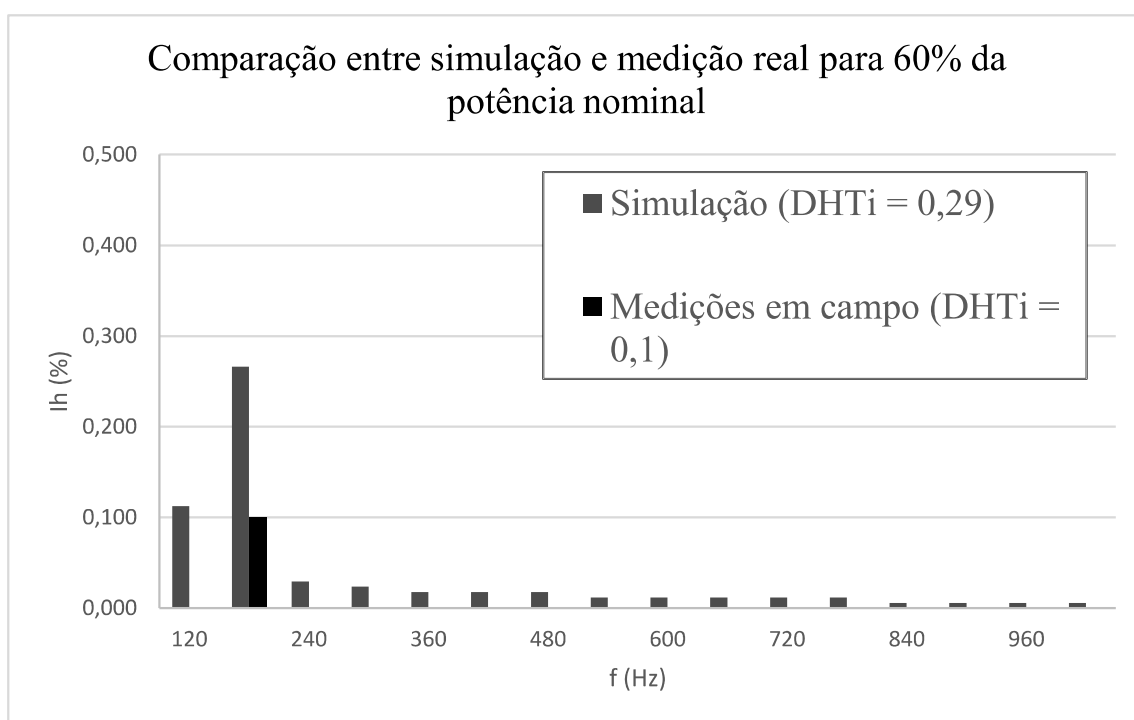


Figura 4.3 – Comparação entre simulação e medição em campo para 60% da potência nominal.

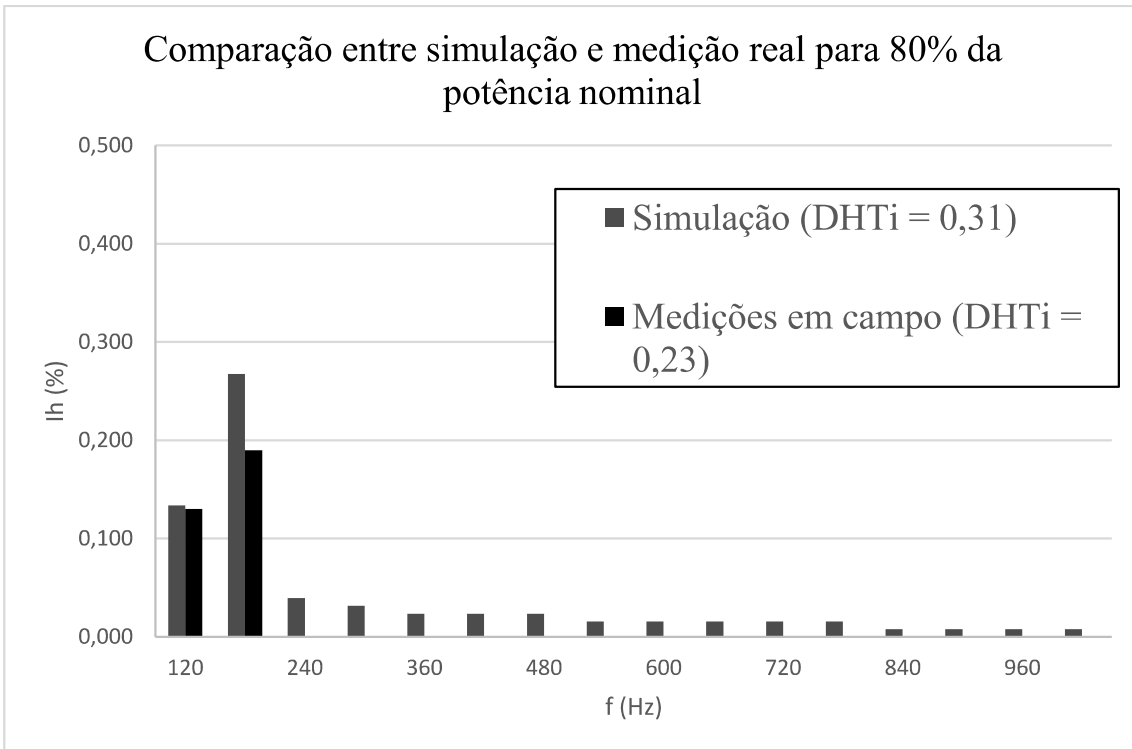


Figura 4.4 - Comparação entre simulação e medição em campo para 80% da potência nominal.

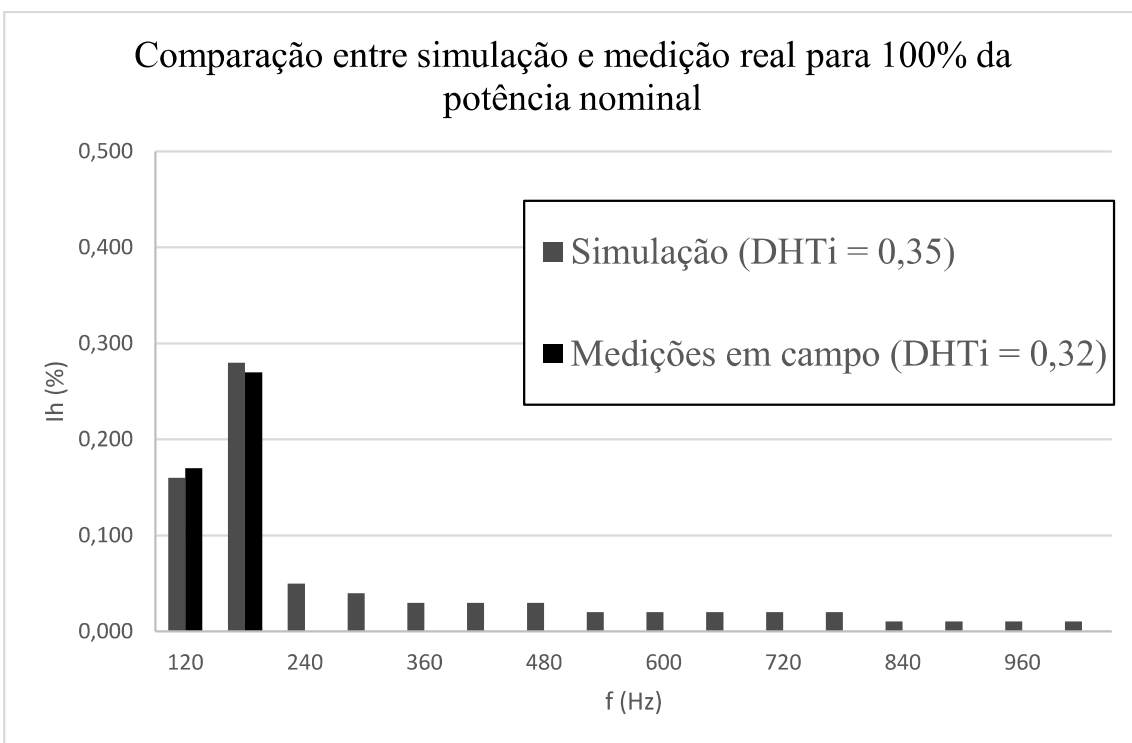


Figura 4.5 – Comparação entre simulação e medição em campo para 100% da potência nominal.

Pode-se observar que o espectro resultante da simulação em modelo simplificado é

aderente ao espectro medido em campo, em especial para o caso de 100% da potência nominal injetada. Um aspecto essencial para a obtenção desses resultados é a inserção adequada dos parâmetros relativos as distorções harmônicas inerentes ao chaveamento PWM, ao tempo morto e as distorções pré-existentes no ponto de acoplamento.

Cabe destacar que as distorções pré-existentes no ponto de conexão variam com o tempo, na simulação foi utilizado o mesmo valor para todos os cenários, porém, na realidade, o valor dessas distorções depende do instante em que é realizada a medição, dessa forma, esse é um dos fatores que causaram as diferenças observadas.

Foi realizada ainda a comparação com relação a Distorção Harmônica Total na corrente (DHTi), conforme descrito em (2.2), para variações de 60% a 100% da potência nominal injetada. O gráfico da comparação pode ser observado na Figura 4.6.

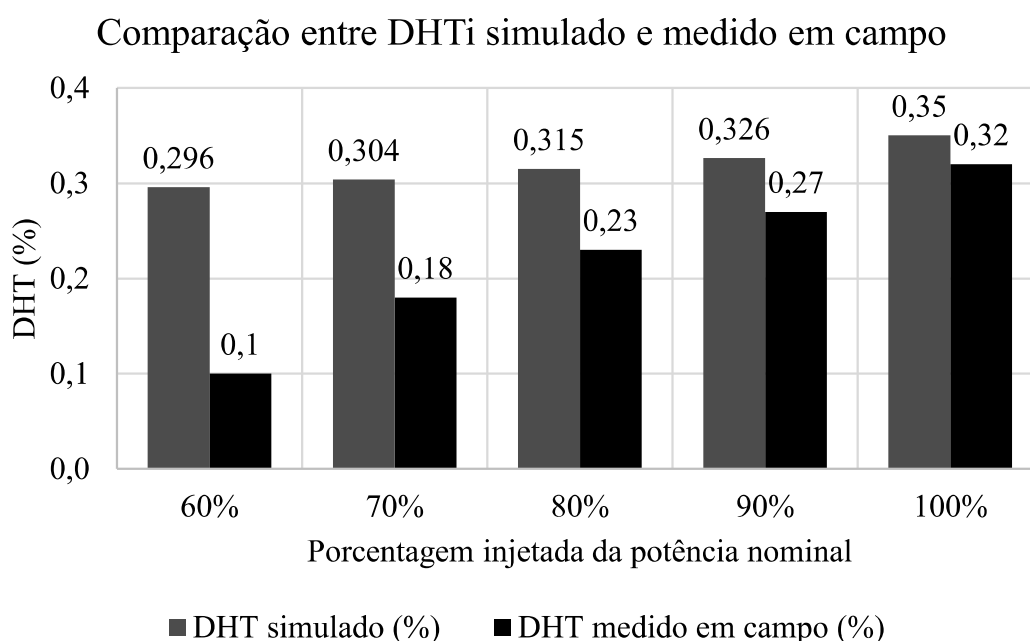


Figura 4.6 - Comparação entre DHTi simulado e medido em campo para variações de 60% a 100% da potência nominal do aerogerador

A métrica para comparação dos resultados adotada nesse trabalho é a do erro absoluto, conforme descrito em (3.2), o que permite uma melhor visualização dos dados em análise. A Tabela 4.3 apresenta os valores obtidos para a DHTi na simulação e nas medições em campo, e o valor do erro absoluto para cada valor de porcentagem da potência nominal.

Tabela 4.3 – Comparação entre DHTi simulado e real por meio do erro absoluto

Potência Injetada (%)	60	70	80	90	100
DHTi simulado (%)	0,296	0,304	0,315	0,326	0,35
DHTi medido em campo (%)	0,1	0,18	0,23	0,27	0,32
Erro absoluto (%)	0,196	0,124	0,085	0,056	0,03

As possíveis fontes de erro nos resultados da simulação no modelo simplificado incluem os pontos a seguir:

- A dinâmica dos inversores de ponte envolve efeitos de amortecimento, diodos antiparalelos, perdas devido aos processos de comutação e outros efeitos que são ignorados nos modelos médios;
- O SM é um modelo genérico que visa representar inversores ligados à rede usando uma estratégia de controle. No entanto, algumas abordagens específicas adotadas pelos fabricantes, como loops de controle e filtros específicos, não estavam disponíveis no modelo, o que pode ter afetado os resultados da simulação;
- Outros fenômenos comuns em sistemas reais, como desequilíbrio de tensão, assimetria de tensão, distorção de fundo, impedância harmônica de grade e condições de ressonância também podem produzir diferenças entre os resultados medidos e simulados. Além disso, a relação de curto-circuito no ponto de acoplamento pode influenciar as emissões harmônicas do inversor;
- A precisão do analisador de qualidade de energia pode introduzir erros.

Por meio da análise dos resultados é possível verificar que o SM reproduz com maior precisão as correntes harmônicas nos casos de injeção de potência mais próxima da potência nominal. O maior erro absoluto verificado para a injeção de potências de 60% a 100% da nominal é de 0,196%, sendo gradativamente reduzido conforme a potência injetada aumenta.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou, por meio de revisão bibliográfica, o funcionamento de sistemas de geração de energia eólica; as definições, causas e efeitos de distorções harmônicas e inter-harmônicas, assim como os fatores de influência na geração dessas distorções em sistemas eólicos e as normas brasileiras que regulam os parâmetros de qualidade de energia para a conexão de parques eólicos à rede elétrica. Foram estudados os modelos computacionais de simulação que permitem a análise prévia do funcionamento do sistema no que se refere as distorções harmônicas, sendo que o modelo simplificado proporciona esforço computacional e tempo de execução reduzidos.

Além disso, foi apresentado o caso de um complexo eólico em operação, de forma a analisar as correntes harmônicas registradas em medições reais. Posteriormente foram estudados os resultados obtidos por meio da simulação no modelo simplificado, de forma a realizar uma comparação com os resultados das medições em campo.

O modelo de simulação em análise demonstrou uma boa aderência em comparação aos dados obtidos nas medições realizadas no complexo eólico em operação. O modelo se mostrou satisfatório, com erros inferiores a 0,2%, com relação a DHTi, sendo que para 100% da potência do aerogerador injetada o erro absoluto foi igual a 0,03%.

O bom desempenho do modelo está diretamente relacionado a inserção mais próxima o possível da realidade dos parâmetros do complexo eólico em análise, a inserção desses parâmetros de maneira perfeitamente correspondente ao cenário real é improvável, o que justifica parte dos erros observados. Além disso, devem ser considerados os efeitos do chaveamento, tempo morto e distorções pré-existentes no ponto de acoplamento, dados sobre os quais também há dificuldade de obtenção de forma precisa.

A metodologia de simulação estudada nesse trabalho, de modelo simplificado, viabiliza a caracterização prévia da integração de parques eólicos à rede básica, com relação a distorções harmônicas e qualidade de energia. Dessa forma é possível verificar previamente se a unidade eólica em análise se adequa aos parâmetros e normas que regulamentam o sistema elétrico do país, e, assim, realizar ações preventivas e eventuais correções necessárias antes da instalação física do parque eólico.

Cabe ressaltar que o modelo estudado ainda é válido para instalações fotovoltaicas, condicionado a inserção adequada dos parâmetros, no SM o sistema que substitui o inversor é semelhante para os dois casos, e a fonte de energia, que pode ser uma turbina eólica ou um painel fotovoltaico, é substituída por uma fonte de corrente controlada.

Sendo assim, essa técnica possibilita a realização de estudos em plantas fotovoltaicas ou eólicas, com esforço computacional e tempo de simulação reduzidos quando comparados a outros modelos. Podendo ser assim um instrumento importante para agentes de geração e de planejamento do sistema elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica,” Brasília, Brasil, 2018.

ANEEL, “Programa de Incentivo às Fontes Alternativas,” *ANEEL*, 2015. [Online]. Available: <https://www.aneel.gov.br/proinfa>. Acesso em: 30 ago. 2020.

ANEEL, “Resolução Normativa N° 482,” Brasília, Brasil, 2012.

ANEEL. SFG. Relatório de Acompanhamento da Expansão da Oferta de Geração de Energia Elétrica. 2020. Painéis Interativos. Disponível em: www.aneel.gov.br/acompanhamento-da-expansao-da-oferta-de-geracao-de-energia-eletrica. Acesso em: 4 ago. 2020.

AZEVEDO, G.T. *et al.* Correção de distorções harmônicas em sistemas elétricos através de interferência destrutiva. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 41, n. 3, 4 fev. 2019.

CARVALHO, Bismarck Castillo. Development of a computational modeling of wind energy conversion systems with synchronous generators for power quality studies. 2006. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

COSTA, Fabiano Fragoso. Estimação de harmônicos e inter-harmônicos em sistemas elétricos. 2005. 146f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba Brasil, 2005.

FREITAS, G.C.; DATHEIN, R. As energias renováveis no Brasil: uma avaliação acerca das implicações para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental. *Revista Nexos Econômicos*, v. 7, n. 1, p. 71-94, 2013.

GWEC. Global Wind Report 2018. Brussels, Belgium: Global Wind Energy Council, 2019. Disponível em: gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf. Acesso em: 24 ago. 2020.

HONRUBIA-ESCRIBANO, A. *et al.* Generic dynamic wind turbine models for power system stability analysis: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S. l.], v. 81, n. Parte 2, p. 1939-1952, jan. 2018.

KENNEDY, C.A.; BACHMANN, C. The Energy Structure of the Canadian Economy. *Journal of Industrial Ecology*, Yale University, v. 00, 22 set. 2016. Research and analysis.

MOURA, L.P. Avaliação experimental do desempenho de unidades eólicas quanto à geração de distorções harmônicas. Orientador: José Carlos de Oliveira. 2017. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

MOURA, L.P. *et al.* Experimental Evaluation of Wind Turbines Inverters on Generating Harmonic Currents. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, [S. l.], 19 jan. 2019. DE GRUYTER.

ONS. Capacidade Instalada de Geração. *In: Histórico da operação*. [S. l.]: ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020. Disponível em: www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao. Acesso em: 24 ago. 2020.

ONS. NT 009/2016. INSTRUÇÕES PARA REALIZAÇÃO DE ESTUDOS E MEDIÇÕES DE QEE RELACIONADOS AOS ACESSOS À REDE BÁSICA OU NOS BARRAMENTOS DE FRONTEIRA COM A REDE BÁSICA PARA PARQUES EÓLICOS, SOLARES, CONSUMIDORES LIVRES E DISTRIBUIDORAS, [S. l.], ano Rev. 02, 2018. Disponível em: www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/ONSNT0009-2016_Rev2-InstrEstudos-Medicao_QEE_Acesso_RB.pdf. Acesso em: 12 out. 2020.

PICOLO, A.P. *et al.* Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 36, n. 4, p. 4306.01 - 4306.13, 3 out. 2014. Disponível em: www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/364306.pdf. Acesso em: 28 ago. 2020.

PINTO, R.; SANTOS, V. Energia eólica no Brasil: evolução, desafios e perspectivas. *RISUS - Journal on Innovation and Sustainability*, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 124-142, 2019.

PITTELOUD, J.D. Global Wind Installations. *In: Global Statistics*. E.V. 2018. [S. l.], 2020. Disponível em: library.wwindea.org/global-statistics/. Acesso em: 24 ago. 2020- GWEC | GLOBAL WIND REPORT 2018 APRIL 2019.

REIS, A. Uma Contribuição para o Controle Operativo de Unidades Eólicas: Modelagem, Regulação de Tensão e Minimização das Distorções Harmônicas. 193 p. Tese (Doutorado) | Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

ROCHA, C.A. CORRELAÇÃO OPERATIVA ENTRE PARQUES EÓLICOS E A REGULAÇÃO DE TENSÃO DO PONTO DE ACOPLAMENTO. Orientador: Alex Reis. 2014. 73 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2014.

RUGGIERO, M.A.G.; LOPES, V.L.R. Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2000. 424 p.

SANTOS, G.V. Sistemas de Controle Aplicados a Aerogeradores Síncronos com Conversores Back-to-Back. Orientador: Seleme Isaac Seleme Junior. 2015. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, Belo Horizonte, 2015.

SILVEIRA, J.P.C. AVALIAÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS E INTER-HARMÔNICAS EM UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA A

GERAÇÃO SÍNCRONA. Orientador: ANESIO DE LELES FERREIRA FILHO. 2016. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

WWEA. Global Wind Power Statistics: Global Wind Installations. *In*: WWEA. Wind Energy International. [S. l.], 2020. Disponível em: library.wwindea.org/global-statistics/. Acesso em: 30 ago. 2020.