



Artigo

Modelagem para simulação dinâmica do DFIG no ATP-EMTP

Adriano Aron Freitas de Moura ^[1], Yago da Silva Pires Rocha ^[2], Ednardo Pereira da Rocha ^[3], Daniel Carlos de Carvalho Crisóstomo ^[4]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; adrianoaron@ufersa.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; eng.yagorocha@gmail.com

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; ednardo.pereira@ufersa.edu.br

^[4] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; daniel.crisostomo@ufersa.edu.br

Recebido: 11/09/2024;

Aceito: 11/12/2024;

Publicado: 28/12/2024;

Resumo: O gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) possibilita um controle das potências ativa, reativa e fator de potência do estator da máquina. A principal contribuição do presente trabalho está em analisar matematicamente o DFIG através de modelos que reflitam os mesmos cálculos realizados pelo software ATP-EMTP em regime dinâmico, conhecendo o comportamento transitório das grandezas elétricas em vários pontos do DFIG e posteriormente comparando os resultados das simulações obtidos com os modelos matemáticos desenvolvidos. Realizaram-se simulações computacionais para obter a operação do DFIG, e por fim, foi realizada uma análise dos efeitos que produzem cada tipo de operação da máquina, analisando valores de correntes em regime dinâmico. Para atingir os objetivos, a modelagem do sistema foi simulada no software ATP-EMTP e comparada com as equações implementadas em MATLAB®. Os resultados obtidos pela simulação validaram a modelagem matemática adotada, comprovando a eficiência do modelo em representar as correntes do estator e do rotor nos eixos d e q obtidas nas simulações. Os resultados obtidos neste trabalho mostraram a funcionalidade do ATP-EMTP para a simulação de um DFIG, tornando possíveis diversos estudos de melhoria no desempenho do sistema através da modelagem matemática desenvolvida.

Palavras-chave: DFIG; transitórios eletromagnéticos; ATP-EMTP

Abstract: The doubly fed induction generator (DFIG) allows control of the active and reactive powers and power factor of the machine stator. The main contribution of this work is to mathematically analyze the DFIG through models that reflect the same calculations performed by the ATP-EMTP software in dynamic regime, knowing the transient behavior of the electrical quantities at various points of the DFIG and subsequently comparing the results of the simulations obtained with the mathematical models developed. Computer simulations were performed to obtain the operation of the DFIG, and finally, an analysis of the effects produced by each type of machine operation was performed, analyzing current values in dynamic regime. To achieve the objectives, the system modeling was simulated in the ATP-EMTP software and compared with the equations implemented in MATLAB®. The results obtained by the simulation validated the adopted mathematical modeling, proving the efficiency of the model in representing the stator and rotor currents on the d and q axes obtained in the simulations. The results obtained in this work showed the functionality of ATP-EMTP for the simulation of a DFIG, making possible several studies to improve the system's performance through the developed mathematical modeling.

Key-words: DFIG; electromagnetic transients; ATP-EMTP

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, vários países já esboçam propostas iniciais para aliviar a demanda de combustíveis fósseis para a produção de energia, e algumas delas diz a respeito às políticas de desenvolvimento de energias renováveis, visando aumentar a exploração de recursos naturais até então pouco aproveitados e contribuindo para o aumento no rendimento global dessas fontes [1]. Dentre as possibilidades de fontes de energia que supram essa necessidade, a energia eólica é considerada uma das mais importantes e promissoras, principalmente devido a sua viabilidade econômica, baixa relação custo/benefício de exploração e por apresentar um rápido desenvolvimento tecnológico, com potencial de crescimento exponencial ao longo dos anos [2].

Além da dependência que grandes nações têm de fontes não renováveis, mudanças climáticas drásticas induzidas pelo aquecimento global e pela demanda crescente de energia, obrigaram o crescimento da energia renovável em todo o mundo. A energia eólica é pioneira entre as fontes renováveis e tem crescido tanto em capacidade quanto em tecnologia adotada. A energia eólica avançou adicionando mais 54 GW em 2016 e atingiu uma capacidade global total de 486,8 GW [3]. Com a tendência atual, prevê-se atingir uma capacidade eólica instalada acumulada de mais de 2000 GW até 2023 [3]. As grandes mudanças nos últimos 30 anos de geração de energia eólica incluem mudanças em suas tecnologias elétricas e mecânicas e técnicas de controle utilizadas nos requisitos de integração do sistema.

No Brasil, o Rio Grande do Norte (RN) é o estado líder em produção de energia eólica. A produção local, de todos os parques do estado, está integrada ao sistema interligado nacional, que é o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do país, que escoar a produção de acordo com as demandas de cada região. O RN possui hoje, segundo a Secretaria de Desenvolvimento Econômico do RN, 224 empreendimentos em operação, com capacidade de produzir até 6,8 gigawatts. Além disso, há ainda 63 parques eólicos em construção e 85 já contratados.

Atualmente, os geradores mais utilizados em parques eólicos são os geradores de indução de rotor bobinado duplamente alimentados (DFIG – Doubly Fed Induction Generator). Esses geradores acoplados a turbinas formam o que se denomina Aero geradores, que transformam a ação mecânica recebida da força dos ventos em energia elétrica para o sistema [4].

O DFIG vem sendo utilizado desde a década de 1990, principalmente em turbinas eólicas de velocidade variável. Sua configuração trata-se de gerador de indução conectado à rede elétrica tanto pelo estator quanto pelo rotor. A diferença é que este último possui conversores de potência bidirecionais (conversor do lado do rotor – RSC e conversor do lado da rede - GSC) em conexão back-to-back, fazendo sua interface com a rede elétrica para assegurar a geração de energia na frequência e tensão nominal da rede elétrica independente da velocidade do rotor. A principal vantagem desse tipo de configuração é a utilização de um controle eletrônico de potência em pequena escala, aproximadamente um terço da potência do gerador, que acaba por reduzir os custos do sistema e perdas de energia [5].

Apesar de ser comum na literatura estudos com conversores, existem configurações em regime dinâmico sem a utilização deles. Essas configurações perdem as principais vantagens da utilização dos conversores, como o baixo custo e a perda de qualidade de energia. Porém é interessante analisar o comportamento da máquina sem a utilização desses equipamentos eletrônicos, verificando o comportamento dinâmico e transitório de todas as variáveis das máquinas a fim de verificar sua operação. Para a execução desse tipo de estudo, existem diversas ferramentas computacionais que aproximam o sistema simulado do sistema real, sendo possível realizar a análise em regime transitório. O MATLAB® e o ATP-EMTP são softwares muito aplicados ao setor elétrico, principalmente quando se trata de analisar simulações de transitórios eletromagnéticos [6].

2. MODELAGEM DO SISTEMA DE GERAÇÃO

A modelagem dos modos de operação traz consigo informações suficientemente relevantes para o entendimento do funcionamento do circuito simulado, porém de forma simples e resumida. Dessa forma, essa etapa será dividida em 4 partes: Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG), Operação do DFIG, Modelagem em Regime Permanente, Representação do Vetor Espacial no Quadro de Referências e Modelagem em Regime Dinâmico. O sistema de geração modelado no ATP-EMTP conta com um DFIG, do tipo UM4-Induction que atua em toda sua faixa de operação. As simulações realizadas limitaram-se a menos de 3 segundos, já que os fenômenos analisados se apresentam dentro deste intervalo.

2.1. Gerador de Indução Duplamente Alimentando (DFIG)

A expressão DFIG trata-se de uma configuração em que são alimentados tanto o estator como o enrolamento do rotor de uma máquina. As operações nos modos subsíncrono e supersíncrono do gerador são possíveis, de modo que a frequência permaneça constante. Nas máquinas síncronas, a presença de conversores torna suave a conexão, e assim, não leva aos surtos de tensão. A Figura 1 mostra uma configuração de um esquema elétrico do DFIG conectado à rede elétrica [9].

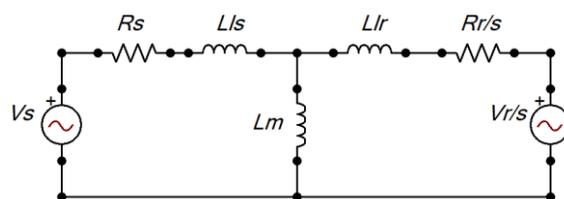


Figura 1. Circuito monofásico-equivalente de regime permanente para o DFIG.

2.2. Operação do DFIG

Várias configurações de geradores que trabalham em múltiplas velocidades, incluindo os geradores na configuração DFIG, onde têm um melhor aproveitamento da energia do vento, além de permitir que os parques atendam requisitos das concessionárias [8]. Um gerador de velocidade variável oferece uma alta eficiência em uma larga faixa de velocidades de vento, permitindo a capacidade de fornecimento de energia a uma tensão e frequência constante mesmo com a velocidade inconstante do rotor [11].

O gerador, durante a operação em modo subsíncrono, apresenta uma velocidade do rotor menor que a velocidade síncrona da máquina. Nesta região, o escorregamento (s) é positivo. Para este modo de operação, o fluxo de corrente é apresentado na Figura 2 [10]. O gerador durante a operação em modo supersíncrono, a velocidade do rotor é maior que a velocidade síncrona da máquina. Nesta região, o escorregamento (s) é negativo. Para este modo de operação, o fluxo de corrente é apresentado na Figura 3 [12].

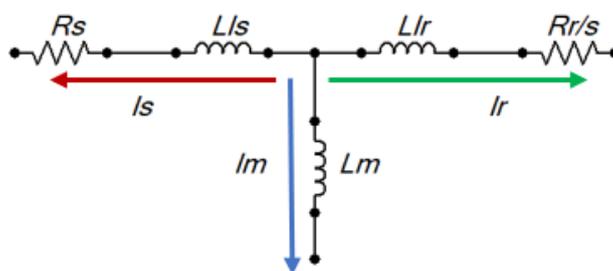


Figura 2. Fluxo de correntes no modo de operação em velocidade subsíncrono.

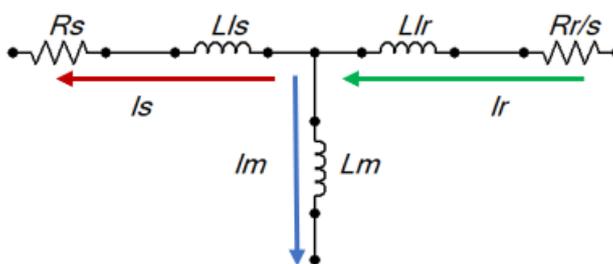


Figura 3. Fluxo de correntes no modo de operação em velocidade supersíncrono.

2.3. Modelagem em Regime Permanente

A Figura 4 mostra o circuito equivalente do DFIG que é equivalente ao circuito da máquina de indução com alimentação no rotor.

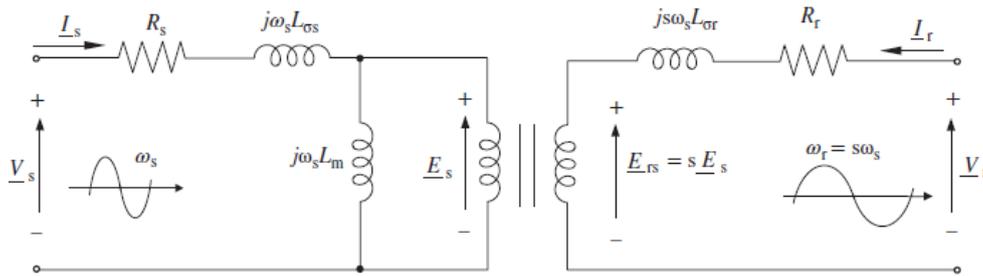


Figura 4. Circuito da máquina de indução com alimentação no rotor.

Onde:

V_s – Tensão fase-neutro do estator. (V);

ω_s – Frequência elétrica das tensões do estator. (rad/s);

Lls – Indutância de ligação do estator;

Llr – Indutância de ligação do rotor;

Lm – Indutância de magnetização;

R_s – Resistência do estator;

R_r – Resistência do rotor;

s – Escorregamento da máquina;

t – Relação de transformação entre as tensões do estator e do rotor.

Com base no circuito equivalente da Figura 4, pode-se ver que o DFIG é descrito pelas seguintes equações em regime permanente:

$$I_s = \left(\frac{S_s}{V_s} \right)^* \quad (1)$$

$$V_s = (R_s + j\omega_s Lls). I_s + V_m \quad (2)$$

$$V_m t - \frac{I_r}{t} \left(\frac{R_r}{s} + j\omega_s Llr \right) * t^2 = \frac{V_r t}{s} \quad (3)$$

Desconhecendo-se a relação de transformação, as tensões e correntes da máquina podem ainda ser determinadas referidas ao estator. Para isso, basta ver que o fator t pode ser cancelado na Equação (3). Assim a Equação (3) trabalha com as grandezas referidas ao rotor e a equação (4) trabalha com as grandezas referidas ao estator.

$$V_m - I_r \left(\frac{R_r}{s} + j\omega_s Llr \right) = V_r / s \quad (4)$$

Essas equações representam o equivalente monofásico do DFIG. Para que se possa analisar o DFIG de maneira trifásica um modelo trifásico é necessário. O ATPDraw utiliza o modo de conexão das bobinas do DFIG com o estator ligado em estrela e o rotor ligado em delta, usando a conexão Yd9.

2.4. Representação do vetor espacial nos quadros de referência

Ao desenvolver o modelo dinâmico $\alpha\beta$ do DFIG, a teoria de vetores espaciais é aplicada ao modelo elétrico básico. Assim como no modelo de estado estacionário, as equações da máquina são assumidas tanto ideais quanto lineares. A Figura 5 mostra os três diferentes quadros de referência rotativos normalmente utilizado para desenvolver modelos baseados em vetores espaciais do DFIG. O referencial do estator ($\alpha\beta$) é estacionário, o referencial do rotor (DQ) gira em ω_m e a referência síncrona (dq) gira em ω_s . Os subscritos “s”, “r” e “a” são usados para denotar que um vetor espacial é referência ao estator, rotor e referenciais síncronos, respectivamente. Usando rotações diretas e transformação inversas, um vetor espacial pode ser representado em qualquer um desses quadros [13].

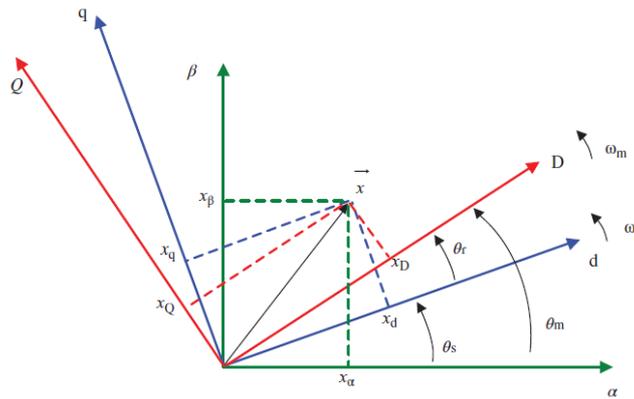


Figura 5. Representação do vetor espacial nos quadros de referência.

2.4.1. Modelo $\alpha\beta$

Logo, as três bobinas do estator e do rotor separadamente, usando a teoria do vetor espacial, podem ser representadas por duas bobinas estacionárias $\alpha\beta$ para o estator e duas bobinas giratórias DQ para o rotor, proporcionando as seguintes equações de tensão [13]:

$$\vec{v}_s^s = R_s \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\psi}_s^s}{dt} \quad \vec{v}_r^r = R_r \vec{i}_r^r + \frac{d\vec{\psi}_r^r}{dt} \quad (5)$$

Se ambas as equações de tensão são representadas no referencial estacionário $\alpha\beta$, então a equação do rotor deve ser multiplicada por $e^{j\theta_m}$, que produz o seguinte conjunto de equações [13]:

$$\vec{v}_s^s = R_s \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\psi}_s^s}{dt} \Rightarrow \begin{cases} v_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\psi_{as}}{dt} \\ v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

$$\vec{v}_r^s = R_r \vec{i}_r^s + \frac{d\vec{\psi}_r^s}{dt} - j\omega_m \vec{\psi}_r^s \Rightarrow \begin{cases} v_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d\psi_{ar}}{dt} + \omega_m \psi_{\beta r} \\ v_{\beta r} = R_r i_{\beta r} + \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} - \omega_m \psi_{ar} \end{cases} \quad (7)$$

Segundo Abu-Rub[13], é possível derivar as expressões de fluxo do estator e do rotor na forma de vetor espacial em um referencial estacionário:

$$\vec{\psi}_s^s = L_s \vec{i}_s^s + L_m \vec{i}_r^s \Rightarrow \begin{cases} \psi_{as} = L_s i_{as} + L_m i_{ar} \\ \psi_{\beta s} = L_s i_{\beta s} + L_m i_{\beta r} \end{cases} \quad (8)$$

$$\vec{\psi}_r^s = L_m \vec{i}_s^s + L_r \vec{i}_r^s \Rightarrow \begin{cases} \psi_{ar} = L_m i_{as} + L_r i_{ar} \\ \psi_{\beta r} = L_m i_{\beta s} + L_r i_{\beta r} \end{cases} \quad (9)$$

Assim, a partir do conjunto de equações derivadas, o circuito equivalente $\alpha\beta$ é desenvolvido conforme representado na Figura 6. Existe um circuito equivalente para cada coordenada $\alpha\beta$, em que toda a tensão, corrente e magnitudes de fluxo são senoidais com uma frequência de ω_s . Por outro lado, as potências ativas e reativa dos lados do estator e do rotor podem ser calculadas de acordo com as seguintes equações [13]:

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{as} i_{as} + v_{\beta s} i_{\beta s}) \quad P_r = \frac{3}{2} (v_{ar} i_{ar} + v_{\beta r} i_{\beta r}) \quad (10)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{\beta s} i_{as} - v_{as} i_{\beta s}) \quad Q_r = \frac{3}{2} (v_{\beta r} i_{ar} - v_{ar} i_{\beta r}) \quad (11)$$

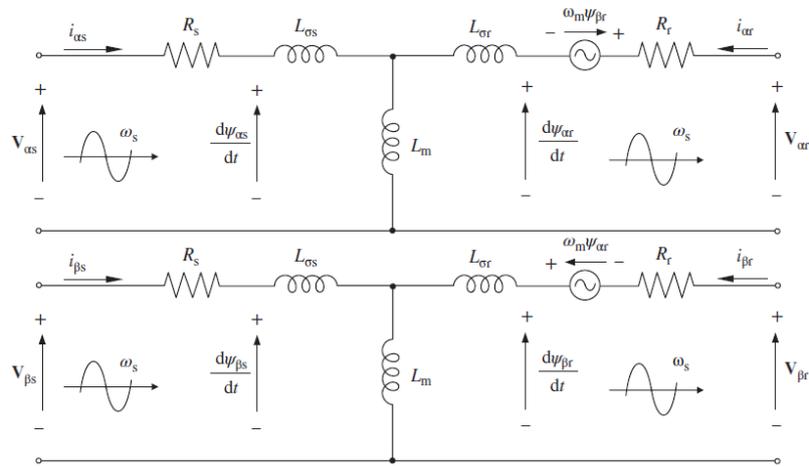


Figura 6. Circuito equivalente do modelo $\alpha\beta$.

2.4.2. Modelo dq

O modelo de vetor espacial do DFIG também pode ser representado em um quadro de rotação síncrona. Para esse propósito, multiplica-se as expressões de tensão por $e^{-j\theta_s}$ e $e^{-j\theta_r}$, respectivamente, obtemos as equações no referencial dq [13].

$$\vec{v}_s^a = R_s \vec{i}_s^a + \frac{d\vec{\psi}_s^a}{dt} - j\omega_s \vec{\psi}_s^a \Rightarrow \begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} + \omega_s \psi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} - \omega_s \psi_{ds} \end{cases} \quad (12)$$

$$\vec{v}_r^a = R_r \vec{i}_r^a + \frac{d\vec{\psi}_r^a}{dt} - j\omega_r \vec{\psi}_r^a \Rightarrow \begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} + \omega_r \psi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} - \omega_r \psi_{dr} \end{cases} \quad (13)$$

Da mesma forma, os fluxos produzem:

$$\vec{\psi}_s^a = L_s \vec{i}_s^a + L_m \vec{i}_r^a \Rightarrow \begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (14)$$

$$\vec{\psi}_r^a = L_m \vec{i}_s^a + L_r \vec{i}_r^a \Rightarrow \begin{cases} \psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad (15)$$

Assim, a partir das equações acima, o circuito elétrico equivalente em dq é obtido, conforme representado na Figura 7.

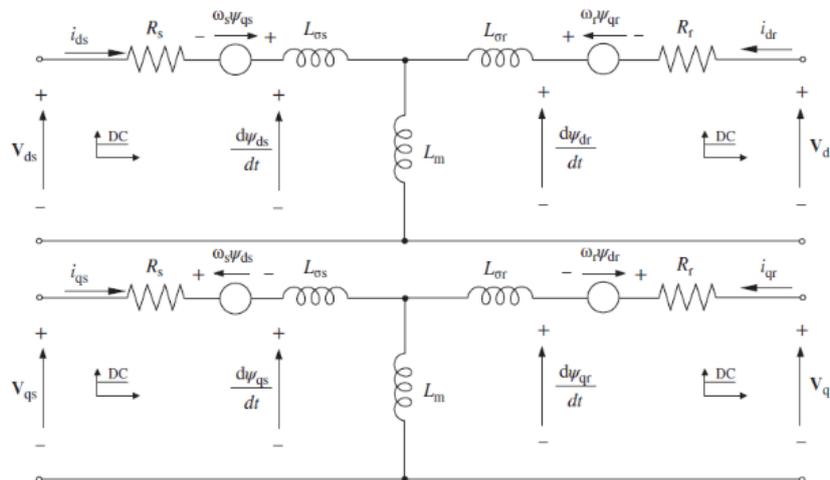


Figura 7. Circuito equivalente do modelo dq.

3. MODELAGEM DINÂMICA DA MÁQUINA DFIG NO ATP-EMTP

O ATP possui uma infinidade de funcionalidades, incluindo bibliotecas padrão para modelagem de componentes elétricos e sistemas de potência. Dentro dessas bibliotecas, estão elementos que representam com fidelidade fontes, linhas de transmissão, transformadores e máquinas elétricas rotativas. Além disso, combinados com elementos como resistores, indutores e capacitores, é possível modelar exatamente qualquer um dos tipos de geração. Dentro da biblioteca dedicada às máquinas elétricas rotativas existem geradores e motores síncronos, de corrente alternada e contínua. Em particular, a Máquina Universal Tipo 4 (UM_4) é um modelo de máquina assíncrona com rotor bobinado (ou também chamado DFIG). Este modelo requer como dados de entrada, além dos próprios parâmetros da máquina, as tensões e torque mecânico do enrolamento do estator e do rotor [14].

Pela teoria convencional de máquinas elétricas, os fluxos do estator e do rotor são calculados de acordo com as expressões (de acordo com as Equações (16) e (17)):

$$\overrightarrow{\lambda_{abcs}} = L_s \overrightarrow{i_{abcs}} + L_m e^{j\theta_r} \overrightarrow{i_{abcr}} \quad (16)$$

$$\overrightarrow{\lambda_{abcr}} = L_m e^{-j\theta_r} \overrightarrow{i_{abcs}} + L_r \overrightarrow{i_{abcr}} \quad (17)$$

Mas no ATP-EMTP o ângulo θ_r é somado com o ângulo 90° devido a defasagem existente entre estator e rotor. Substituindo, temos as equações para o fluxo do estator e rotor no referencial dq.

$$\lambda_{sd} = (L_s i_{sd} - L_m i_{rq}) \quad (18)$$

$$\lambda_{sq} = (L_s i_{sq} + L_m i_{rd}) \quad (19)$$

$$\lambda_{rd} = (L_r i_{rd} + L_m i_{sq}) \quad (20)$$

$$\lambda_{rq} = (L_r i_{rq} - L_m i_{sd}) \quad (21)$$

Escrevendo as equações de regime permanente de acordo com o modelo da referência temos as equações do estator:

$$V_{SQ} - R_S I_Q + \omega L_m i_q - \omega L_S I_D = 0 \quad (22)$$

$$V_{SD} - R_S I_D + \omega L_m i_d + \omega L_S I_Q = 0 \quad (23)$$

Para definir as equações do rotor, a corrente entra na fonte de tensão do rotor (Figura 2), a polaridade da fonte de tensão do rotor é invertida, logo obtemos após algumas simplificações a Equação (24).

$$\left(\frac{V_d}{s}\right) + \left(\frac{r}{s}\right) i_d + \omega(L_S I_D - L_m i_{qr}) - \omega(L_{lr} i_{rq} + L_{ls} i_{sd}) = 0 \quad (24)$$

Para equações do eixo d do estator introduzimos Ψ_{ds} e substituímos na Equação (24), logo temos:

$$\left(\frac{V_d}{s}\right) + \left(\frac{r}{s}\right) i_d + (V_{SQ} - R_S I_Q) - \omega(L_{lr} i_{rq} + L_{ls} i_{sd}) = 0 \quad (25)$$

Na equação do eixo q do rotor, temos:

$$\left(\frac{V_q}{s}\right) + \left(\frac{r}{s}\right) i_q + \omega(L_m i_{rd} + L_s i_{sq}) + \omega(L_{lr} i_{rd} - L_{ls} i_{sq}) = 0 \quad (26)$$

Introduzindo e substituindo Ψ_{qs} :

$$\left(\frac{V_q}{s}\right) + \left(\frac{r}{s}\right) i_q + (R_S i_{rd} - V_{SD}) + \omega(L_{lr} i_{rd} - L_{ls} i_{sq}) = 0 \quad (27)$$

Colocando as equações (22), (23), (25) e (27) na forma matricial e substituindo os valores nas matrizes temos as equações de regime permanente com um modelo condizente com a da simulação no ATP-EMTP.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & \omega L_m & -\omega L_S & -R_S \\ \omega L_m & 0 & -R_S & \omega L_S \\ \frac{r}{s} & -L_{lr} \omega & -L_{ls} \omega & 0 \\ L_{lr} \omega & \frac{r}{s} & R_S & -\omega L_{ls} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{SQ} \\ V_{SD} \\ V_d/s + V_{SQ} \\ V_q/s - V_{SD} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Para obter o regime dinâmico, implementamos as equações:

$$V_{SQ} - R_S I_Q - \omega \lambda_{sd} - \dot{\lambda}_{sq} = 0 \quad (29)$$

$$V_{SD} - R_S I_D + \omega \lambda_{sq} - \dot{\lambda}_{sd} = 0 \quad (30)$$

$$-V_q - R_r I_q - (\omega - \omega_r) \lambda_{rd} + \dot{\lambda}_{rq} = 0 \quad (31)$$

$$-V_d - R_r I_d + (\omega - \omega_r) \lambda_{rq} + \dot{\lambda}_{rd} = 0 \quad (32)$$

Adaptando as equações (31) e (32) em função do escorregamento, obtemos:

$$-V_q - R_r I_q - s\omega\lambda_{rd} + \dot{\lambda}_{rq} = 0 \quad (33)$$

$$-V_d - R_r I_d + s\omega\lambda_{rq} + \dot{\lambda}_{rd} = 0 \quad (34)$$

As equações (29), (30), (33) e (34) demonstram o comportamento dinâmico com um modelo condizente com a da simulação no ATP-EMTP no modo de operação subsíncrono. Para simular a operação no modo supersíncrono, usamos as equações (18) a (23), porém diferente do modo de operação subsíncrono, para definir as equações do rotor, o fluxo de corrente no circuito equivalente do DFIG é diferente. A corrente sai da fonte de tensão (Figura 3), e obtemos o mesmo equacionamento que no modo subsíncrono, porém o escorregamento é negativo, e a polaridade da fonte do rotor fica positiva.

Com esse modelo calcula-se o torque eletromagnético, a velocidade angular e o ângulo do rotor, entre outras variáveis internas, como o fluxo magnético e as correntes de todos os enrolamentos.

4. SIMULAÇÃO DO DFIG EM REGIME DINÂMICO

Para a validação da metodologia, foi utilizado o modelo de projeto do ATP das Figuras 2 e 3, que representa com precisão todos os modos de operação da máquina. Os cálculos matemáticos foram desenvolvidos a partir do modelo do ATP como referência, e os dados disponíveis através de simulação em script no software Matlab. Os parâmetros do DFIG modelado são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do DFIG modelado.

Parâmetro	Valor	Unidade
Conexão do rotor	Yd9	-
Frequência nominal	50	Hz
Indutância de magnetização	0.0025	H
Indutância de dispersão do estator	0.000087	H
Indutância de dispersão do rotor	0.000087	H
Escorregamento (subsíncrono)	10	%
Escorregamento (supersíncrono)	-2.5	%
$R_{ESTATOR}$	0.0026	Ω
R_{ROTOR}	0.0029	Ω
P	2	MW
Q	0	MVAr

Os dados de simulação no ATP-EMTP e Matlab, através das equações mencionadas em modo subsíncrono com funcionamento da máquina em regime permanente podem ser vistos nas Figura 8 e Tabela 2. Os dados fazem uma análise entre as correntes e tensões entregues a partir de valores de V_{SQ} e V_{SD} e valores de potência ativa e reativa de acordo com a Equação (35).

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_D \\ I_Q \\ V_d/s \\ V_q/s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & \omega L_m & -\omega L_S & -R_S & 0 & 0 \\ \omega L_m & 0 & -R_S & \omega L_S & 0 & 0 \\ \frac{r}{s} & -L_{lr}\omega & -L_{ls}\omega & 0 & 1 & 0 \\ L_{lr}\omega & \frac{r}{s} & R_S & -L_{ls}\omega & 0 & 1 \\ 0 & 0 & V_{SD} & V_{SQ} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_{SQ} & -V_{SD} & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{SQ} \\ V_{SD} \\ V_{SQ} \\ -V_{SD} \\ -2P_{gen}/3 \\ -2Q_{gen}/3 \end{bmatrix} \quad (35)$$

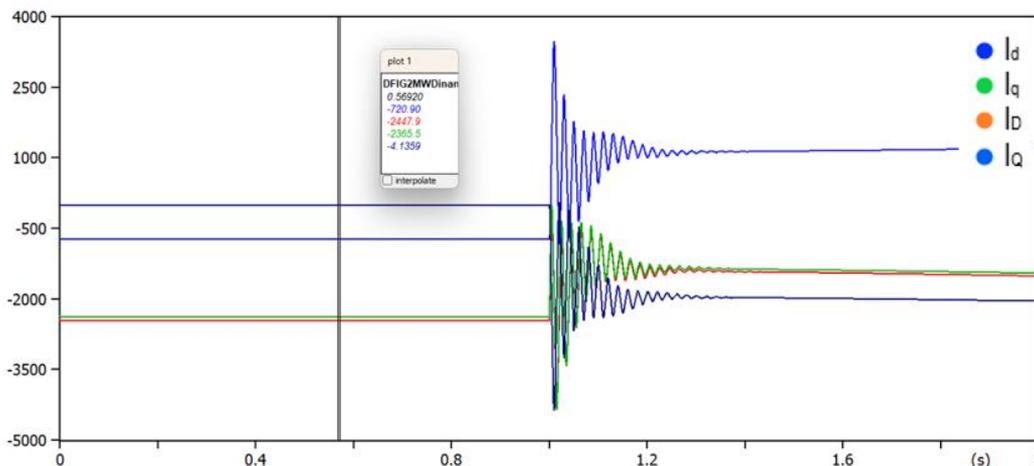


Figura 8 - Dados de simulação do MATLAB® em regime permanente no modo subsíncrono.

Tabela 2. Parâmetros do DFIG modelado em regime permanente.

Variável (A)	MATLAB®	ATP-EMTP	Erro (%) ($\frac{Mat}{ATP} - 1$)
I_d	725,2	720,90	0,59
I_q	2449,0	2447,9	0,04
I_D	2366,7	2365	0,07
I_Q	0	4,17	0,04

A primeira simulação foi realizada com o sistema sem nenhum tipo de interferência, onde foi possível analisar se o funcionamento do circuito estava como descrito na equação. Na Figura 8, pode-se observar que as correntes do referencial dq se comportam como esperado, tanto na simulação em MATLAB® (cálculos com as equações desenvolvidas implementadas em script), como em simulação no ATP-EMTP (parâmetro principal). Quando analisado a diferença de I_d , I_q (rotor), I_D e I_Q (estator) nos programas de simulação através de uma equação de erro percentual, percebermos a eficiência do modelo, já que em todos os casos, o erro percentual foi menor que um por cento.

Com os dados de simulação em regime permanente corretos, aplicamos as equações de regime permanente e temos como resultado uma matriz 2 x 2 com os resultados de I_d e I_q com referências tanto no estator, como no rotor no modo subsíncrono. Os resultados da simulação estão demonstrados na Figura 9 e na Tabela 3.

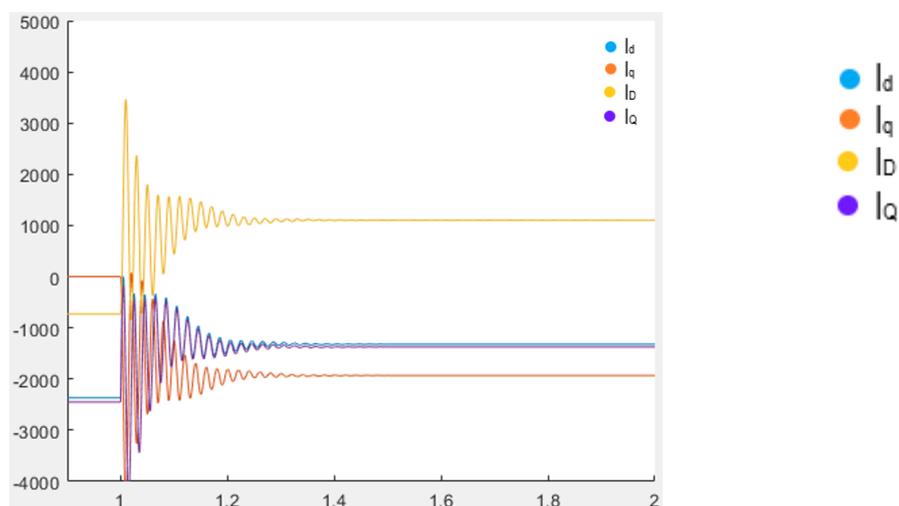


Figura 9 - Dados de simulação do MATLAB® em regime dinâmico no modo subsíncrono.

Tabela 3 - Correntes do DFIG em regime dinâmico no modo subsíncrono.

Variável (A)	MATLAB®	ATP-EMTP	Erro (%) ($\frac{Mat}{ATP} - 1$)
I_d	1320,6	1298,7	1,60
I_q	1930,3	1922,5	0,40
I_D	1101,8	1099,1	0,24
I_Q	1370,3	1356,8	0,99

A segunda simulação foi realizada, e como esperado o resultado foi condizente com o do software ATP-EMTP mostrando a eficiência do modelo. Na Figura 9, pode-se observar como as correntes do referencial dq se comportam. Analisando a eficiência do modelo em estabilizar a corrente, percebe-se que o mesmo apesar de levar pouco tempo para alcançar o objetivo, o modelo quando injetado correntes em regime dinâmico, leva mais tempo para se estabilizar (1,4 segundos). Quando analisado a diferença de I_d , I_q , I_D nos programas de simulação através de uma equação de erro percentual, percebermos a eficiência do modelo, já que em todos os casos, o erro percentual foi menor que 2 por cento. Antes e após o distúrbio a tensão de pico do estator é mudada de uma fonte equilibrada de 563,38 V para 700 V.

A simulação do modo de operação supersíncrono, tem comportamento similar ao do subsíncrono devido ao mesmo equacionamento observando que como o escorregamento é negativo, a polaridade da fonte do rotor fica positiva. Para analisar os resultados deste modo de operação, focamos em analisar os momentos de corrente antes e depois da estabilização proporcionado pelo modelo, logo as Figuras 10 a 12 e a Tabela 4 apresentam os valores de simulação do modo supersíncrono em regime dinâmico.

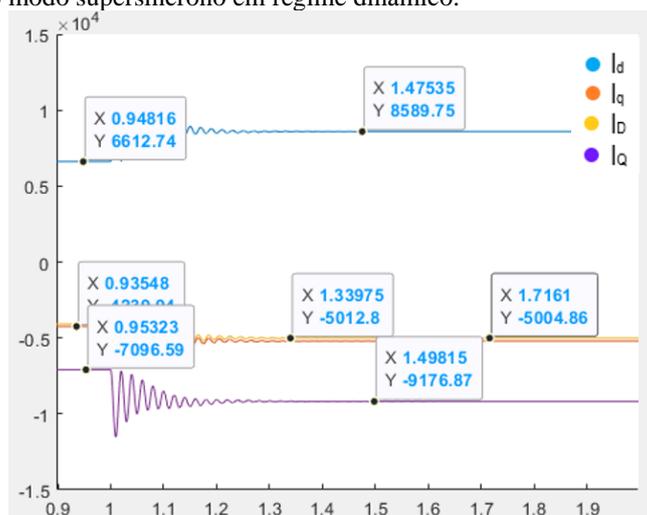


Figura 10 - Dados de simulação do MATLAB® em regime permanente no modo supersíncrono.

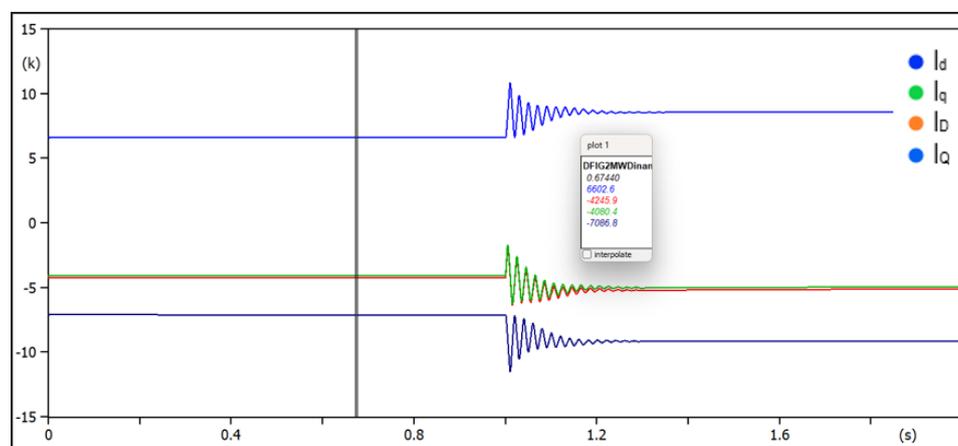


Figura 11 - Dados de simulação do ATP-EMTP em regime permanente no modo supersíncrono antes da estabilização.

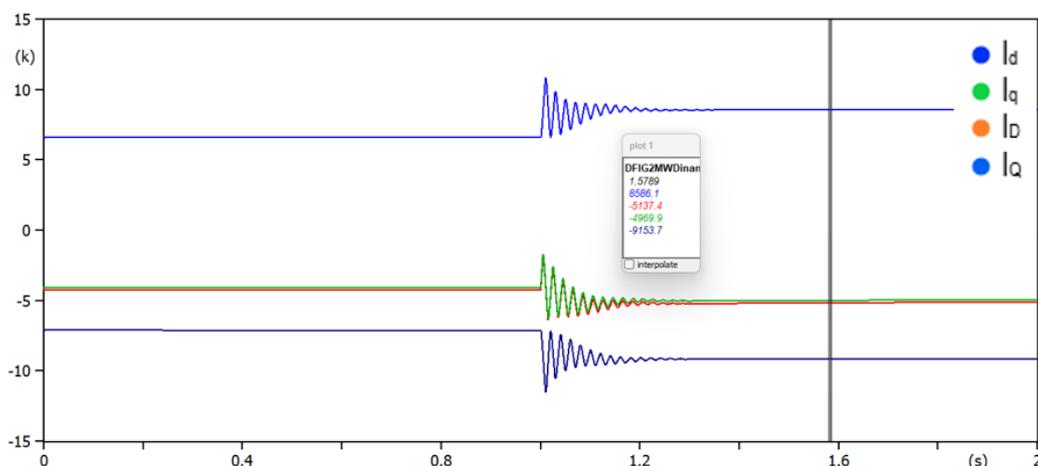


Figura 12 - Dados de simulação do ATP-EMTP em regime permanente no modo supersíncrono depois da estabilização.

Tabela 4 - Correntes do DFIG modelado em regime dinâmico no modo supersíncrono.

T = 0,7 segundos			
Variável (A)	MATLAB®	ATP-EMTP	Erro (%) $(\frac{Mat}{ATP} - 1)$
I_d	6612,7	6602,6	0,15
I_q	4220,1	4245,9	0,60
I_D	4037,9	4080,4	1,04
I_Q	7096,6	7086,8	0,13
T = 1,6 segundos			
Variável (A)	MATLAB®	ATP-EMTP	Erro (%) $(\frac{Mat}{ATP} - 1)$
I_d	8559,8	8586,1	0,30
I_q	5012,8	5137,4	2,42
I_D	5004,9	4969,9	0,70
I_Q	9176,9	9153,7	0,25

A simulação do modo de operação supersíncrono, tem comportamento similar ao do subsíncrono devido ao mesmo equacionamento observando que como o escorregamento é negativo, a polaridade da fonte do rotor fica positiva. Para analisar os resultados deste modo de operação, focamos em analisar os momentos de corrente antes e depois da estabilização proporcionado pelo modelo, logo as Figuras 10 a 12 e a Tabela 4 apresentam os valores de simulação do modo supersíncrono em regime dinâmico.

O resultado após a estabilização analisado no tempo $t=1,58s$ na Figura 12, como esperado foi condizente com as simulações no ATP-EMTP. O comportamento se mostrou praticamente igual ao do modo subsíncrono, apresentando um valor inicial, que logo após sofrer uma perturbação variou seu valor até estabilizar. Quando analisado a diferença de I_d , I_q , I_D , I_Q nos programas de simulação através de uma equação de erro percentual, confirmamos a eficiência do modelo nos dois principais modo de operação, já que em todos os casos, o erro percentual foi menor que três por cento. Além disso, o modelo levou pouco mais de 1,2 s para corrigir o distúrbio.

5. CONCLUSÃO

A principal contribuição do presente trabalho está em analisar matematicamente o DFIG através de modelos que reflitam os mesmos cálculos realizados pelo software ATP-EMTP em regime dinâmico, conhecendo o comportamento transitório das grandezas elétricas em vários pontos da topologia DFIG. Para alcançar o objetivo, foi necessário definir a configuração do sistema para analisar as operações subsíncrona e supersíncrona da máquina em regime dinâmico, descrever o modelo matemático que representa a configuração escolhida do DFIG, calcular parâmetros de tensão e correntes para os circuitos escolhidos para modelagem da rede, implementar o trabalho no ambiente de simulação ATP-EMTP e MATLAB® e comparar os resultados obtidos.

A partir dos resultados das simulações, foi possível utilizar o MATLAB® e o ATP-EMTP para verificar a operação dos parâmetros elétricos de corrente em alguns modos de operação do DFIG em regime dinâmico verificando o desempenho da metodologia em operar em toda faixa de velocidade da máquina. Dessa forma, pode ser estabelecido que a atuação do modelo foi realizada de forma satisfatória.

Os resultados obtidos neste artigo mostraram a funcionalidade do ATP e MATLAB® para a simulação de um DFIG, e mostrou-se indispensável para entendimento do funcionamento das máquinas de turbinas eólicas, implementadas no ATP-EMTP e usando DFIG; tornando possíveis diversos estudos de melhoria no desempenho do sistema. Como trabalhos futuros, seria interessante trabalhar os efeitos dos conversores do lado da máquina e do lado da rede na operação dinâmica do DFIG.

AGRADECIMENTOS

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

REFERÊNCIAS

- [1] LEI, Y. et al. Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 21, n. 1, p. 257–264, mar. 2006.
- [2] ACKERMANN, T. *Wind Power in Power Systems*. 1. ed. Stockholm, Sweden: John Wiley & Sons, 2005
- [3] GWEC: ‘Global wind report 2016’. Available at <http://files.gwec.net/files/GWR2016.pdf>, Acesso em Maio de 2023.
- [4] COSTA, Elvis. Modelagem dos geradores de indução e do compensador SVC, estruturas eólicas e análise de estabilidade de tensão. 2017. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022. Cap. 1.
- [5] SILVA, Bruno. Análise transitória de faltas de geradores de indução duplamente alimentados no contexto da energia eólica. 2018. Dissertação (Energia Elétrica) - Escola Politécnica, USP, 2018.
- [6] 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 ATPdraw. *Eletrônica de Potência*, v. 10, n. 2, 2005.
- [7] SILVA, Jorge; LIMA, Luciano; FERREIRA, Alessandra. Uma experiência didática com base no emprego do Matlab nos cursos de graduação da faculdade de engenharia da UERJ. UERJ, Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, 2004.
- [8] DORF, R. C., BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle Modernos*. 8 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001, 659p.
- [9] PINTO, Milton de Oliveira et al. *Fundamentos de energia eólica*. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2013.
- [10] LIMA, F.K. DE A., LIMA, S.L., WATANABE, E.H. (2012). The Challenges of Wind Turbines Technologies and their Possible Impacts on the Electric Distribution Network, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos de Potência (SBSE).
- [11] ABAD, G. et al. *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation*. 1. ed. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2011.
- [12] EL-SHARKAWI, M. A. “Wind Energy an Introduction,” CRC Pressy, Vol. 1, No. 3, 2016.
- [13] H. ABU-RUB, M. MALINOWSKI, K. AL-HADDAD. *Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications*. IEEE Press, United Kingdom, 2014.
- [14] GIUDI, G. D. Initialization of the DFIG Machine for Electromagnetic Transients Calculation. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, VOL. 16, NO. 2, FEB. 2018