

Estudo do DFIG (Gerador de Indução Duplamente Alimentado): Uma Revisão Bibliográfica

Bruno Carneiro Pereira Soares¹, Adriano Aron Freitas Moura²

Resumo - A energia eólica tem se destacado como uma importante fonte de energia renovável, e o Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG) desempenha um papel crucial nesse cenário. Este estudo busca compreender e aprimorar o desempenho do DFIG através de uma revisão bibliográfica, contribuindo para a eficiência e confiabilidade dos sistemas de geração de energia eólica. A análise de revisão bibliográfica revelou que a busca por fontes de energia renováveis tem intensificado a relevância das tecnologias de geração de energia eólica, consolidando-as como uma alternativa eficaz e ambientalmente responsável para atender à crescente demanda por eletricidade. Além disso, reflete a preocupação ambiental e a busca por soluções inovadoras que promovam a transição para um futuro energético mais limpo e sustentável. A metodologia empregada nesta pesquisa envolveu a consulta a materiais bibliográficos, com a inclusão de livros e artigos publicados nos últimos anos, bem como teses abordando o tema. Os estudos analisados evidenciaram avanços e desafios relacionados ao DFIG, destacando a importância de melhor compreensão e aprimoramento dessa tecnologia. A motivação deste trabalho está alinhada com a necessidade de impulsionar o desenvolvimento de sistemas de geração de energia eólica mais eficientes e confiáveis.

Em suma, este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre o comportamento do DFIG, fornecendo *insights* valiosos que podem orientar futuras pesquisas e inovações na área de energia eólica. Espera-se que os resultados aqui apresentados incentivem a continuidade do progresso nesse campo, visando um futuro energético mais sustentável e promissor.

Palavras-chave: Energia Eólica; DFIG; Gerador de Velocidade Variável.

1. INTRODUÇÃO

A energia proveniente do vento já era aproveitada a pelo menos 3000 A.C, o homem passou a utilizar a energia natural dos ventos para navegar, com o surgimento do mastro e da vela. Por volta de 1.000 a.C., os fenícios, pioneiros na navegação comercial, utilizavam barcos movidos exclusivamente à força dos ventos. Ao longo dos anos, vários tipos de embarcações à vela foram desenvolvidos, com grande destaque para as caravelas surgidas na Europa no século XIII. Essa tecnologia foi levada, por aqueles que retornaram das cruzadas e lá teve seu uso expandido para a indústria têxtil, madeireira e metalúrgica. Em 1350 os Holandeses colocaram o eixo de rotação do moinho na horizontal e utilizaram 4 pás, aumentando ainda mais sua eficiência, permitindo aplicação na drenagem de pântanos e lagos as terras na formação dos polders, além da fabricação de papel e extração de azeites [1].

A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis tem elevado a importância das tecnologias de geração de energia eólica como uma alternativa eficaz e ambientalmente responsável. No contexto global, a energia proveniente do vento se destaca como uma solução capaz de abordar os desafios energéticos de maneira eficiente, sendo notável por sua rápida implementação, especialmente em economias em expansão. O desenvolvimento da geração de eletricidade a partir da força do vento teve origem no final do século XIX, mas alcançou significativo impulso durante a crise global do petróleo nos anos 70. Esse período impulsionou investimentos substanciais em pesquisa e desenvolvimento tecnológico de fontes renováveis de energia, destacando a energia eólica como uma alternativa promissora e de rápido crescimento em escala mundial. As turbinas eólicas de gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) surgem como uma opção notável, oferecendo alta eficiência e qualidade na geração de energia elétrica a partir do vento, sendo especialmente aplicáveis em grandes parques eólicos [2].

A energia eólica tem experimentado um crescimento exponencial nos últimos anos. Essa tendência se observa em todo o mundo, com o Brasil se destacando como um dos países que ostentam as maiores taxas de expansão nesse setor [3]. A capacidade instalada de energia eólica no mundo atingiu 810 GW em 2023, um crescimento de 17% em relação ao ano anterior, em 2022 o Brasil atingiu a marca de 25,6 GW de capacidade instalada de energia eólica, um aumento de 18,85% em relação ao ano anterior. Isso representa um recorde histórico para o país, posicionando-o como o sexto maior mercado do mundo em termos de capacidade instalada eólica *Onshore* [4], essa quantidade de energia é suficiente para suprir mais de 10% da demanda do país em determinados meses, demonstrando o impacto significativo que essa fonte renovável já exerce na matriz energética nacional.

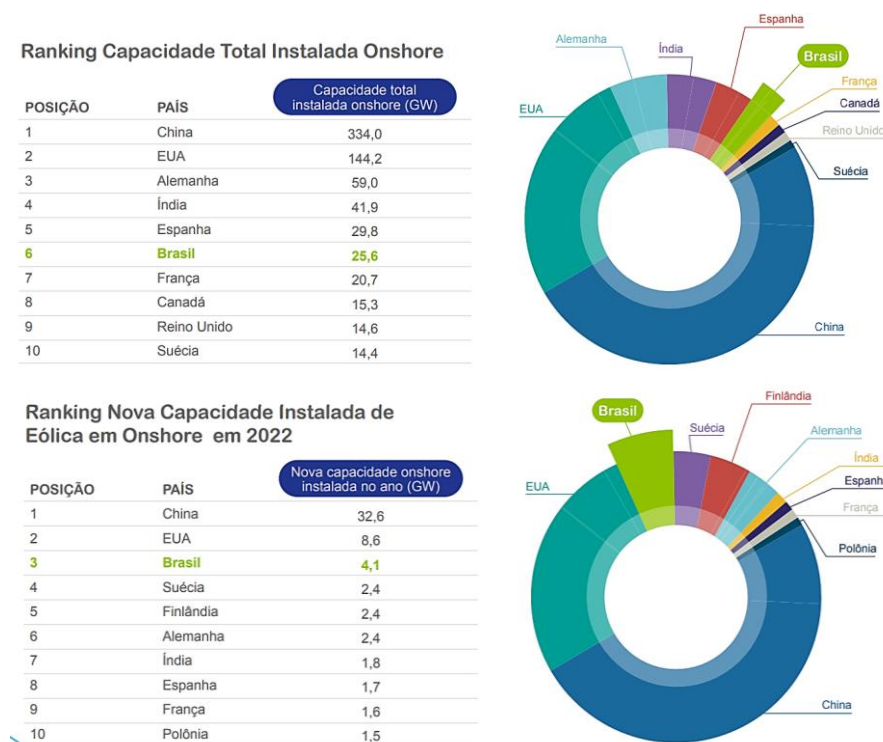


Figura 01- Gráficos Boletim Anual, 2023 [4].

Atualmente, na geração de energia eólica, as tecnologias utilizadas se dividem principalmente em dois tipos de turbinas: os de velocidade fixa, que são conectados diretamente à rede elétrica, e os de velocidade variável, que utilizam controladores para ajustar a velocidade [5]. Uma das tecnologias mais comuns na geração eólica atual é o gerador de indução duplamente alimentado - GIDA (do inglês *Double Fed Induction Generator*, DFIG) [6]. Este tipo de gerador permite o controle das potências ativa, reativa e do fator de potência da máquina, além de ser de fácil construção e manutenção [7]. Dependendo da potência e velocidade, a turbina pode operar em diferentes modos, como o modo super-síncrono e o modo sub-síncrono, onde a velocidade do rotor é maior ou menor que a velocidade síncrona, respectivamente [8].

Nesse contexto, surge a necessidade de realizar um estudo do DFIG, o presente artigo descreve uma revisão bibliográfica sobre o DFIG, com ênfase nos aspectos relacionados à integração com turbinas eólicas, regime permanente e dinâmico, PLL (*Phase-Locked Loop*) e controle.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta revisão bibliográfica tem como objetivo apresentar uma breve fundamentação teórica quanto ao DFIG (Gerador de Indução Duplamente Alimentado). Serão abordados tópicos tais como: Turbina, Regime permanente, Regime dinâmico, e Controle. Será abordado também a respeito de alguns trabalhos encontrados na literatura relacionados a este tema.

O grande desafio que enfrentamos hoje no setor energético é atender a crescente demanda de energia elétrica com o mínimo impacto ao meio ambiente. O mundo está cada vez mais preocupado com os crescentes níveis de emissão de CO₂ que contribuem para o aquecimento global e mudanças climáticas. Desta forma, as fontes renováveis de energia podem desempenhar um papel importante na solução do dilema de aumento da capacidade de produção de energia minimizando a interferência no meio ambiente [5].

A busca por fontes de energia renováveis se torna cada vez mais urgente para enfrentar esse desafio. Nesse contexto, a energia eólica tem se destacado como uma alternativa promissora. O DFIG é um componente crucial para a geração eólica, sendo uma das turbinas mais modernas com alta eficiência e rendimento energético, ele possui dois conjuntos de enrolamentos: um no estator, conectado à rede elétrica, e outro no rotor, conectado a um conversor de frequência. Essa configuração permite ajustar a velocidade do rotor de acordo com a velocidade do vento, independentemente da frequência da rede elétrica.

3. TURBINA

Energia eólica é uma forma de energia renovável que aproveita a energia cinética dos ventos para gerar eletricidade por meio de aerogeradores, os ventos são os responsáveis por movimentar as hélices das turbinas eólicas e gerar a força mecânica que, depois, será convertida em energia elétrica por meio de um gerador. A turbina

eólica é o componente central desse processo, composta por diversas partes, desde as pás que captam o movimento do vento até o gerador, que converte a energia mecânica em eletricidade. Uma turbina eólica, também conhecida como aerogerador, é um dispositivo tecnológico que desempenha um papel fundamental na geração de energia elétrica a partir do vento, e é composta pela torre, as pás e nacelle.

A torre, é a estrutura responsável por sustentar a turbina e elevá-la a uma altura que permita a captação eficiente do vento pelas pás. A altura da torre é determinante para garantir que as pás capturem o vento de forma otimizada, maximizando assim a produção de energia. As pás, por sua vez, desempenham um papel essencial ao capturar a energia cinética do vento e convertê-la em movimento rotatório. O formato e o design das pás são aspectos cruciais para a eficiência da turbina, uma vez que são projetadas para maximizar a captura de energia do vento em diferentes velocidades. Por fim, a Nacelle ou Gôndola, conhecida como a "caixa", dentro da Nacelle fica o gerador, que desempenha um papel crucial nesse processo, convertendo a energia mecânica do movimento de rotação do eixo em eletricidade. Os enrolamentos de cobre giram através de um campo magnético no gerador para produzir eletricidade. Alguns geradores são acionados por caixas de engrenagens e outros são acionamentos diretos, onde o rotor da hélice se conecta diretamente ao gerador (Figura 02).

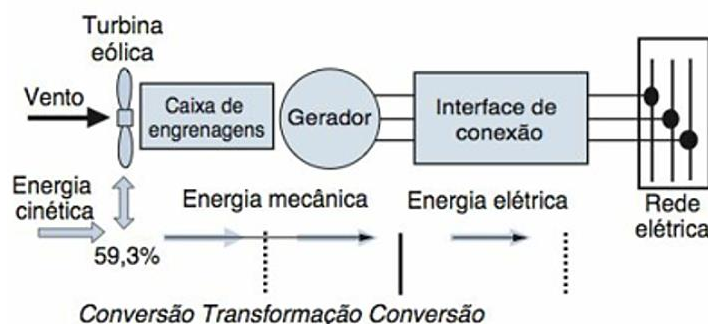


Figura 02 - O princípio da conversão da energia cinética do vento em energia elétrica [1].

As turbinas eólicas para geração de energia se agrupam em duas categorias fundamentais: as de velocidade fixa e as de velocidade variável. Para as turbinas de velocidade fixa, destaca-se o gerador de indução tipo Gaiola de Esquilo, GIGE (do inglês *Squirrel Cage Induction Generator*, SCIG), na qual é ligado diretamente à rede elétrica e opera a uma velocidade imposta pela mesma, nesse caso, o gerador sempre irá funcionar a velocidade constante, não importando quão rápido o vento está. E as turbinas de velocidade variável, que utilizam conversores para ajustar o funcionamento de acordo com a variação da velocidade. Entre as turbinas de velocidade variável, destacam-se o Gerador Síncrono de Ímã Permanente (do inglês *Permanent Magnet Synchronous Generator*, PMSG), o Gerador de Rotor Bobinado, GIRB e o Gerador de Indução de Duplamente Alimentado (do inglês *Double Fed Induction Generator*, DFIG) [1]. O esquema do sistema eólico utilizando o DFIG pode ser visto na (Figura 03).

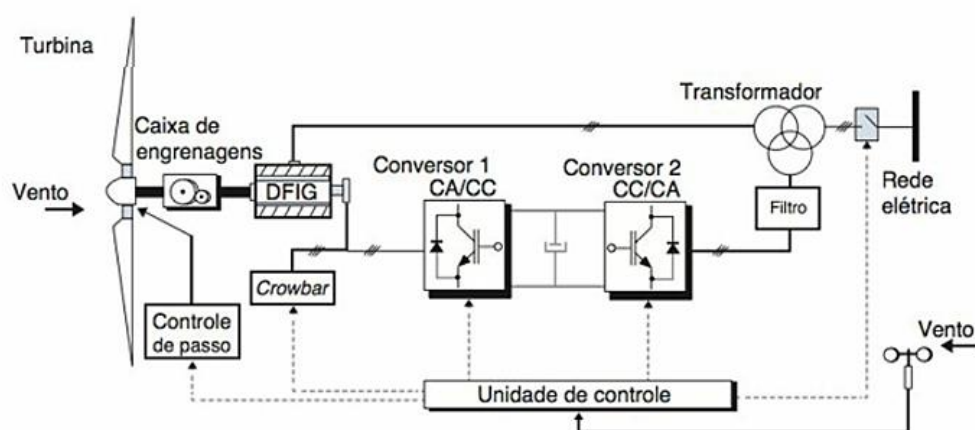


Figura 03 - Conexão de uma turbina eólica à rede elétrica através de um DFIG [1].

O DFIG se diferencia por alimentar tanto o estator quanto o rotor da máquina elétrica. Isso permite controlar a velocidade do rotor com mais precisão, possibilitando a operação em diferentes regimes, como sub-síncrono, o rotor gira mais devagar que o campo magnético do estator, ideal para ventos fracos, e super-síncrono o rotor gira mais rápido que o campo magnético do estator, útil para ventos fortes. O DFIG utiliza um inversor para ajustar a frequência da corrente que alimenta o rotor. Isso garante que a frequência final gerada pelo sistema

permaneça constante, mesmo com a velocidade do rotor variando. Essa característica contribui para uma operação mais suave e eficiente. Para a máquina DFIG e máquinas síncronas, a presença dos conversores suaviza a conexão e, assim, não causa surtos de tensão [1].

Atualmente nos sistemas de conversão de energia eólica, as turbinas eólicas de velocidade variável com o DFIG são praticamente dominantes [8, 9]. Parte do estudo realizado por Ribeiro & Araújo [10], evidencia o uso do DFIG como uma escolha vantajosa para a geração eólica em comparação com outras tecnologias disponíveis. Uma das principais vantagens desse tipo de máquina, seja ela síncrona ou assíncrona, é a redução de custos. Especificamente, o DFIG, que se destaca por possibilitar a conexão dos conversores de frequência ao rotor, em vez do estator. Isso resulta em uma potência processada pelo rotor substancialmente menor, representando aproximadamente 30% da potência total da máquina. Como resultado, os conversores requerem uma capacidade de suporte menor, o que contribui para a redução dos custos associados.

3.3.1 Geradores Síncronos

Os geradores síncronos podem operar com velocidade de rotação variável e necessitam de inversor de frequência para realizar a integração com o sistema elétrico, mantendo tensão e corrente na faixa de frequência estabelecida para a operação da rede elétrica. O uso de geradores síncronos foi preterido, no início do desenvolvimento da tecnologia eólica, devido aos problemas de rígida conexão com a rede elétrica e à necessidade de sistemas de controle mais precisos para sincronização com a rede e suavização de impactos na rede elétrica com relação às rajadas de vento. Tais fatores tornavam os custos de fabricação mais altos e muitas vezes eram impeditivos para o uso dessa tecnologia.

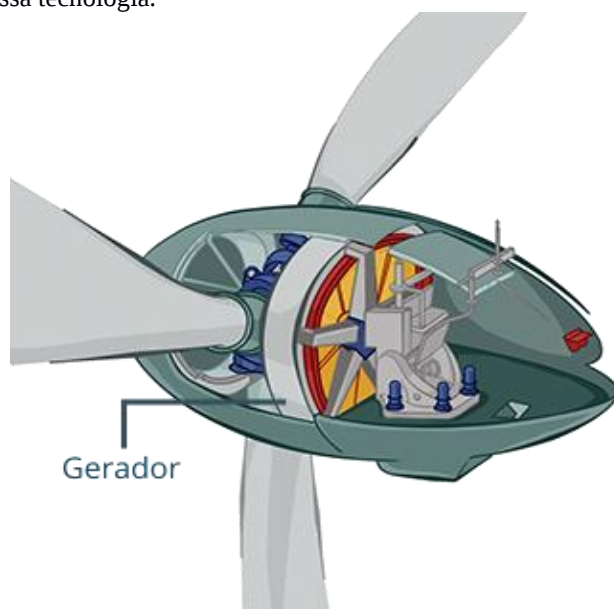


Figura 04 – Turbina eólica de velocidade variável [11].

Nesse tipo de turbina, o eixo do rotor é conectado diretamente ao eixo do gerador síncrono, conforme ilustra a (Figura 04) que apresenta, como exemplo, uma turbina eólica de velocidade variável desenvolvida pela Enercon GmbH, uma empresa multinacional alemã, e fabricada no Brasil pela subsidiária *Wobben Wind Power*, esse tipo de máquina é comumente denominado por turbina de velocidade variável.

3.3.2 Geradores Assíncronos

Os geradores assíncronos (Figura 05), também chamados de geradores de indução, quando interligados ao sistema elétrico, possuem velocidades de rotação consideradas constantes e podem ser conectados diretamente à rede elétrica, isto significa dizer que, nesse tipo de tecnologia de geração, não é necessário o uso de inversores de frequência na conexão com a rede. As turbinas eólicas que usam geradores de indução necessitam de um multiplicador de velocidades, para realizar a ligação entre o eixo do rotor da turbina e o eixo do gerador, já que este opera em velocidades muito mais altas do que o rotor da turbina.

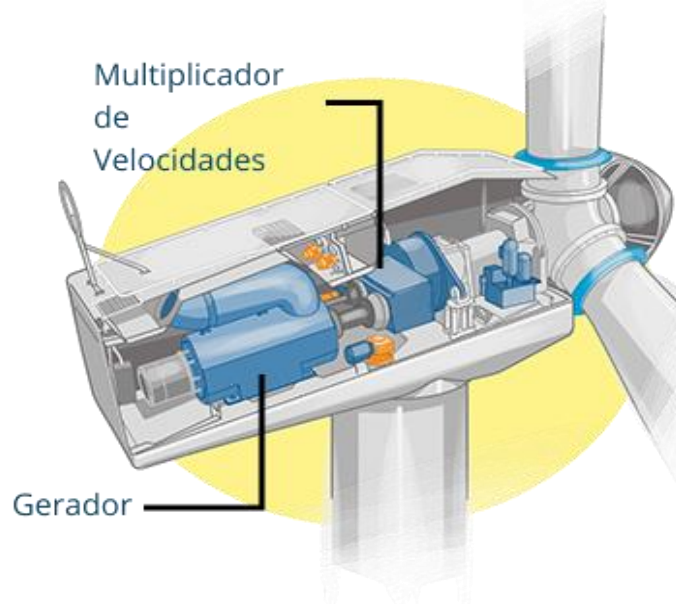


Figura 05 – Turbina eólica de velocidade fixa com multiplicador de velocidades [12].

O uso dos geradores assíncronos foi um dos responsáveis pelo desenvolvimento acelerado da indústria eólica, particularmente com o desenvolvimento da “tecnologia dinamarquesa”. A robustez do gerador assíncrono e os custos mais baixos proporcionam um cenário em que as turbinas eólicas pudessem ter uma tecnologia competitiva para a geração de energia. Adicionalmente, a sua flexibilidade com relação à integração elétrica permitiu uma operação segura e o desenvolvimento da tecnologia possibilitou que os impactos na rede elétrica fossem minimizados.

O DFIG não se classifica como síncrono nem assíncrono em sua totalidade. Ele combina características de ambos os tipos de geradores para oferecer flexibilidade e eficiência na geração de energia eólica, enquanto o estator do DFIG opera em sincronia com a frequência da rede elétrica, semelhante aos geradores síncronos, garantindo a estabilidade da rede e permitindo o controle preciso da potência ativa e reativa, seu rotor opera em velocidade variável, como nos geradores assíncronos. Essa combinação de características permite a adaptação às diferentes velocidades do vento, otimizando a geração de energia. Dependendo da potência e velocidade, diferentes modos de operação podem ser estabelecidos, incluindo a operação em velocidade super-síncrona ou subsíncrona, onde a velocidade do rotor é maior ou menor que a velocidade síncrona, respectivamente.

O DFIG como Gerador Eólico apresenta diversas vantagens em comparação com outras tecnologias disponíveis. Algumas dessas vantagens incluem:

Redução de custos: Os conversores de potência do DFIG ficam conectados entre a rede e o rotor da máquina, o que resulta em uma capacidade necessária de potência para os conversores consideravelmente menor, levando a uma redução significativa nos custos [13].

Eficiência: O DFIG permite uma maior eficiência na conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica, devido à sua capacidade de ajustar a velocidade do rotor para otimizar a produção de energia.

Controle mais robusto: O DFIG oferece a possibilidade de um controle mais robusto que atenda aos requisitos dos Procedimentos de Rede, garantindo uma operação mais estável e confiável.

Alta capacidade de geração: O fator de capacidade de geração do DFIG é extremamente alto, em torno de 40%, em comparação com a média global de aproximadamente 20%, o que demonstra a eficiência dessa tecnologia [14].

3.3 Regime Permanente

O comportamento do DFIG em regime permanente é de suma importância para compreender seu desempenho em condições estáveis. Nesse regime, as grandezas de tensão, corrente e potência não se alteram com o tempo, permitindo uma análise precisa do funcionamento do DFIG. Para isso, diversas abordagens são utilizadas: Modelo matemático: Um modelo matemático do DFIG é essencial para compreender seu comportamento em diferentes condições de operação. Através de equações que descrevem as características elétricas e mecânicas do gerador, é possível prever seu desempenho em regime permanente.

Simulações computacionais: A realização de simulações computacionais é fundamental para avaliar o comportamento do DFIG em diferentes cenários. Softwares especializados permitem analisar o desempenho do gerador sob variações de carga, velocidade e outras condições operacionais.

No estudo apresentado por Campos & Ferrari [15] a modelagem e simulação do DFIG nos *softwares* Simulink e ATP são realizadas de forma detalhada, de modo que no Simulink, cada etapa do processo de

transformação da energia cinética do vento em eletricidade é descrita por meio de blocos de estado, permitindo a modelagem de diversas situações e componentes do sistema. No ATP, por sua vez, possui uma capacidade igualmente robusta de modelar elementos com parâmetros distribuídos, reatores, componentes com parâmetros concentrados, entre outros, através dos estudos de transitórios eletromagnéticos, o ATP realiza simulações de uma ampla gama de componentes do sistema elétrico, incluindo máquinas elétricas e reguladores. A modelagem no Simulink envolve a descrição da etapa de conversão da energia cinética em mecânica, simulando um rotor real e transformando a força em torque e potência. Já no ATP, a representação do DFIG é feita no *ATPDraw*, recebendo as configurações e entradas de dados necessárias. Ambos os programas permitem a análise de grandezas elétricas e mecânicas do DFIG, proporcionando uma visão abrangente do comportamento do sistema.

No trabalho de Campos & Ferrari [15] o estudo comparativo de modelagem e simulação do DFIG nas plataformas de *software* Simulink e ATP envolveu uma análise também do modelo matemático do DFIG, ao examinar o equivalente do circuito e o fluxo de energia, derivou de equações que descrevem a operação da máquina, as equações foram então usadas para calcular valores como potência do rotor, escorregamento, potência gerada. Para comparar os valores calculados com os simulados, utilizou dados das simulações realizadas tanto no Simulink quanto no ATP. Por exemplo, no ATP, comparou os valores de tensão calculados pelo algoritmo apresentado com os obtidos na simulação, variando parâmetros como percentual de escorregamento e potência gerada, o estudo gerou valores efetivos e traçou gráficos para análise. Este método permitiu uma avaliação abrangente do desempenho do DFIG com base em modelos matemáticos e resultados de simulação.

3.4 Regime Dinâmico

No regime dinâmico, ou seja quando as grandezas de tensão, corrente e potência se alteram com o tempo, o DFIG está sujeito a variações rápidas nas condições de operação, como rajadas de vento, variações na carga elétrica e distúrbios na rede elétrica. Nesse contexto, é fundamental compreender como o DFIG responde a tais variações e quais são os principais desafios associados a essas condições. Uma das principais vantagens dele em regime dinâmico é a capacidade de fornecer controle ativo da potência. Isso significa que o gerador pode ajustar sua potência de saída em resposta a mudanças nas condições de operação, mantendo a estabilidade do sistema elétrico. No entanto, é necessário um sistema de controle sofisticado para garantir que responda de forma rápida e precisa a tais variações, o DFIG também é capaz de suportar distúrbios transitórios, como variações bruscas na carga ou na tensão da rede elétrica. Isso é possível graças à sua capacidade de absorver e dissipar energia de forma controlada, minimizando os impactos desses distúrbios no sistema elétrico como um todo. O comportamento dinâmico do DFIG é influenciado por diversos fatores, como a inércia do rotor, a resposta do sistema de controle e as características da rede elétrica.

No estudo apresentado por Campos & Ferrari [15], as grandezas de potência gerada no estator e potência de entrada no rotor do DFIG são analisadas considerando o regime dinâmico. A modelagem do DFIG permite compreender as relações de potência mecânica e torque aplicado ao eixo do rotor, juntamente com as condições de velocidade. As simulações realizadas utilizando os *softwares* Simulink e ATP (*Alternative Transients Program*) demonstram a influência da velocidade do rotor na potência ativa trifásica gerada pelo DFIG. Constatou-se que quanto maior a velocidade, menor é a potência requerida ao rotor do gerador, enquanto a potência gerada trifásica aumenta, aproximando-se dos valores nominais do sistema. O escorregamento em um gerador de indução, como o DFIG, refere-se à diferença entre a velocidade de rotação do campo magnético do estator e a velocidade de rotação do rotor. Quanto maior o escorregamento, maior a diferença entre as velocidades do rotor e do campo magnético do estator, o que geralmente resulta em uma produção de energia mais eficiente. A Tabela 01, apresenta os dados e parâmetros obtidos com as simulações.

Velocidade (rad/s)	Escorregamento(%)	Potência Gerada (kW)
186,6106	1	75
179,0708	5	72,8
174,3584	7,5	70,6
169,6460	10	68,4
164,9337	12,5	66,2
160,2213	15	64
155,5089	17,5	61,8
150,7965	20	59
146,0841	22,5	57,4

Tabela 01- Dados e parâmetros da máquina de indução Trifásica [15].

Em suma, a análise do comportamento do DFIG em regime permanente e dinâmico é fundamental para compreender seu desempenho em diferentes condições de operação. Tanto a abordagem teórica, com modelos matemáticos, quanto as simulações computacionais e os testes experimentais são essenciais para garantir a

3.5 Controle

O controle desempenha um papel crucial na otimização do desempenho dos Geradores de Indução Duplamente Alimentados (DFIGs) em sistemas de turbinas eólicas. Ele regula variáveis como a velocidade do vento e a demanda de energia, com o objetivo de assegurar o funcionamento ideal do sistema. Essa gestão é fundamental para manter a estabilidade e a eficiência operacional, independentemente das condições ambientais variáveis, garantindo sua estabilidade e eficiência sob diferentes condições operacionais. Um projeto de DFIG foi desenvolvido por Pena *et al* [19], empregando controladores proporcional-integral (PI) e conversores ca-cc-ca em configuração “back-to-back”. Neste estudo, as bobinas do rotor são alimentadas por um conversor localizado no lado do gerador, enquanto o outro conversor está conectado à rede elétrica, conhecido como conversor do lado da rede, sendo que os dois conversores são interligados através de um circuito capacitivo e com controle PWM. O conversor do lado da rede é responsável por monitorar e regular a tensão do barramento CC, enquanto o conversor do lado do rotor realiza o controle vetorial orientado pelo campo no DFIG. As chaves dos dois conversores são controladas por modulação PWM, e o conversor do lado da rede é sincronizado com a rede elétrica por meio de um circuito PLL (*Phase Locked Loop*). Além disso, um sistema experimental de geração foi elaborado, e de acordo com Pena *et al* [19], os resultados do controle vetorial no experimento foram satisfatórios, proporcionando um fluxo bidirecional de potência ativa com pouca variação e baixa distorção harmônica. Esse trabalho contribuiu para popularizar a utilização de controladores PI para o controle do DFIG, devido à simplicidade dos ajustes de ganho desses componentes e às respostas satisfatórias obtidas, mesmo sem muita complexidade. Por outro lado, o estudo conduzido por Muller [20], buscou demonstrar como os geradores de velocidade variável, como o DFIG, se tornaram uma alternativa viável em comparação com as turbinas de velocidade constante, que dependem das características mecânicas. As vantagens do DFIG se tornam mais evidentes quando a potência gerada é superior a 1 MW. Além disso, outra vantagem apontada é a redução de custos em comparação com outras tecnologias, pois não é necessário um conversor conectado entre os terminais do estator e a rede elétrica. Compreender como esses controladores respondem a variações na potência de entrada e a falhas na rede elétrica é essencial para garantir a segurança e confiabilidade desses sistemas. Ao longo dos anos, surgiram diferentes maneiras de dimensionar o controle de sistemas, incluindo o uso de técnicas de programação. Um exemplo disso é o estudo realizado por Almeida *et al* [18], que investigou o uso de controladores baseados em lógica fuzzy para supervisionar e controlar a velocidade do rotor e a tensão terminal do conversor associado ao rotor. Isso levou a um amortecimento mais eficaz das correntes do rotor em comparação com o uso de controladores PI.

O estudo feito por Lima *et al* [16] apresenta uma nova estratégia de controle para o DFIG que o torna capaz de operar durante quedas de tensão, já que as correntes do estator podem aumentar significativamente durante afundamentos de tensão, levando à instabilidade do sistema. A validação da teoria proposta foi realizada por meio de simulações e testes de um protótipo de 6 kVA de potência, onde foi realizada a modelagem da máquina de indução duplamente alimentada, quando controlada em corrente através do conversor conectado ao rotor. Este modelo que prevê o comportamento desta máquina durante transitórios na tensão da rede elétrica, foi validado através de simulação realizada no ambiente PSCAD/EMTDC. A estratégia utiliza a informação das correntes do estator para ajustar as correntes do rotor, assim garantindo a estabilidade. Essa estratégia utiliza a realimentação das correntes do estator para calcular novas referências de correntes do rotor durante afundamentos de tensão, e permite sintetizar correntes do rotor que geram correntes estatóricas e rotóricas em oposição de fase às correntes geradas pelo afundamento de tensão, reduz as correntes estatóricas e rotóricas, permitindo o controle estável do DFIG sem a necessidade de circuitos auxiliares. Em suma, têm como benefícios da nova estratégia: maior estabilidade do DFIG durante afundamentos de tensão, redução da necessidade de circuitos auxiliares, e melhor desempenho em situações de contingências severas na rede elétrica.

No trabalho realizado por Timbus *et al* [17], foram analisados diferentes tipos de controladores utilizados em sistemas de geração distribuída. Os controladores PI clássico, *proporcional-ressonante* e *deadbeat* (DB) foram avaliados em diversas situações, desde condições estáveis até variações bruscas de potência e falhas na rede elétrica. Além disso, o estudo investigou o impacto desses controladores na distorção harmônica total da corrente elétrica, nesse trabalho apresentaram um modelo da planta e discutiram detalhadamente o projeto de cada controlador, chegando à conclusão de que todos apresentaram um desempenho satisfatório. Este estudo é de extrema importância para o avanço da tecnologia em geração distribuída, pois fornece informações valiosas sobre o comportamento dos controladores em diferentes cenários. A análise do desempenho dos controladores em condições de regime permanente e transientes é fundamental para garantir a estabilidade e eficiência dos sistemas de geração distribuída. Além disso, outra vantagem apontada é a redução de custos em comparação com outras tecnologias, pois não é necessário um conversor conectado entre os terminais do estator e a rede elétrica.

O trabalho de Albuquerque & Pinto [21] apresenta uma estrutura de controle para um aerogerador DFIG, usando o programa computacional PSCAD/EMTDC para estudar e simular o comportamento do sistema em condições reais, baseado no método *Linear-Quadratic Regulator with Integral Action* (LQI), ele analisa o

comportamento dessa topologia diante de variações no vento e cargas não lineares na rede elétrica, simulando seu comportamento real. A injeção de harmônicas na rede ocorre quando uma carga não linear é conectada ao sistema elétrico, isso pode causar distorções nas formas de onda da corrente e da tensão, introduzindo componentes de frequência indesejados. Então esse estudo analisa como a estratégia de controle LQI ajuda a melhorar o desempenho do sistema, garantindo estabilidade e eficiência, além disso, verifica a injeção de harmônicas na rede ao aplicar cargas não lineares, seguindo as recomendações da norma IEEE 519. A simulação é feita no software PSCAD/EMTDC para estudar o comportamento do sistema em condições reais, a estrutura de controle baseada em LQI contribui para o desempenho do aerogerador com DFIG ao estabelecer um compromisso entre a energia do vetor de estado e do vetor de controle, garantindo estabilidade e minimizando a função de custo, isso resulta em robustez e bom desempenho do sistema, viabilizando sua aplicação para controle de DFIG. A simulação de variações randômicas no vento influencia o comportamento real do sistema ao permitir avaliar a resposta do aerogerador diante de condições imprevisíveis, como mudanças repentinas na velocidade do vento. Isso ajuda a verificar a capacidade do sistema de se adaptar e manter um desempenho adequado em situações reais de operação.

3.6 Metodologia

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho ocorreu através de uma revisão bibliográfica. Os artigos foram pesquisados nas seguintes bases de dados: Scopus, IEEE Xplore e ScienceDirect. Foram utilizados os descritores "DFIG", "gerador de indução duplamente alimentado", "energia eólica".

Inicialmente, foi realizada uma busca ampla com os descritores mencionados, resultando em um grande número de artigos. Em seguida, foram aplicados filtros para selecionar os trabalhos mais relevantes de acordo com os objetivos deste estudo. Após a seleção dos artigos, foi realizada uma leitura minuciosa para extrair as informações pertinentes ao tema, tais como conceitos teóricos, aplicações práticas, avanços tecnológicos e desafios atuais. Além disso, foram analisadas as referências bibliográficas dos artigos selecionados a fim de identificar trabalhos complementares que pudessem enriquecer a fundamentação teórica e prática deste artigo.

Por fim, os dados e informações obtidos foram organizados e analisados de forma a construir uma fundamentação sólida e atualizada sobre o tema do gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) e seu papel na geração de energia eólica, bem como os desafios e avanços no controle de conversores aplicados a esse sistema. Dessa forma, a metodologia adotada permitiu uma abordagem abrangente e fundamentada, contribuindo para a construção de um artigo consistente e relevante no contexto da energia eólica e dos geradores de indução duplamente alimentados.

4. CONCLUSÕES

A presente revisão bibliográfica abordou a problemática do DFIG (Gerador de Indução de Dupla Alimentação) e sua aplicação em sistemas de energia eólica. As pesquisas analisadas evidenciaram avanços significativos no desenvolvimento de estratégias de controle, modelagem e operação desse tipo de gerador, visando aprimorar sua eficiência e desempenho.

Dessa forma, de acordo com a revisão bibliográfica realizada, observa-se que há uma clara tendência de crescimento no interesse pela tecnologia DFIG, tanto por parte da comunidade acadêmica quanto da indústria de energia renovável. Os estudos revisados apontam para a importância do DFIG como uma opção viável e eficiente para a geração de energia eólica, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Diante disso, é fundamental que as pesquisas e desenvolvimentos na área do DFIG continuem a ser incentivados, visando aprimorar ainda mais sua integração aos sistemas de energia eólica, garantindo assim um futuro mais sustentável e promissor para a geração de eletricidade.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PINTO, M. Fundamentos de Energia Eólica.: Grupo GEN, 2012. E-book. ISBN 978-85-216-2193-5. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2193-5/>>. Acesso em: 02 fev. 2024.
- [2] BRASIL. Plano decenal de expansão de energia 2019. Brasília, DF: MME/EPE, 2010. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-52/topico-89/Relatório%20Final%20do%20PDE%202019.pdf>>. Acesso em: 4 fev. 2024.
- [3] MENDES, R. et al., A review of wind energy in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012.
- [4] ABEEólica (2022). Anuário Estatístico da ABEEólica 2022. Associação Brasileira de Energia Eólica. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>>. Acesso em: 14 fev. 2024
- [5] HEIER, S. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons, 2006.
- [6] ZHU, Z. Q.; HU, J. Electrical machines and power-electronic systems for high-power wind energy generation applications: Part II - power electronics and control systems. COMPEL - The International Journal for

Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2013. DOI: <<https://doi.org/10.1108/03321641311293740>>.

[7] B. WU, Y. LANG, N. ZARGARI E S. KOURO, Power Conversion and Control of Wind Energy Systems. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/book/6047595>>. Acesso em: 15 fev. 2024.

[8] SILVA, D. et al., Análise Transitória de Falhas em Geradores de Indução Duplamente Alimentados no Contexto de Energia Eólica. 12th Latin American Congress in Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE, 2017. DOI: <<https://doi.org/10.11606/D.3.2018.tde-04052018-102925>>.

[9] ROCHA, M. A. Modelagem e Controle de Gerador de Indução Duplamente Alimentado para Estudo de Sistema de Geração Eólica. UNESP-SP, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/items/a589cdfd-e4ec-428d-9767-69dce53e1ede>>. Acesso em: 10 mar. 2024.

[10] RIBEIRO, L.; ARAÚJO, “Análise do Comportamento do DFIG em uma Rede Elétrica Diante de Afundamentos de Tensão e Falhas Internas Utilizando Técnicas de Controle PI e LQI”, Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica, UFC, Sobral, BR, 2018 Disponível em:<https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/40137/1/2018_dis_lraraujo.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2024.

[11] ENERCON GMGH, Especificações dos dados técnicos da turbina E 48-800 kW. Disponível em:<<http://www.enercon.de>>. Acesso em: 02 mar. 2024

[12] VESTAS WIND SYSTEMS, Especificações dos dados técnicos da turbina V52-850kW. Disponível em:<<http://www.vestas.com>>. Acesso em: 02 mar. 2024

[13] TAVARES, M. M. Uso do Gerador de Indução Duplamente Alimentado como Gerador Eólico. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil. Disponível em:<<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/28109>> . Acesso em: 15 fev. 2024.

[14] MME. Energia Eólica no Brasil e Mundo. [S.l.], 2016. 8 p. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref++2015+%283%29.pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2>>. Acesso em: 9 mar. 2024

[15] CAMPOS, N. C. S., & FERRARI, H. O. Análise da Modelagem do Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG) nos Softwares Simulink e ATP. Universidade do Estado de Minas Gerais – Unidade Ituiutaba, [S. l.], p. 1-6, 7 nov. 2020. Disponível em: <https://www.peteletricaufu.com.br/static/ceel/artigos/artigo_585.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2024.

[16] PENA, R. et al., Doubly Fed Induction Generator using Back-to-Back PWM Converters and its Applications to Variable-Speed Wind-Energy Generation. IEEE Proceedings - Electric Power Applications ,1996. Disponível em: <https://web.mit.edu/kirtley/binlustuff/literature/converter/Back-Backconverter-DFIM.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2024

[17] MULLER, S. et al., Doubly Fed Induction Generator Systems For Wind Turbines. IEEE Industry Applications Magazine, 2002. Disponível em:<<https://ieeexplore.ieee.org/document/999610>>. Acesso em: 10 mar. 2024

[18] ALMEIDA, R. G. et al., Improving power system dynamic behavior through doubly-fed induction machine controlled by static converter using fuzzy control. IEEE Transactions on Power Systems, 2004. Disponível em:<<https://ieeexplore.ieee.org/document/1350834>>.

[19] LIMA, A. K. F. et al., Controle De Gerador De Indução Duplamente Alimentado Diante De Afundamentos De Tensão. Eletrônica De Potência, 2008. Disponível em: <<https://sobraep.org.br/site/uploads/2018/06/rvol14no3p10.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2024

[20] TIMBUS, A., et al., Evaluation of Current Controllers for Distributed Power Generation Systems. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009. Disponível em:<<https://ieeexplore.ieee.org/document/4801680>>. Acesso em: 14 mar. 2024

[21] ALBUQUERQUE, L. T.; PINTO, V. P. Optimal Control Applied in Wind systems Load Nonlinear and Random Wind. Revista IEEE América Latina , v. 14, p. 3130-3137, 2016. Disponível em:<<https://ieeexplore.ieee.org/document/7587612>>. Acesso em: 14 mar. 2024