

SUBMETIDO 10/08/2021

APROVADO 08/11/2021

PUBLICADO ON-LINE 03/12/2021


PUBLICADO 30/06/2023


EDITOR ASSOCIADO
Tarso Vilela Ferreira

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6267>

ARTIGO ORIGINAL

Análise, modelagem, controle e simulação do conversor do lado da máquina de um DFIG

 Maria Valéria Limeira da Costa Almeida ^{[1]*}

 Adriano Aron Freitas de Moura ^[2]

 Ednardo Pereira da Rocha ^[3]

 Ailson Pereira de Moura ^[4]

[1] leralimeira@gmail.com

[2] adrianoaron@ufersa.edu.br

[3] ednardo.pereira@ufersa.edu.br

Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Brasil

[4] ailson@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará (UFC), Brasil

RESUMO: A energia elétrica é indispensável na sociedade atual, tanto no setor residencial quanto no industrial, além de ser um dos principais influenciadores no avanço tecnológico. Aliada à preocupação com o meio ambiente, surge a necessidade cada vez maior de fontes de energia renováveis. Dessa forma, vem crescendo a participação da energia eólica na matriz energética nacional, e, com isso, os estudos relacionados à melhoria da eficiência, estabilidade e qualidade da energia injetada. Neste trabalho, foi utilizado o software ATP (*Alternative Transient Program*) para realizar a simulação de um gerador de indução duplamente alimentado (*Doubly Fed Induction Generator* – DFIG), atuando no modo supersíncrono e com barramento CC de 3,5 kV. O controle foi realizado com a utilização de um controlador *back-to-back*, porém, considerando apenas o conversor do lado da máquina (CLM). O método de controle utilizado foi o Proporcional-Integral (PI) para controlar a potência do estator em 666 kW. A implementação do controle se deu de forma a extrair da máquina a potência desejada, tanto em condições normais de operação quanto na presença de distúrbios na rede. Portanto, foi aplicado o curto-circuito trifásico-terra para analisar o comportamento do controlador na presença de distúrbios equilibrados.

Palavras-chave: ATP; *back-to-back*; controlador PI; DFIG; energia eólica.

Analysis, modeling, control and simulation of the machine side converter of a DFIG

ABSTRACT: Electric energy is indispensable in today's society, both in the residential and industrial sectors, in addition to being one of the main influencers on technological advances. Allied to the concern for the environment, there is a growing need for renewable energy sources. Thus, wind energy has increased its participation in the national energy matrix, and with it, studies related to improving the efficiency, stability and quality of injected energy. In this work, the ATP (*Alternative Transient Program*) software was used to simulate a doubly-fed induction generator (DFIG), acting in supersynchronous mode, with a 3.5 kV DC bus. The control was carried out through a *back-to-back* controller, however, considering only the machine-side converter (CLM). The control method used was Proportional-Integral (PI) to control

*Autor para correspondência.

the stator power in 666 kW. It was implemented in such a way as to extract the desired power from the machine, both in normal operating conditions and in the presence of disturbances in the network. Therefore, a three-phase-to-ground short circuit was applied to analyze the behavior of the controller in the presence of balanced disturbances..

Keywords: ATP; back-to-back; DFIG; PI controller; wind energy.

1 Introdução

A disponibilidade de energia está diretamente relacionada ao progresso industrial, econômico e à qualidade de vida em um país. Dessa forma, surge a necessidade de aumento da diversificação da matriz energética brasileira, e as fontes de energias renováveis recebem grande destaque, principalmente em decorrência das crescentes preocupações ambientais em reduzir ao máximo a utilização de fontes fósseis. Uma fonte de energia que vem se mostrando bastante promissora ao longo dos anos é a energia eólica, proveniente das forças dos ventos. Isso se dá principalmente devido ao fato de o Brasil ter um alto potencial eólico (PEREIRA; MARTINS, 2018).

Tendo em vista o aumento da utilização de energia eólica, é de suma importância o constante desenvolvimento de estudos que visem à melhoria da eficiência do sistema, da estabilidade e da qualidade da energia injetada na rede. Para a realização desses diversos estudos, sugere-se a utilização de ferramentas computacionais que aproximem o sistema simulado do sistema real, de modo que seja possível realizar a análise tanto em regime permanente quanto em regime transitório. O ATP (*Alternative Transient Program*), por exemplo, é um software gratuito bastante aplicado no setor elétrico para a simulação de transitórios eletromagnéticos (SAMUEL NETO *et al.*, 2005).

Atualmente, as tecnologias utilizadas para a geração de energia eólica se dividem praticamente em duas: geradores de velocidade fixa (ligados diretamente à rede elétrica) e os de velocidade variável (utilizam controladores para fazer a variação da velocidade). Uma das tecnologias de geradores mais aplicadas à geração eólica na atualidade é o gerador de indução duplamente alimentado (*Doubly Fed Induction Generator – DFIG*) (ZHU; HU, 2013).

O gerador de indução duplamente alimentado possibilita um controle das potências ativa, reativa e do fator de potência da máquina, além de ser de fácil construção e manutenção (OLIVEIRA, 2016). Dependendo da sua potência e velocidade, alguns modos de operação da turbina podem ser estabelecidos, como, por exemplo, o modo na velocidade supersíncrona e na subsíncrona, em que a velocidade do rotor é maior ou menor que a velocidade síncrona, respectivamente (WU *et al.*, 2011).

O DFIG utiliza um gerador de indução com rotor bobinado. Seu estator é ligado diretamente à rede e seu rotor é conectado a um conversor *back-to-back* (YAZDANI; IRAVANI, 2010), que utiliza técnicas de modulação de largura de pulso (*Pulse Width Modulation – PWM*) para realizar o controle da tensão e, conseqüentemente, da potência ativa e reativa do sistema. Esse conversor é formado por um retificador (Conversor do Lado da Máquina – CLM), um barramento CC e um inversor (Conversor do Lado da Rede – CLR) e é responsável por regular as tensões e correntes para a correta conexão com a rede (ROCHA, 2018).

No trabalho de Araújo (2018), foi realizada uma análise do comportamento do DFIG perante afundamentos de tensão e falhas internas da rede, tendo sido utilizadas as técnicas

de controle PI (Proporcional-Integral) e LQI (*Linear Quadratic Integral*). Diante disso, foi possível observar diferentes cenários de afundamentos de tensão; apesar de o LQI se sair melhor em algumas situações, as duas técnicas foram satisfatórias para o controle do DFIG. Enquanto isso, em Samuel Neto *et al.* (2005) foram realizadas modelagens de diferentes geradores, tendo sido utilizado o software ATPDraw para analisar os efeitos da conexão com a rede. Dessa forma, três modelos de geradores foram considerados: o gerador de indução com rotor tipo gaiola, o gerador de indução duplamente alimentado e o gerador síncrono de ímã permanente. Assim, foi observado que o ATPDraw é capaz de ser utilizado para analisar os efeitos da conexão de aerogeradores à rede elétrica, desde que todos os equipamentos do sistema sejam modelados de maneira correta.

Este trabalho detém-se em uma análise de um gerador de indução duplamente alimentado, utilizando apenas o controlador do lado da máquina, que opera com o método de controle Proporcional-Integral (PI) para processar os valores de erros dos eixos direto e quadratura; essa escolha foi pensada para efeitos de simplificação matemática. O principal objetivo do presente trabalho é analisar o efeito do conversor do lado da máquina em um sistema baseado em um gerador de indução duplamente alimentado utilizando o controle PI para controlar a potência de saída em situações de funcionamento normal ou com instabilidade na rede, utilizando simulações no software ATP.

As próximas seções do presente trabalho apresentam os conceitos utilizados para a modelagem do sistema de geração no software ATP, os modelos matemáticos aplicados, assim como a descrição de todos os processos realizados para a obtenção dos resultados da atuação do controlador na presença de distúrbios equilibrados.

2 Modelagem do sistema de geração

A modelagem do sistema do gerador de indução duplamente alimentado trará informações relevantes para o entendimento do funcionamento do circuito simulado, porém de forma simples e resumida. Posto isso, esta seção será dividida em três partes: modelo do gerador de indução duplamente alimentado (DFIG), representação dos ventos e modelagem da rede elétrica. O sistema de geração modelado no ATP conta com um DFIG, que atua no modo supersíncrono, com tensão no barramento CC de 3,5 kV, e utiliza a técnica de controle PI para obter a potência de 666 kW no estator da máquina. As simulações realizadas se limitaram a menos de um segundo, já que os fenômenos analisados se apresentam dentro desse intervalo.

2.1 Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG)

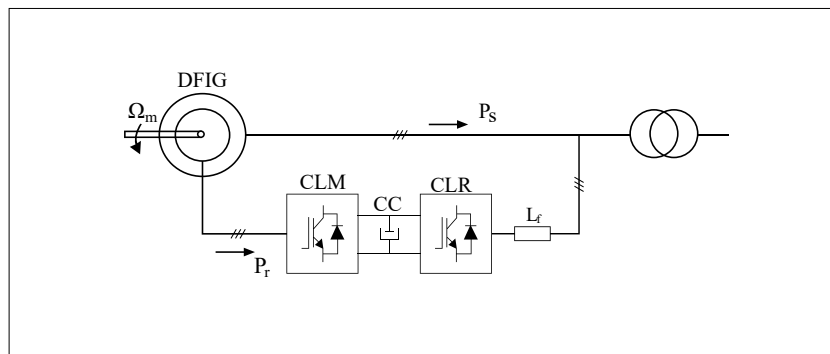
O DFIG é uma máquina de indução que já vem sendo utilizada há aproximadamente duas décadas. A sua topologia se dá basicamente pelo fato de tanto o rotor quanto o estator estarem conectados à rede elétrica, porém, com a diferença de que a conexão do lado do rotor é feita de forma indireta, por meio de um conversor, chamado de *back-to-back* (PINTO, 2012). Isso torna o DFIG uma aplicação viável financeiramente, uma vez que, ao contrário de outros modelos, o conversor terá que operar com apenas um terço da potência do gerador.

Na Figura 1 (próxima página) é apresentado o sistema simplificado de conexão do DFIG, operando no modo supersíncrono, em que a velocidade do rotor é maior que a velocidade síncrona, ou seja, o escorregamento é negativo (CALZOLARI; SALDAÑA, 2013).

Figura 1 ►

Sistema de conexão do DFIG à rede.

Fonte: adaptado de Araújo (2018).



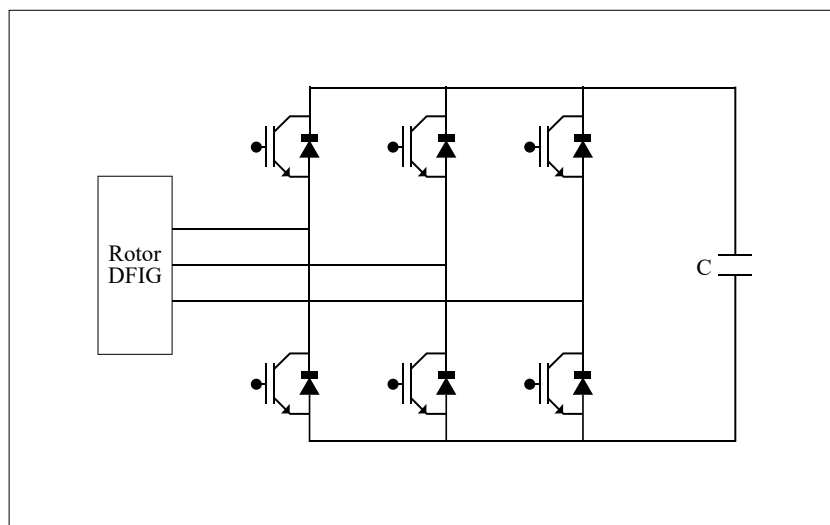
Na Figura 1 é possível observar o *back-to-back*, formado pelo conversor do lado da máquina, o barramento CC e o conversor do lado do rotor. Todavia, a análise irá se limitar ao conversor do lado da máquina, que é responsável por controlar as potências ativas e reativas, e ao barramento CC, que deve suportar as variações das tensões da rede e do rotor.

Na Figura 2 observa-se a configuração do CLM formado por seis chaves, acionadas por sinais da modulação por largura de pulso (PWM), que tem como objetivo determinar a ordem de abertura e fechamento das chaves. Assim, foi possível realizar o controle das potências ativas e reativas da máquina de forma independente; foram utilizadas estratégias de controle vetorial para a geração desse sinal (SILVA, 2018).

Figura 2 ►

Conversor do lado da máquina com barramento CC.

Fonte: adaptado de Rocha (2018).



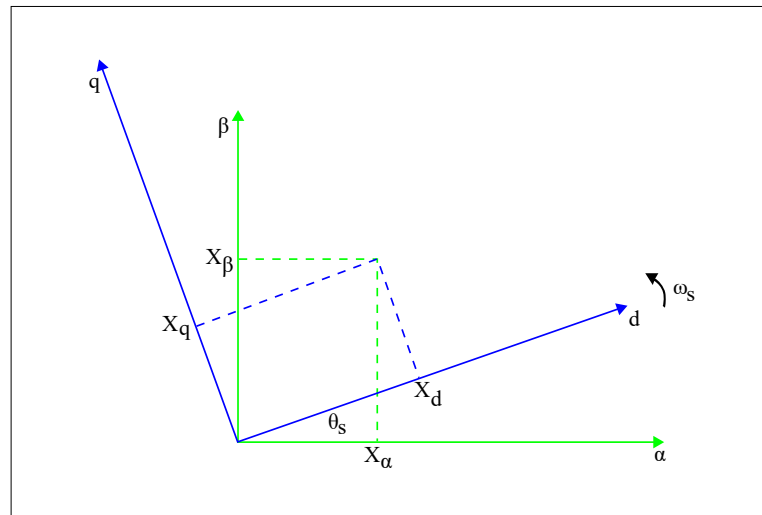
O controle vetorial é utilizado para que seja possível realizar o controle de máquinas de corrente alternada, de modo que se utilizam técnicas lineares e se adota um referencial estacionário, podendo-se, dessa forma, aplicar a técnica de controle PI para o DFIG e fazer uma manipulação nos dados alternados por meio de vetores espaciais (ABAD; IWANSKI, 2014). Os modelos matemáticos que tornam possíveis essas manipulações são complexos, pois trata-se de equações diferenciais com indutâncias mútuas variantes no tempo (ARAÚJO, 2018).

Dois modelos matemáticos são utilizados nesta simulação, em que basicamente se alteram os eixos de referência dos vetores de tensão e corrente de *abc* passando para *αβ* (transformada de Clarke) e *dq* (transformada de Park). Na Figura 3 é possível verificar a posição de *dq* em relação a *αβ*.

Figura 3 ▶

Representação dos eixos $\alpha\beta$ e dq .

Fonte: adaptado de Abad e Iwanski (2014).



A transformada de Clarke possibilita a transformação de um sistema de três coordenadas dependentes do tempo e espaço em um sistema de apenas dois eixos ortogonais também dependentes do tempo e espaço, e mantendo as suas características (TAVARES, 2017). Essa transformada é identificada pelas letras α e β . Através da álgebra matricial é possível fazer a transformação da tensão ou corrente do sistema de coordenadas abc para $\alpha\beta$, utilizando a Equação 1 (a inversa também é válida).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Já com a transformada de Park é possível transformar um sistema de três coordenadas – dependentes do espaço e tempo – em um sistema de duas coordenadas dependentes apenas do espaço, deixando de ser componentes alternados (abc) e passando a ser componentes girantes (dq) (EL-SHARKAWI, 2015). Partindo dos componentes $\alpha\beta$, é possível obter a transformação para os eixos dq por meio da Equação 2. Com algumas manipulações matemáticas também é possível obter a transformação direta das coordenadas abc para dq , através da Equação 3. Da mesma forma, a inversa também é válida para ambos os casos.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\theta & \cos(\theta-120) & \cos(\theta+120) \\ -\text{sen}\theta & -\text{sen}(\theta-120) & -\text{sen}(\theta+120) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para a modelagem do DFIG são necessárias algumas considerações, tais como: enrolamentos idênticos (tanto no rotor quanto no estator), circuito magnético (considerado ideal) e entreferro (praticamente constante). A partir dessas considerações, fazendo o circuito do estator e do rotor ficarem com a mesma frequência – ou seja, o circuito do rotor convertido para o lado do estator –, pode-se chegar às Equações 4 e 5 para tensões do estator e rotor, de modo que os fluxos magnéticos Ψ_s e Ψ_r são dados pelas Equações 6 e 7, respectivamente (ABAD; IWANSKI, 2014, p. 278).

$$\begin{bmatrix} V_{sA} \\ V_{sB} \\ V_{sC} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{sA} \\ I_{sB} \\ I_{sC} \end{bmatrix} + j\omega_s \begin{bmatrix} \psi_{sA} \\ \psi_{sB} \\ \psi_{sC} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} V_{rA} \\ V_{rB} \\ V_{rC} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} I_{rA} \\ I_{rB} \\ I_{rC} \end{bmatrix} + j\omega_r \begin{bmatrix} \psi_{rA} \\ \psi_{rB} \\ \psi_{rC} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{sA} \\ \psi_{sB} \\ \psi_{sC} \end{bmatrix} = L_s \begin{bmatrix} I_{sA} \\ I_{sB} \\ I_{sC} \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} I_{rA} \\ I_{rB} \\ I_{rC} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{rA} \\ \psi_{rB} \\ \psi_{rC} \end{bmatrix} = L_m \begin{bmatrix} I_{sA} \\ I_{sB} \\ I_{sC} \end{bmatrix} + L_r \begin{bmatrix} I_{rA} \\ I_{rB} \\ I_{rC} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Nas Equações 4, 5, 6 e 7, V é a tensão, R a resistência, I a corrente, ω a velocidade angular, Ψ o fluxo magnético, L é a indutância de dispersão e L_m a indutância de magnetização. Os subscritos s e r são referentes ao estator e rotor, respectivamente. Aplicando a transformada de Park nas Equações 4, 5, 6 e 7 para alteração do seu eixo de referência de abc para dq , pode-se obter as Equações 8, 9, 10 e 11. Os circuitos equivalentes da máquina no eixo direto e em quadratura estão apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente (ABAD; IWANSKI, 2014, p. 279).

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \end{bmatrix} \quad \omega_s \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} \quad \omega_r \begin{bmatrix} \psi_{qr} \\ \psi_{dr} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \end{bmatrix} = L_s \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} = L_m \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + L_r \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Figura 4 ►
Circuito equivalente do eixo direto.
Fonte: Abad e Iwanski (2014).

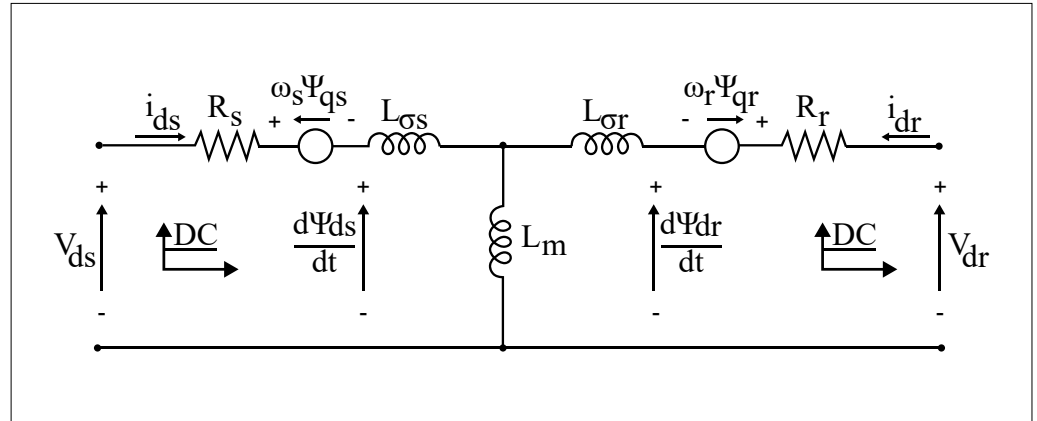
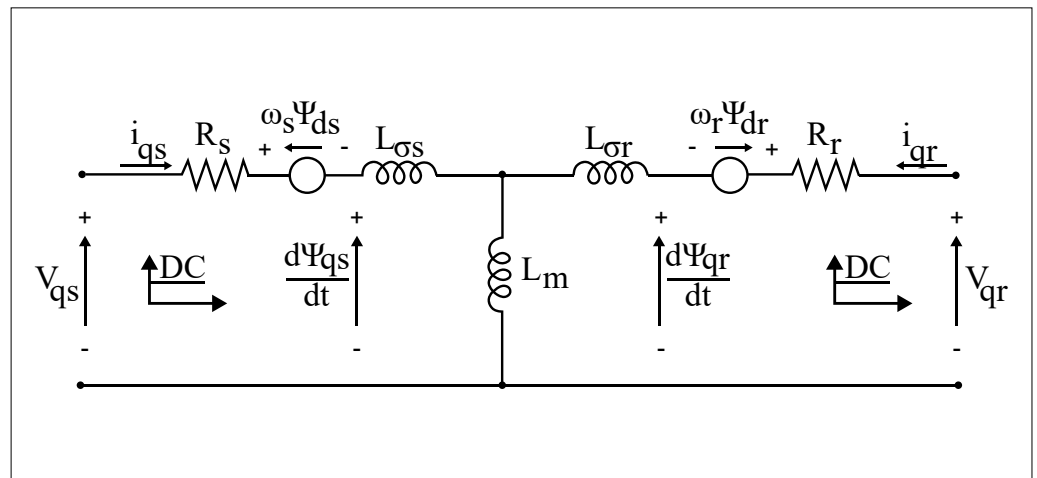


Figura 5 ►
Circuito equivalente do eixo em quadratura.
Fonte: Abad e Iwanski (2014).



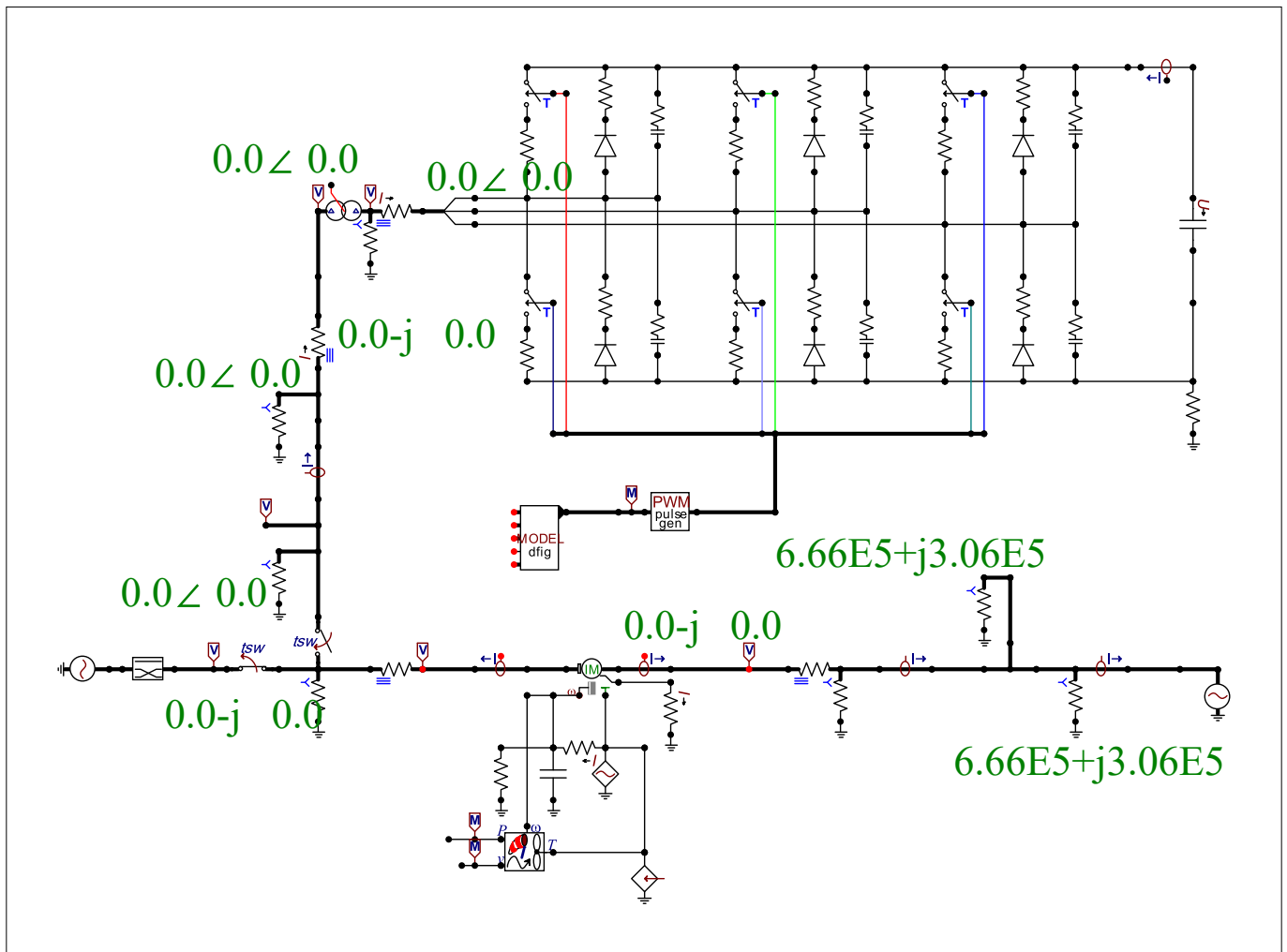
2.2 Representação dos ventos

Os ventos são fenômenos que se apresentam em uma forma bastante complexa, tendo em vista os diversos fatores que influenciam suas características, como a altitude, temperatura e pressão. Visto que o foco do trabalho é verificar o comportamento do controle PI no conversor do lado da máquina em relação a situações de funcionamento normal e da presença de distúrbios na rede, foi considerada, portanto, uma velocidade de vento constante de 11,9 m/s, de modo a produzir um torque eletromagnético suficiente para gerar a potência de 666 kW.

2.3 Modelagem da rede elétrica

O circuito montado no ATP está apresentado na Figura 6, em que é possível observar que boa parte do circuito foi feita a partir da ferramenta “Model”, que pode ser programada para exercer a função de um dispositivo que não esteja presente na biblioteca do software. O conversor foi implementado utilizando chaves ideais e o auxílio de uma “Model” para realizar o controle da abertura das chaves. Todavia, a rede elétrica foi simulada utilizando os dispositivos disponíveis na biblioteca do ATP.

Figura 6 ▼
Circuito simulado no ATP.
Fonte: dados da pesquisa.



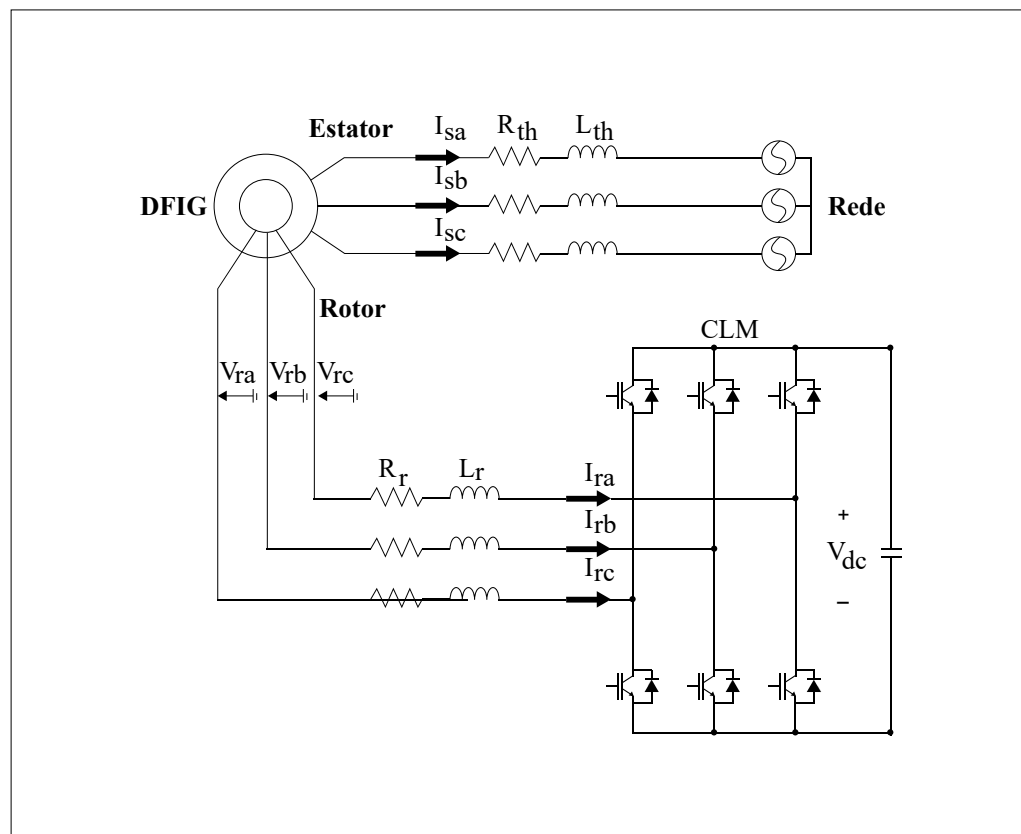
3 Controlador

O controle realizado no DFIG se apresenta na estrutura de cascata, de forma que as saídas dos controladores de corrente são tensões de referência nas quais é gerado o sinal PWM para o controle das chaves. O conversor *back-to-back* controla as correntes do rotor e as potências ativa e reativa injetadas na rede, com cada parte da sua estrutura exercendo um papel específico no controle do DFIG. Como o trabalho foi baseado no conversor do lado da máquina, as subseções desta seção realçam mais informações a respeito da sua modelagem.

3.1 Conversor do Lado da Máquina (CLM)

O conversor do lado da máquina controla a potência ativa e reativa do DFIG, realizando o ajuste da amplitude, fase e frequência da tensão que alimenta o rotor. Para realizar tal controle o CLM utiliza a teoria dos vetores espaciais, de forma a deixar os dados de corrente e tensão da máquina contínuos para aplicar o método de controle PI. Na Figura 7 é observado o circuito de funcionamento simplificado do CLM; nele é possível observar o modo de operação supersíncrono em que o DFIG está trabalhando, a partir da direção da corrente do rotor.

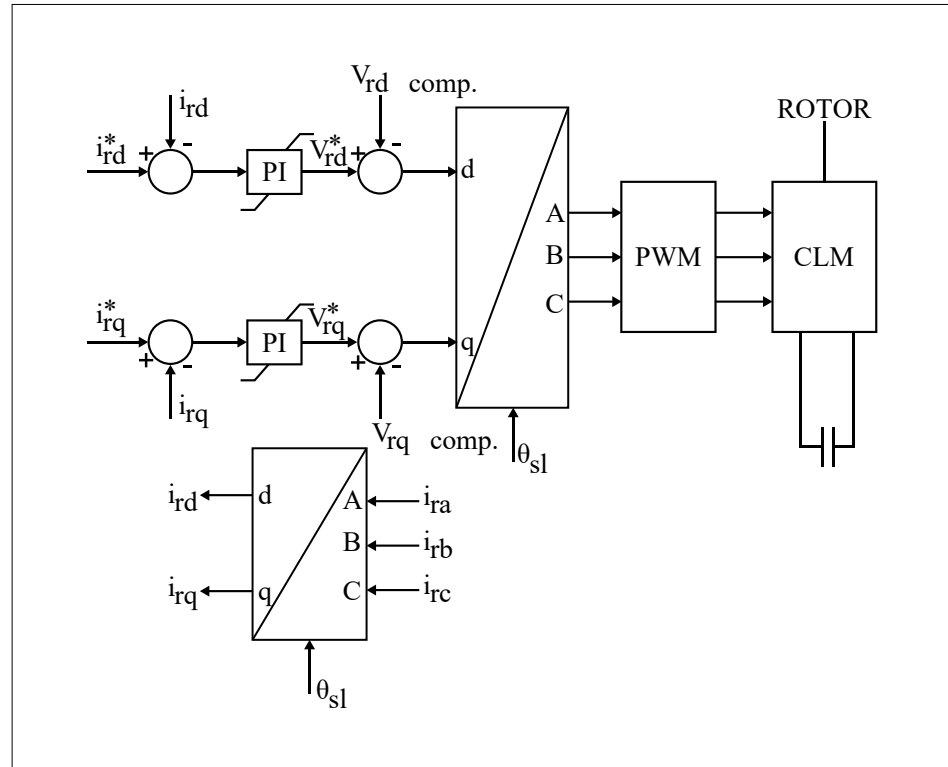
Figura 7 ►
Circuito de conexão do CLM.
Fonte: adaptado de Araújo (2018).



3.2 Projeto do controlador

Para realizar o controle das potências ativa e reativa do estator, o CLM trabalha de acordo com a topologia apresentada na Figura 8 (próxima página). A primeira parte do controle se dá a partir da obtenção das correntes de referência de eixo direto e quadratura do rotor, que são determinadas através do software Scilab, aplicando a Equação 12. Esses valores de correntes de referência são inseridos como entrada no ATP, em seguida comparados com as correntes do rotor, originando um erro que é processado por um controlador PI, resultando em uma tensão de referência desejada no rotor. Através desse procedimento nos eixos direto e quadratura, é possível realizar o controle da potência ativa e reativa no estator. Os valores de σ , ω_s e ω_r são dados através das Equações 13, 14 e 15, respectivamente.

Figura 8 ▶
Topologia de controle do DFIG.
Fonte: adaptado de Oliveira (2016).



$$\begin{cases} Vdr - R_r I_{rdref} - \sigma L_r I_{rdref} + \omega_r \sigma L_r I_{rqref} = 0, \\ Vqr - R_r I_{rqref} - \sigma L_r I_{rqref} + \omega_r \sigma L_r I_{rdref} = \frac{\omega_r V_s L_m}{\omega_s L_s}, \end{cases} \quad (12)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \quad (13)$$

$$\omega_s = 2\pi f, \quad (14)$$

$$\omega_r = s \omega_s. \quad (15)$$

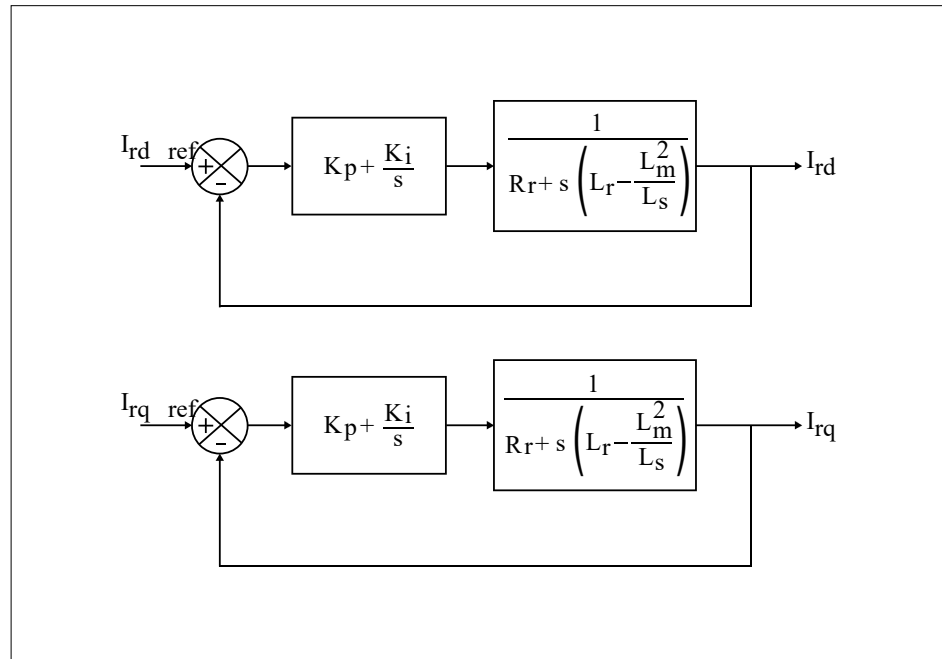
em que σ representa o parâmetro da máquina; R_r a resistência do rotor; L_r a indutância do rotor; L_s a indutância do estator; L_m a indutância de magnetização; ω_r a frequência do rotor; ω_s a frequência do estator; V_s a tensão de fase no estator; I_{rdref} a corrente de referência do eixo direto do rotor; e I_{rqref} a corrente de referência do eixo em quadratura do rotor.

Os parâmetros de controle do controlador PI são K_p e K_i , os quais podem ser calculados por diversos métodos. No presente trabalho foi utilizado o método da compensação de

polos, que consiste em conseguir ganhos que compensem o polo dominante da função de transferência (BOUBZIZI *et al.*, 2018).

Considerando a função de transferência de malha aberta do sistema (Equação 16) apresentado na Figura 9, utiliza-se a estratégia de eliminação dos zeros da função, fazendo a razão entre K_i e K_p igual à Equação 17. Assim, a função de transferência em malha aberta resulta na Equação 18. Em seguida, encontra-se a função em malha fechada (Equação 19), da qual τ é dada pela Equação 20. Logo, é possível obter os ganhos K_p e K_i , apresentados nas Equações 21 e 22, respectivamente.

Figura 9 ▶
Malhas de controle DFIG.
Fonte: adaptado de
Oliveira (2016).



$$G(s) = \frac{K_p}{s} \left(s + \frac{K_i}{K_p} \right) \left(\frac{L_s}{(L_s L_r - L_m^2) \left(\frac{L_s R_r}{L_s L_r - L_m^2} + s \right)} \right) \quad (16)$$

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s L_r - L_m^2} \quad (17)$$

$$G(s) = \frac{K_p L_s}{s (L \parallel s L_r - L_m^2)} \quad (18)$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (19)$$

$$\tau = \frac{L_s L_r - L_m^2}{K_p L_s} \quad (20)$$

$$K_p = \frac{L_s L_r - L_m^2}{\tau L_s} \quad (21)$$

$$K_i = \frac{R_r}{\tau} \quad (22)$$

4 Resultados

Nesta seção, os principais resultados obtidos com a simulação do DFIG no ATP são apresentados com o objetivo de analisar o comportamento do controlador PI diante de situações de funcionamento normal e com distúrbios na rede elétrica. O circuito do sistema simulado está apresentado na Figura 6, de forma que a modelagem de todas as partes do sistema foi realizada de acordo com os cálculos e as teorias apresentadas no decorrer do trabalho. No Quadro 1 são apresentados os principais parâmetros de modelagem considerados na simulação do DFIG.

Quadro 1 ►
Parâmetros do sistema modelado no ATP.
Fonte: dados da pesquisa.

Parâmetros do sistema modelado	
Potência da turbina	666 kW
Número de polos	4
Resistência do estator	0,0027 Ω
Indutância do estator	0,0795 mH
Resistência do rotor	0,0022 Ω
Indutância do rotor	0,146 mH
Indutância de magnetização	4,39 mH
Escorregamento	-10,85%

Antes de iniciar a simulação do sistema no ATP, foi necessário o cálculo das correntes de referência do rotor para adicionar ao bloco do controlador. Esse cálculo foi realizado por meio do software Scilab e utilizou-se o sistema apresentado na Equação 12, que

mostra I_{rdref} igual a -445 A e I_{rqref} igual a -966 A, conforme ilustrado nas Figuras 10 e 11, respectivamente. Após o cálculo das correntes de referência, foi possível realizar a simulação do sistema no ATP.

Figura 10 ►

Gráfico da corrente de referência do rotor em eixo direto, obtido através do Scilab.

Fonte: dados da pesquisa.

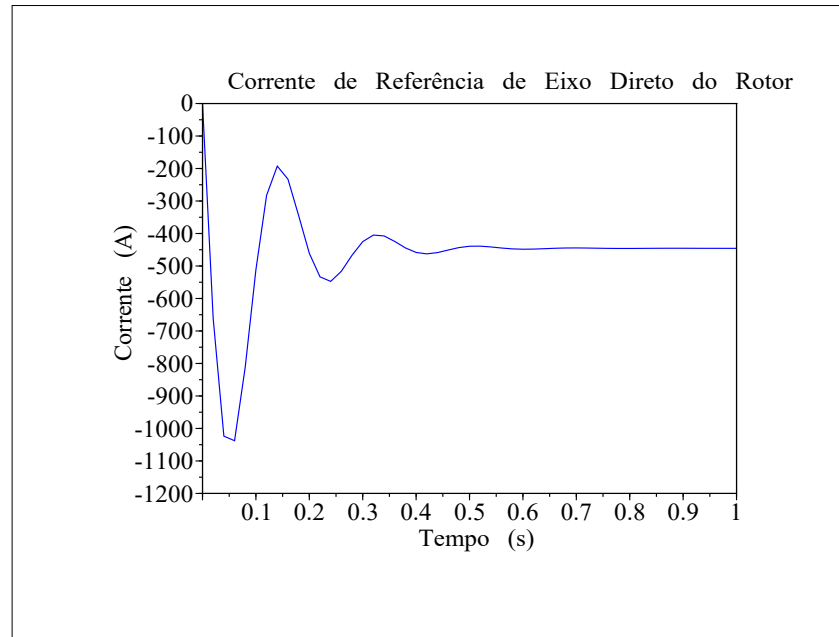
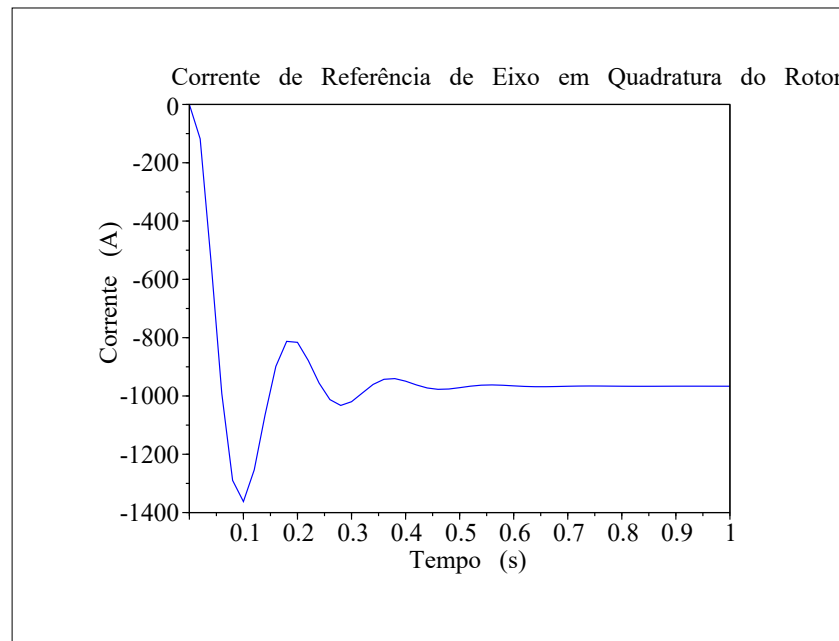


Figura 11 ►

Gráfico da corrente de referência do rotor em quadratura, obtido através do Scilab.

Fonte: dados da pesquisa.



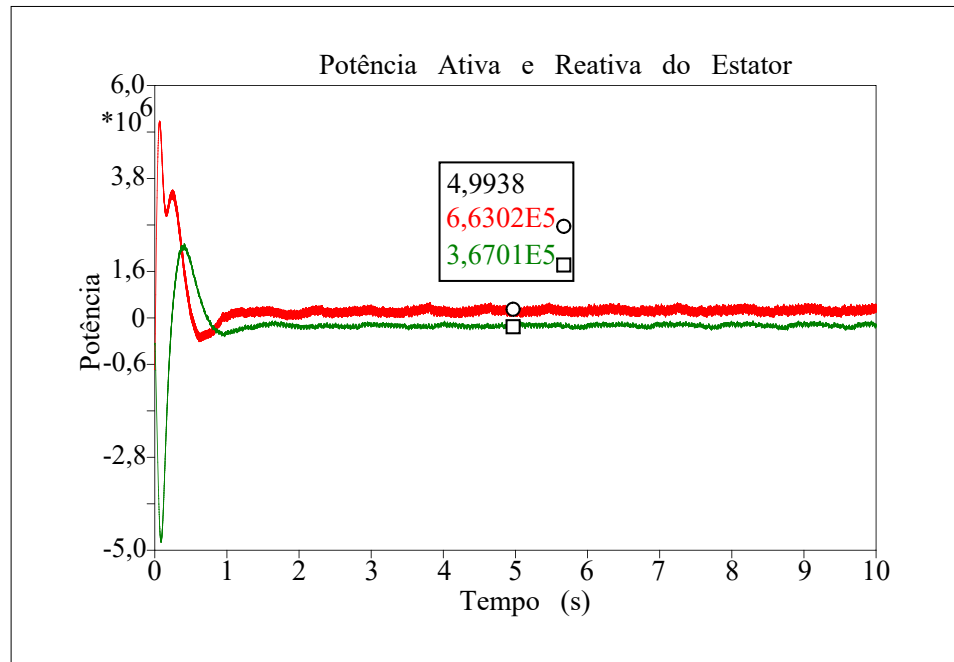
4.1 Funcionamento em regime normal do sistema

A primeira simulação foi realizada com o sistema sem nenhum tipo de curto-circuito aplicado, assim foi possível analisar se o funcionamento do circuito estava como esperado. Na Figura 12 (próxima página) é possível observar a potência do estator: a curva superior é a potência ativa – que ficou em torno de 666 kW – e a curva inferior é a potência reativa – em torno de 305 kVar. Além disso, é possível perceber que o sistema rapidamente se estabiliza em menos de 1,2 s.

Figura 12 ►

Potência ativa e reativa no estator.

Fonte: dados da pesquisa.



Além das potências do estator, é importante observar os demais parâmetros elétricos do circuito, com o objetivo de identificar se estão se comportando da maneira esperada. A tensão no barramento CC é apresentada no gráfico da Figura 13, no qual é possível observar que a tensão se estabiliza em 3,5 kV e mais lentamente que a potência. Isso se deve ao tempo de carregamento do capacitor.

O gráfico da tensão no estator está apresentado na Figura 14, em que se pode observar uma tensão de pico de 560 V, que se mantém durante todo o intervalo analisado. Enquanto isso, a tensão do rotor, mostrada na Figura 15, apresenta uma forma de onda chaveada devido ao resultado do chaveamento do conversor CLM. As correntes do estator e rotor são apresentadas nas Figuras 16 e 17. É possível observar que elas apresentam uma diferença de frequência bem visível, que se deve ao fato de a frequência do rotor ser dada pelo produto entre o escorregamento (s) e a frequência do estator.

Figura 13 ►

Tensão do barramento CC.

Fonte: dados da pesquisa.

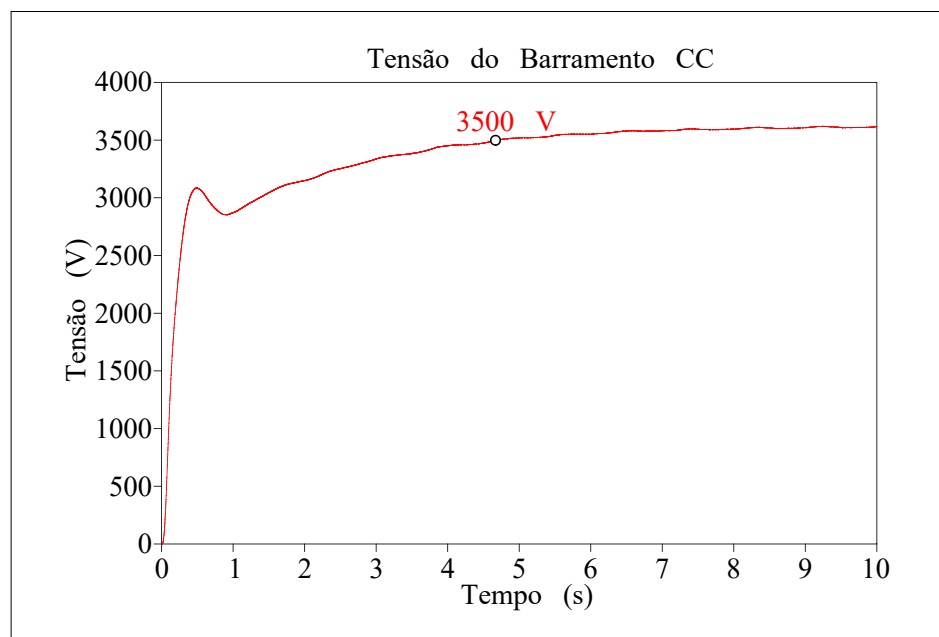


Figura 14 ►

Tensão do estator.
 Fonte: dados da pesquisa.

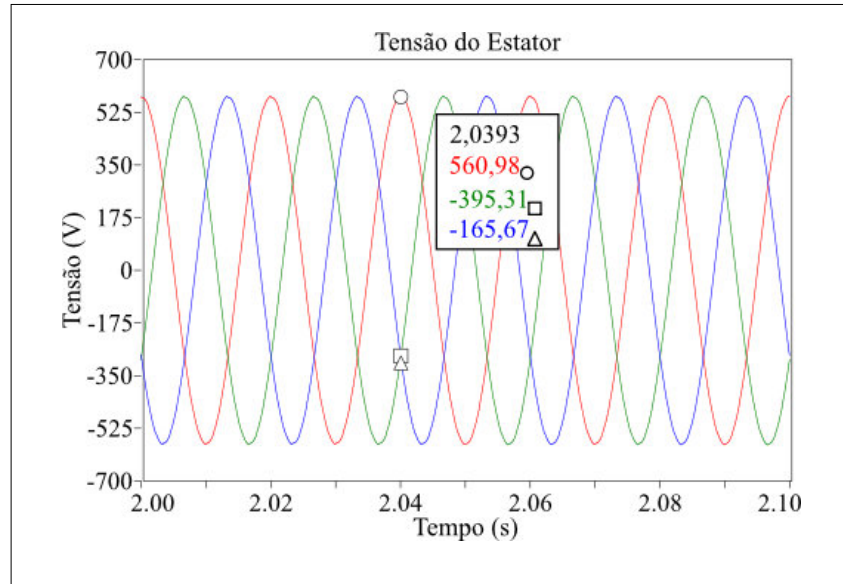


Figura 15 ►

Tensão do rotor.
 Fonte: dados da pesquisa.

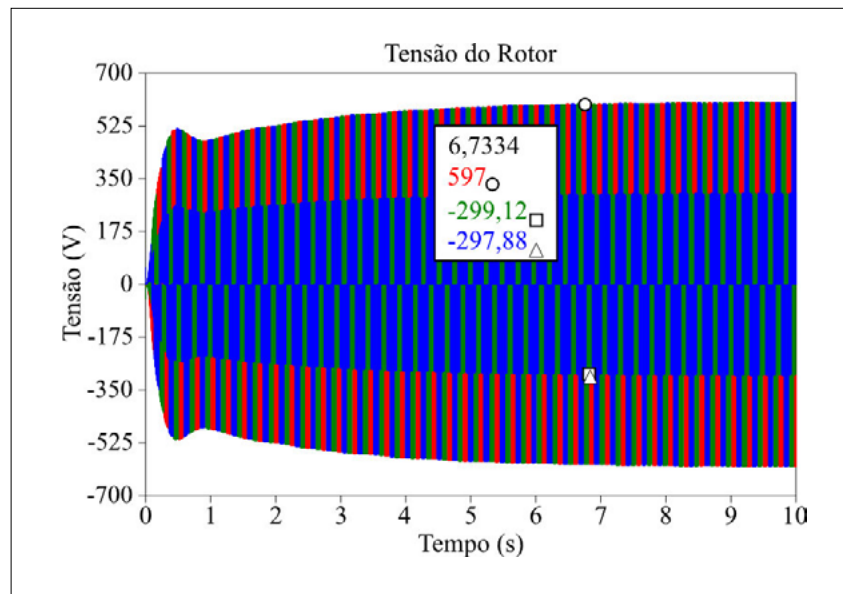


Figura 16 ►

Corrente do estator.
 Fonte: dados da pesquisa.

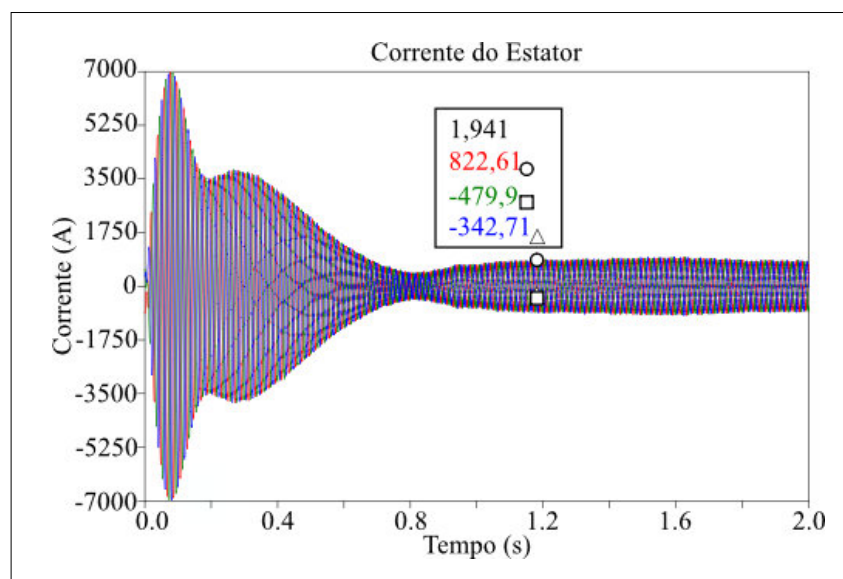
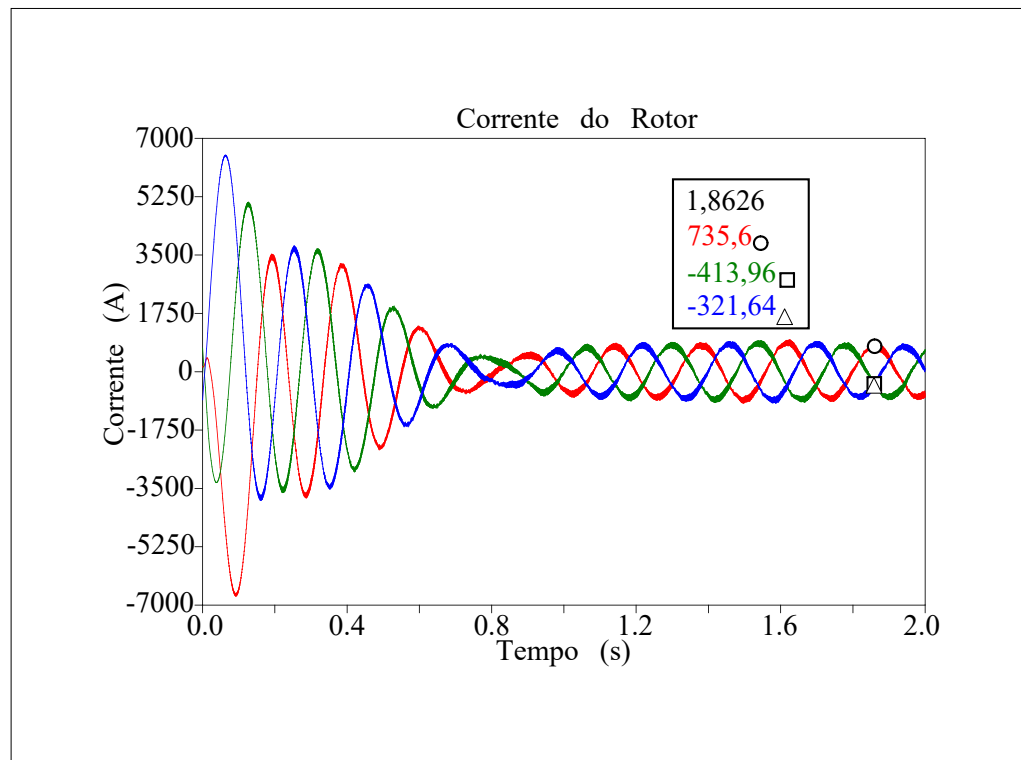


Figura 17 ►
Corrente do rotor.
Fonte: dados da pesquisa.



4.2 Comportamento na presença de curto-circuito

Para uma maior garantia do funcionamento do controlador, foi necessário avaliar a sua atuação diante de distúrbios ocorrendo no sistema. Para tanto, foi aplicado um curto-circuito trifásico-terra, no instante de tempo 2 s, com duração de 0,5 s, na saída do estator.

A análise do curto foi estabelecida com um tempo possível para a extinção deste pela ação do disjuntor. Tempos de duração maiores são feitos para se investigar a ação de controle no *fault ride-through* do DFIG, sendo o tempo de operação do *fault ride-through* considerado um tempo crítico na operação da máquina.

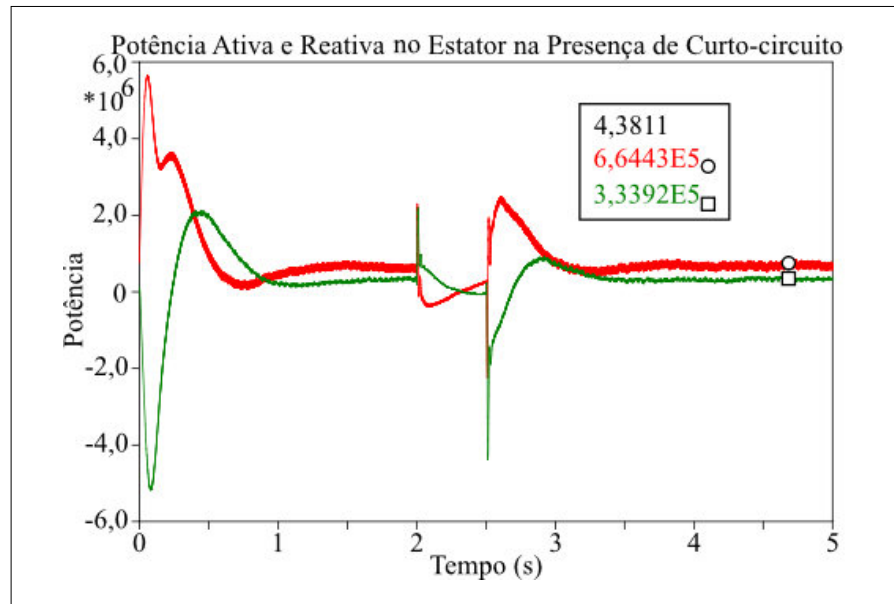
Como resultado da análise do sistema na presença de curto-circuito, obteve-se a potência do estator apresentada na Figura 18 (próxima página), na qual é possível observar a atuação do controle PI. Quando o curto-circuito acontece, de imediato o controlador procura estabilizar as potências e, assim que encerra, rapidamente o sistema volta ao seu estado de funcionamento normal. Esses resultados demonstram que o controlador PI funciona de maneira satisfatória.

Estudos de estabilidade transitória, para os quais são feitas as modelagens dessa ação de controle dos controladores PI do DFIG, analisam a alteração no valor das variáveis do DFIG em um intervalo em torno de 1 s ou um pouco mais que isso. A resposta da ação de controle em 0,4 s atende a recuperação do controle da máquina dentro do intervalo sob estudo, que compreende aproximadamente 1 s. Em 0,4 s é possível observar a rápida recuperação das grandezas elétricas do DFIG como potências ativa e reativa para o estado normal de operação. Da mesma forma, pode-se analisar os demais parâmetros elétricos do sistema.

Figura 18 ►

Potência ativa e reativa do estator na presença de curto-circuito.

Fonte: dados da pesquisa.



Na tensão do barramento CC (apresentada no gráfico da Figura 19) fica perceptível a interrupção no carregamento do capacitor e, após o fim do curto-circuito, a retomada do carregamento de forma mais rápida, devido ao pico de tensão aplicado pelo controlador PI para estabilizar o sistema. No gráfico da tensão do estator (apresentado na Figura 20) observa-se uma queda considerável da tensão no momento do distúrbio. Uma das causas para isso decorre da severidade do curto-circuito trifásico-terra, mas, apesar disso, o gerador consegue se recuperar e retornar ao seu funcionamento normal.

No gráfico da Figura 21 apresenta-se a operação da tensão no rotor no momento do surto. É possível observar que esta não sofreu muita influência do curto-circuito, o que já era esperado, uma vez que os surtos oriundos da rede têm uma menor influência no lado do rotor. Nas Figuras 22 e 23 apresentam-se os gráficos das correntes do estator e do rotor mediante o curto-circuito. Percebe-se que ambas possuem um comportamento semelhante. Elas tendem ao zero, mas não o fazem imediatamente devido às suas características indutivas. Após o curto-circuito se extinguir, essas correntes voltam a se normalizar.

Figura 19 ►

Tensão do barramento CC na presença de curto-circuito.

Fonte: dados da pesquisa.

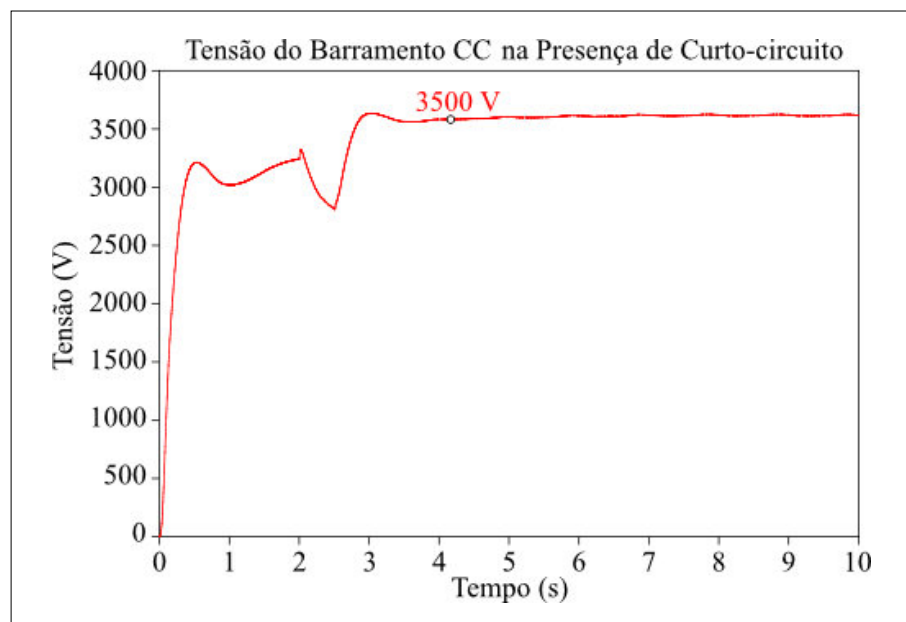


Figura 20 ▶

Tensão do estator na presença de curto-circuito.
 Fonte: dados da pesquisa.

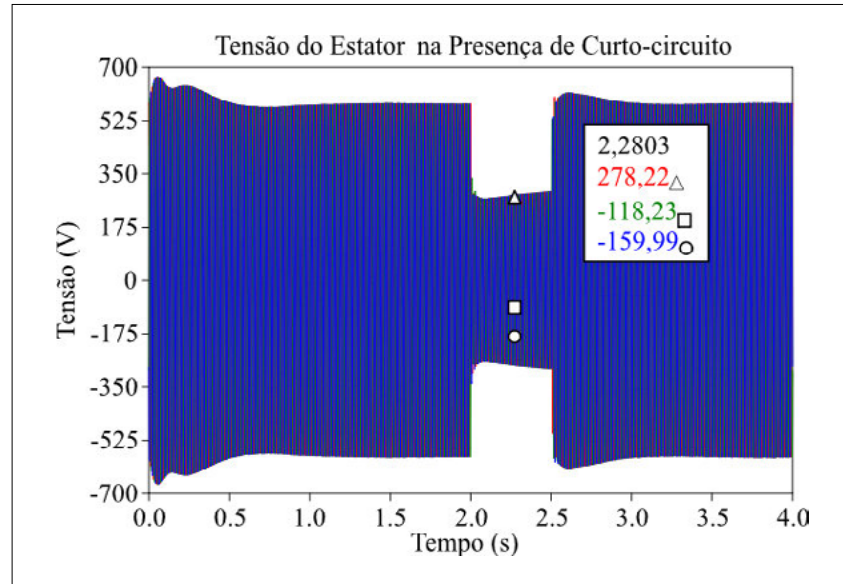


Figura 21 ▶

Tensão do rotor na presença de curto-circuito.
 Fonte: dados da pesquisa.

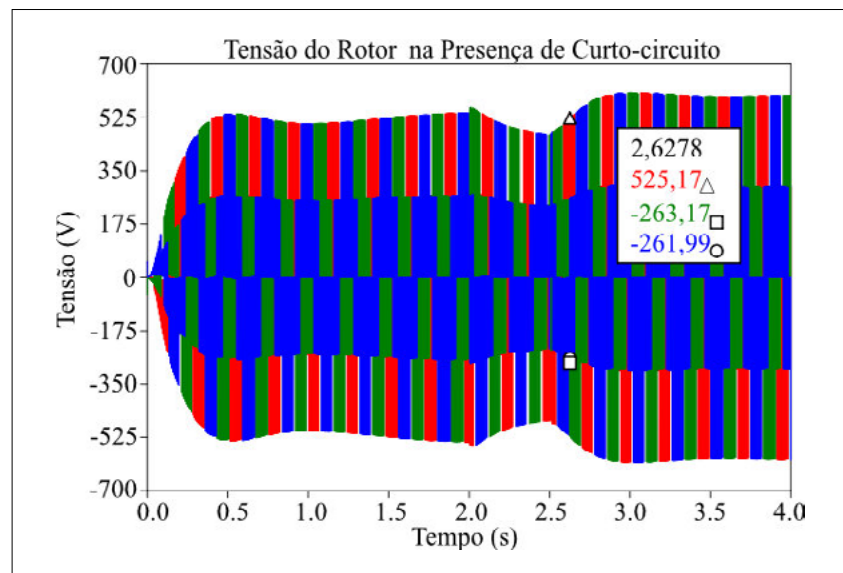


Figura 22 ▶

Corrente do estator na presença de curto-circuito.
 Fonte: dados da pesquisa.

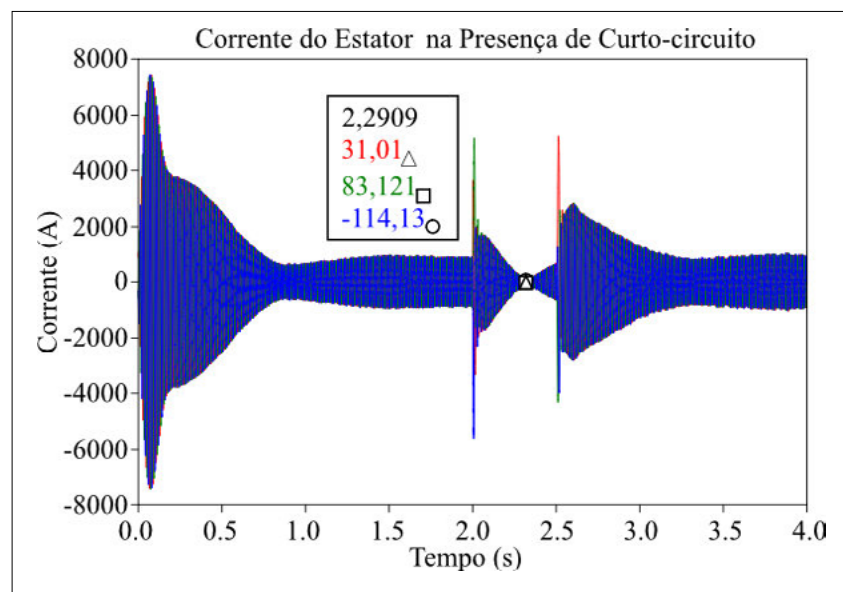
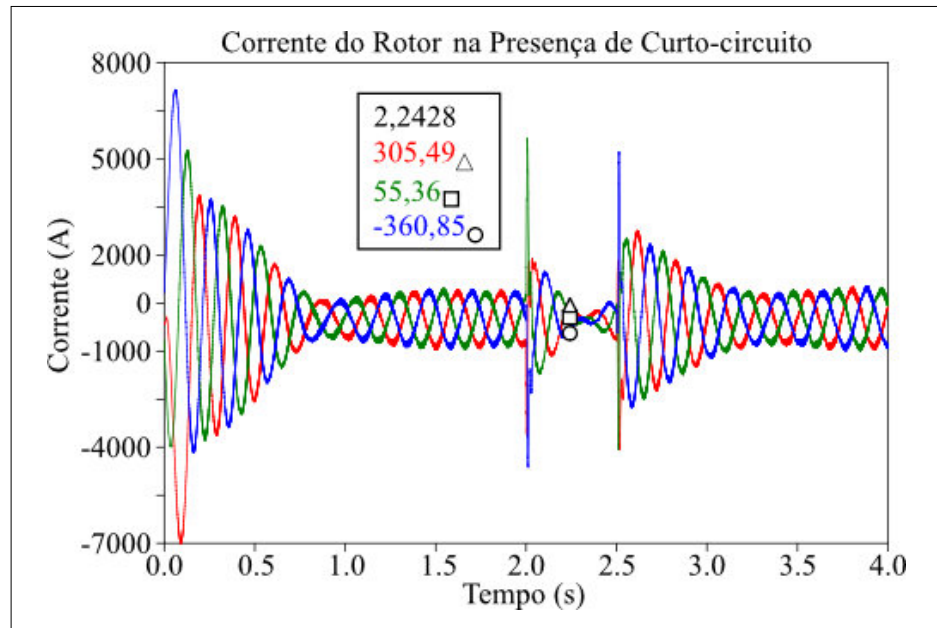


Figura 23 ►

Corrente do rotor na presença de curto-circuito.

Fonte: dados da pesquisa.



5 Conclusão

A partir dos resultados das simulações, foi possível analisar o comportamento dos parâmetros elétricos em diversos pontos do circuito, de modo que se verificou o desempenho do controle PI em restabelecer o sistema ao seu funcionamento normal, mesmo diante de curtos-circuitos oriundos da rede elétrica. Diante disso, pode-se afirmar que a atuação do controle foi realizada de forma satisfatória, tendo em vista o fato de este não possuir filtros para redução de harmônicas.

Os resultados obtidos neste artigo mostraram a funcionalidade do ATP para a simulação de sistemas eólicos. Dessa forma, diversos estudos de melhoria no desempenho do sistema, por meio da implementação do controlador do lado da rede e de ferramentas como o *crowbar* ou filtros LCL, podem ser explorados em trabalhos futuros.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABAD, G.; IWANSKI, G. Properties and control of a doubly fed induction machine. In: ABU-RUB, H.; MALINOWSKI, M.; AL-HADDAD, K. **Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications**. United Kingdom: Wiley-IEEE Press, 2014. Cap. 10, p. 270-318. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/book/7753049>. Acesso em: 15 dez. 2021.

ARAÚJO, L. R. **Análise do comportamento do DFIG em uma rede elétrica diante de afundamentos de tensão e falhas internas utilizando técnicas de controle PI e LQI**. 2018. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) – Universidade Federal do Ceará, Sobral, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/40137>. Acesso em: 25 dez. 2021.

BOUBZIZI, S.; ABID, H.; EL-HAJJAJI, A.; CHAABANE, M. Comparative study of three types of controllers for DFIG in wind energy conversion system. **Protection and Control of Modern Power Systems**, v. 3, n. 21, p. 3-21, July 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41601-018-0096-y>.

CALZOLARI, G. R.; SALDAÑA, C. R. Modeling of Doubly Fed Induction Machine based Wind Turbines in ATP: challenges and experiences. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS (IPST2013), 2013, Vancouver. **Proceedings** [...]. Vancouver: IPST, 2013. p. 18-20. Disponível em: https://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2013/13IPST083.pdf. Acesso em: 18 dez. 2021.

EL-SHARKAWI, M. A. **Wind energy: an Introduction**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. 355 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b18363>.

OLIVEIRA, F. D. C. **Suportabilidade a afundamentos de tensão em geradores DFIG empregando limitador supercondutor**. 2016. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/9713>. Acesso em: 15 dez. 2021.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R. Energia solar – O potencial brasileiro. **O Setor Elétrico**, n. 145, 1 fev. 2018. Cap. 1, p. 42-49. Disponível em: <https://osetoreletrico.com.br/capitulo-i-energia-solar-o-potencial-brasileiro/>. Acesso em: 25 maio 2021.

PINTO, V. P. **Controladores robustos LQG/LTR com ação integral aplicados ao controle de geradores eólicos interligados ao sistema de distribuição de energia elétrica baseados em máquina de indução duplamente alimentada**. 2012. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/2499>. Acesso em: 15 dez. 2021.

ROCHA, M. A. **Modelagem e controle de gerador de indução duplamente alimentado para estudo de sistema de geração eólica**. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/153628>. Acesso em: 18 dez. 2021.

SAMUEL NETO, A.; PINHEIRO, E. L. R.; NEVES, F. A. S.; SILVA, S. R.; ROSAS, P. A. C. Análise dinâmica da conexão ao sistema elétrico de usinas eólicas usando o Atpdraw. **Revista Eletrônica de Potência**, v. 10, n. 2, p. 67-75, nov. 2005. DOI: <https://doi.org/10.18618/REP.2005.2.067075>.

SILVA, B. H. P. **Análise transitória de faltas em geradores de indução duplamente alimentados no contexto da energia eólica**. 2018. 77 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2018.tde-04052018-102925>.

TAVARES, M. M. **Uso do gerador de indução duplamente alimentado como gerador eólico**. 2017. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/28108>. Acesso em: 15 dez. 2021.

WU, B.; LANG, Y.; ZARGARI, N.; KOURO, S. **Power conversion and control of wind energy systems**. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2011. 480 p. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/book/6047595>. Acesso em: 15 dez. 2021.

YAZDANI, A.; IRAVANI, R. **Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications**. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2010. 541 p. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/book/6739364>. Acesso em: 18 dez. 2021.

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**, v. 32, n. 1, p. 34-71, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1108/03321641311293740>.