

## Estudo do gerador de indução duplamente alimentado para aplicação em sistemas de geração eólica

### Study of double fed induction machine for application in wind generation systems

**Kathleen Carolina de Moraes de Carvalho**  
[carvalho.kath@gmail.com](mailto:carvalho.kath@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

**Alessandro Goedel**  
[agoedel@utfpr.edu.br](mailto:agoedel@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

#### RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo o estudo do gerador de indução duplamente alimentado a partir do levantamento de parâmetros de seu circuito equivalente, a fim de simular e ensaiar um sistema de geração eólica simplificado, presente em uma bancada didática. O levantamento dos parâmetros foi realizado por meio de ensaios a vazio e de rotor bloqueado. A bancada didática utilizada para testes é composta por um motor de indução trifásico de 1cv acoplado ao eixo de um gerador de indução duplamente alimentado de 1cv. A simulação do sistema presente na bancada foi realizada por meio do *software Matlab/Simulink* com o objetivo de análise das grandezas de saída do gerador, bem como averiguar possíveis alterações no sistema de geração devido a diferentes valores de torques. Foram obtidas curvas características da corrente trifásica na saída do estator do gerador, as quais apresentam diferenças de comportamento a partir da conexão de cargas de valores diferentes, comprovando a premissa referente à necessidade de um torque mínimo no gerador para que este inicie a geração de energia elétrica. Os parâmetros obtidos, bem como o estudo de comportamento da bancada didática, serão utilizados na posterioridade para o estudo de detecção de falhas em geradores utilizados no sistema de geração eólica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gerador. Sistema Eólico. Simulação. Rotor Bobinado.

#### ABSTRACT

The main objective of this work is to study the double-fed induction generator from the equation circuit, in order to simulate and test a simplified wind generation system, present in a didactic bench. The parameters were held by means of no-load and locked-rotor tests. The didactic bench used for testing consists of a three-phase induction motor of 1cv coupled to the axis of a wound rotor generator of 1cv. The simulation of the present system in the bench was carried out using the software Matlab/Simulink aiming at analyzing the output quantities of the generator, as well as at investigating possible changes in the generation system due to different values of torques. Characteristic curves of the three – phases current were obtained at the output of the generator stator, which has shown differences in behavior from the connection of loads of different values, proving the premise regarding the need for a minimum torque in the generator to start the electricity generation. The parameters obtained, along with the study of the didactic bench behavior, will be used later in the study of fault detection in generators used in the wind energy generation system.

**KEYWORDS:** Generator. Wind Energy System. Simulation. Wound Rotor.

**Recebido:** 30 ago. 2018

**Aprovado:** 04 out. 2018

#### Direito autorial:

Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

No Brasil cresce cada dia mais a busca por meios de geração de energia limpa e renovável. Dentro deste cenário a energia eólica apresenta a grande vantagem sobre as demais devido ao fato de ser uma energia barata e inesgotável. Segundo Elbia Gannoum, Presidente executiva da ABEEólica, o Brasil apresenta expressiva capacidade de desenvolvimento nessa indústria devido a suas vantagens ambientais, encontrando-se na 8ª posição no Ranking Mundial de capacidade já instalada de energia eólica em 2017, de acordo com os dados do GWEC – *Global Wind Energy Council* (GANNOUN, 2017).

No sistema de geração eólica o gerador de indução duplamente alimentado (DFIG – *Doubly Fed Induction Generator*), ou gerador de indução de rotor bobinado, já é comumente utilizado em aplicações de média e alta potência, devido ao fato do tamanho do conversor conectado ao circuito rotórico e operação em velocidade variável. (VOLTOLINI, 2007). O estudo de desempenho de DFIGs é vantajoso, pois ao se analisar o comportamento nominal da máquina é possível estimar falhas, no que se refere ao cenário real de utilização. O presente trabalho de iniciação científica atua exatamente neste quesito, tendo como objetivo o estudo da máquina de indução de rotor bobinado como gerador, bem como a simulação de situações adversas passíveis de ocorrerem em um sistema eólico real.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da pesquisa foi empregada uma bancada didática de testes, construída com o intuito de apresentar um sistema de geração simplificado e dinâmico.

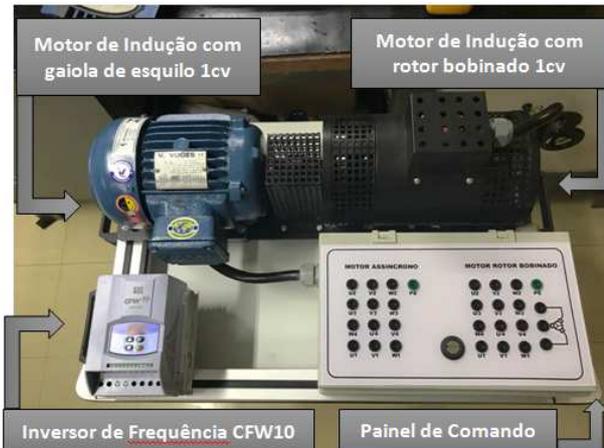
Para os ensaios a vazio e de rotor bloqueado propostos, foram conectados os terminais do estator em delta, uma vez que a tensão necessária para partir a máquina em estrela seria de 380 V, ocasionando a necessidade de um transformador.

## BANCADA DIDÁTICA

A bancada didática utilizada no experimento é constituída por uma máquina de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo acionada por um inversor de frequência, a qual tem a função de simular o vento com suas oscilações de velocidade, acoplada ao eixo do DFIG o qual deve atuar como gerador. Os terminais de conexão referentes ao motor e o gerador estão dispostos em um painel de comando a fim de facilitar o acionamento.

A Figura 1 a seguir ilustra todos os elementos da bancada didática com suas respectivas especificações.

Figura 1 - Bancada didática



Fonte: Autoria própria (2018).

## ENSAIOS

Para os ensaios referentes às estimativas de parâmetros da máquina utilizou-se um VARIAC com o intuito de variar a tensão de alimentação e um Wattímetro modelo ET-5060C da marca Minipa.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a análise dos parâmetros, a resistência referente a cada par de bobinas em paralelo, foi aferida e apresentou o valor de  $7,85 \Omega$ . É importante ressaltar que para os cálculos teóricos propostos, a conexão mais adequada é em estrela, de forma que o valor de  $R_1$  refere-se a  $1/3$  do valor aferido as bobinas em triângulo. Com os valores apresentados na Tabela 1 foi possível obter o valor da reatância indutiva a vazio, bem como é possível estabelecer a relação entre a reatância do estator, do ramo de magnetização e a vazio.

Tabela 1 - Grandezas ensaio a vazio

Grandezas	L1	L2	L3
Vrms [V]	221,3	220,4	220,1
Irms [A]	2,78	2,57	2,47
Potência Ativa 3 $\phi$ [W]	199	199	199

Fonte: Autoria própria (2018).

A partir dos valores apresentados na Tabela 2 foram estabelecidos os valores finais de estimativa de reatância do estator e do rotor, bem como a resistência do rotor.

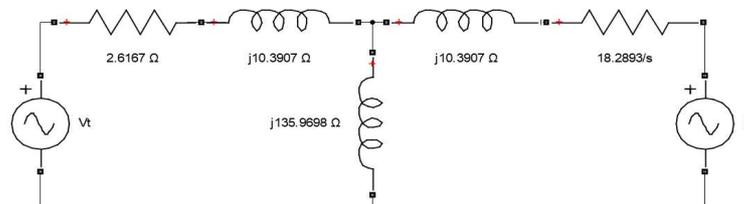
Tabela 2 - Ensaio com rotor bloqueado

Grandezas	L1	L2	L3
Vrms [V]	60,4	59,7	60,3
Irms [A]	3,52	3,52	3,42
Potência Ativa 3 $\phi$ [W]	261	261	261

Fonte: Autoria própria (2018).

Sendo assim os parâmetros referentes ao gerador podem ser observados no circuito equivalente visto na Figura 2. Vale ressaltar que a fonte denominada 'E' na Figura 2 representa a tensão induzida no circuito e a fonte denominada 'V<sub>t</sub>' refere-se a tensão terminal.

Figura 2 - Circuito Equivalente Final

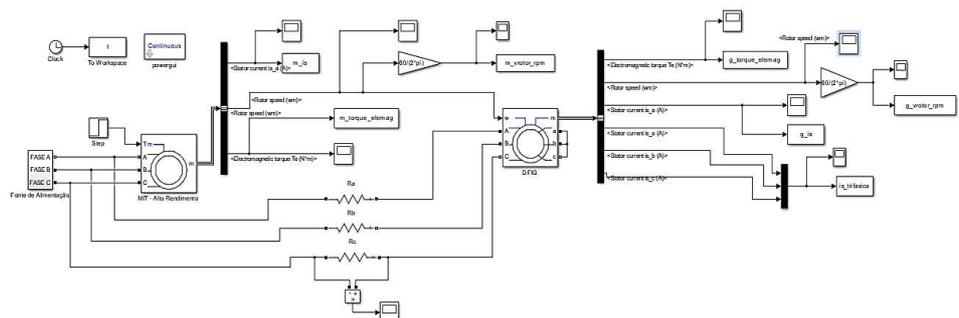


Fonte: Autoria própria (2018).

### SIMULAÇÃO DA BANCADA DIDÁTICA COMO UM SISTEMA EÓLICO

Para analisar o comportamento do sistema realizou-se a simulação apresentada na Figura 3, onde é possível observar de forma simplificada o funcionamento da bancada didática, com a conexão de um MIT a um DFIG.

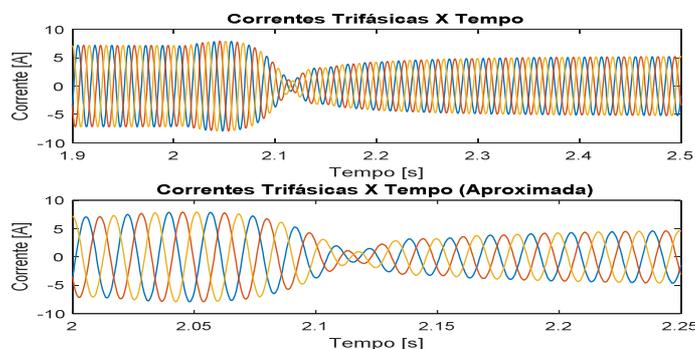
Figura 3 - Diagrama de simulação de um sistema eólico simplificado



Fonte: Autoria própria (2018).

O comportamento das correntes trifásicas de saída do estator do DFIG é vista na Figura 4, onde se observa o momento em que a carga de 10 N.m é inserida ao sistema, e o comportamento das senóides se altera.

Figura 4 - Correntes Trifásicas a partir da carga de 10 N.m

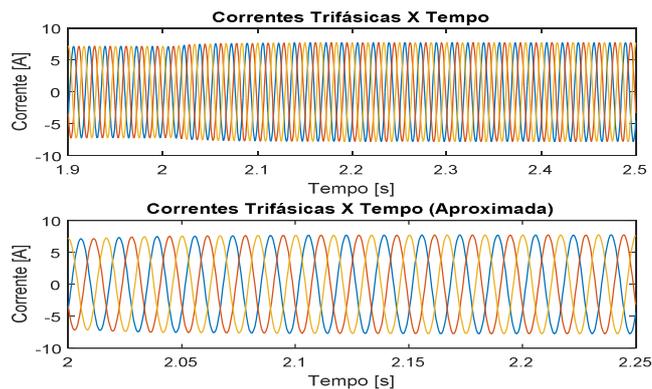


Fonte: Autoria própria (2018).

A modificação do comportamento da corrente se deve ao fato de que no instante de 2s a carga é aplicada sobre o MIT, ou seja, os terminais referentes ao

rotor não se encontram mais em aberto, e por consequência a corrente do rotor torna-se significativa para a análise de comportamento do sistema (MIYAMOTO, 2017). Uma outra análise refere-se à interferência do valor de torque atribuído na entrada o MIT. A forma de onda da corrente apresentada na Figura 4 mostra uma mudança brusca de comportamento e amplitude a partir da inserção da carga de 10 N.m, entretanto, quando o mesmo motor recebe a carga nominal de 4,11 N.m, a corrente não demonstra nenhuma alteração no comportamento tão significativa, como observado na Figura 5.

Figura 5 - Correntes trifásicas a partir da carga de 4.11 N.m



Fonte: Autoria própria (2018).

Uma das possíveis justificativas para essa discrepância entre as Figuras é de que o torque nominal não é substancialmente grande o suficiente para proporcionar a mudança de comportamento no DFIG, de forma a se fazer necessária a utilização do inversor de frequência para controlar a velocidade durante o processo e estudar mais a fundo o comportamento de geração.

## CONCLUSÃO

O principal objetivo do trabalho é de realizar o levantamento dos parâmetros de um DFIG de 1CV a fim de estudar seu comportamento como gerador eólico em uma bancada didática. O modelo e simulação das máquinas elétricas utilizadas foram realizadas do *software* Matlab/Simulink com o intuito de serem observadas grandezas referentes à corrente, tensão, torque e velocidade.

Com os resultados obtidos neste trabalho será possível um aprofundamento no comportamento do gerador no que se refere à geração por meio do controle de velocidade do eixo a partir da utilização do inversor de frequência, com o intuito de estimar possíveis falhas no comportamento de um gerador em um sistema real. Outra meta para as próximas pesquisas é a migração dos estudos para uma bancada de testes composta por um MIT de 3kW acoplado a um gerador CC de 4kW.

## REFERÊNCIAS

ABAD, G. et al. **Double Fed Induction Machine: Modeling and control for wind energy generation**. 1. ed. Piscataway, 2011.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim anual de geração 2017**. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/04/Boletim-Anual-de-Geracao-2017.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2018

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

MIYAMOTO, Renato K. **Conexão à rede elétrica de um gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo acoplado a um volante inercial**. 2017. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2017.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

VOLTOLINI, H. **Modelagem e controle de geradores de indução duplamente alimentado com aplicação em Sistema eólicos**. 2007. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica, área de concentração em Concepção de Dispositivos Eletromagnéticos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com a contribuição do Prof. Dr. Alessandro Goedel pela proposta e orientação, do Prof. Dr. Rodrigo Rodrigues Sumar pelo fornecimento da bancada didática de testes, do Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi pelo auxílio teórico e com as simulações e do Eng. Murillo Garcia Gentil pela revisão e considerações.

Conta também com o suporte da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processo Nº 06/56093-3) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Processo Nº 474290/2008-5, 473576/2011-2, 552269/2011-5).