

Um Estudo da Geração Eólica a partir do Gerador de Indução com Dupla Alimentação (DFIG) e do Gerador de Indução Gaiola de Esquilo (SCIG)

Larissa Souza Pereira¹

¹Universidade Federal do Ceará (UFC)
Sobral, Brasil

Juan Carlos Pequena Suni^{1,2}

²Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Campinas, Brasil

Resumo—Este trabalho tem por objetivo analisar o comportamento do sistema elétrico de potência de 14 barras da IEEE ao interagir com um parque eólico composto por aerogeradores que utilizam geradores de indução. Os aerogeradores assíncronos utilizados são o de velocidade variável com gerador de indução duplamente alimentado (Doubly-Fed Induction Generator-DFIG) e o de velocidade fixa com gerador de indução de rotor de gaiola de esquilo (Squirrel Cage Induction Generator-SCIG). O caso de estudo está baseado em um parque eólico com 40 aerogeradores cada um de 2,5 MW, foram realizados comparativos entre a estabilidade e funcionalidade do sistema através de gráficos referentes às velocidades do rotor e ângulo de cada gerador síncrono convencional do sistema variando o tempo de estabilidade, empregando o PSAT/MATLAB para realizar as simulações computacionais para obter o comportamento do sistema elétrico de potência. Posteriormente é apresentado o gerador assíncrono de maior eficiência, mostrando suas vantagens no funcionamento do parque eólico apresentado.

Palavras-chaves—Geração eólica, Gerador de indução, PSAT/Matlab, Sistema de potência, estabilidade, SCIG e DFIG

I. INTRODUÇÃO

A energia eólica pode ser definida como a energia cinética que é inclusa no ar. Essa energia torna-se útil através da transformação da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com utilização das turbinas eólicas, para a geração de eletricidade e de cataventos, para trabalhos mecânicos. A energia eólica surgiu há anos com inúmeros objetivos, entretanto só passou a ser utilizada para geração elétrica no final do século XIX [3].

Com as preocupações ambientais existentes, como o efeito estufa, as energias renováveis passaram a se solidificar cada vez mais no mercado, nesse âmbito a energia eólica satisfaz esses requisitos, tornando-se uma das formas de geração de energia elétrica mais pertinente. Essa forma de geração não requer a água como elemento principal, é não poluente e não emite gás ou radiação ao meio ambiente [10].

Com planejamento de manter o crescimento desta fonte de energia renovável, é necessário procurar cada vez mais investimentos e evolução tecnológica. Os geradores mais comuns nos parques eólicos são os Geradores de Indução Gaiola de Esquilo (SCIG), os Geradores Síncronos (GS) e os Geradores de Indução com Dupla Alimentação (DFIG). Os

sistemas de conversão de energia eólica são compostos pela turbina eólica, um gerador elétrico, um conversor eletrônico de potência e o sistema de controle correspondente. O sistema de conversão de energia eólica possui diferentes configurações de acordo com a utilização dos tipos de geradores síncronos e ou assíncronos [1].

No momento atual, o gerador de indução de dupla alimentação vem sendo cada vez mais empregado nas turbinas eólicas de alta potência instalada [1]. Uma vez que este possibilita o funcionamento com velocidade a partir do uso de um conversor de potência nas bases do circuito do rotor, esse conversor é adequado, pois possui potência minimizada, na faixa de $\frac{1}{4}$ da potência nominal do gerador [9].

De acordo com [9], as principais vantagens desse gerador são:

- Alta eficiência do sistema, visto que são diminuídas as perdas no conversor;
- Reduzida potência dos conversores de potência do circuito do rotor;

Com a realização de diversos estudos sobre a modelagem de DFIG para análise de estabilidade. A partir de [7], [5], diferentes modelos do gerador de vento com base em DFIG são estudados a partir de simulações. O ajuste dos parâmetros dos Controladores DFIG também é abordado em vários aspectos [4].

O presente trabalho tem como objetivo o estudo do sistema elétrico de potência, do ponto de vista da geração em conjunto com um parque eólico de 100 MW, efetuando um comparativo do sistema quando o parque eólico está composto inteiramente por geradores de indução de rotor de gaiola de esquilo (SCIG) e logo de geradores de indução duplamente alimentado (DFIG), esse estudo é realizado a partir de gráficos de velocidade do rotor e de ângulo de potência delta (δ) de cada gerador síncrono convencional do sistema elétrico de potência.

As análises apresentadas foram realizadas empregando o PSAT/MATLAB como plataforma de simulação computacional e na biblioteca do PSAT aproveitamos o circuito do sistema elétrico de potência de referência da IEEE de 14 barras para utilizar-lo como sistema base.

O PSAT oferece diversos modelos de turbinas eólicas os quais utilizamos para simular o parque eólico neste trabalho.

II. GERADOR DE INDUÇÃO DE ROTOR DE GAIOLA DE ESQUILO (SCIG)

Os terminais elétricos do estator são conectados diretamente à rede elétrica, eliminando a necessidade de conversores eletrônicos de potência em operação nominal. É usual a existência de um conversor tipo soft-starter para a redução da corrente transitória de magnetização do gerador de indução, bem como de um banco de capacitores para correção do fator de potência local. O Gerador SCIG opera a velocidade fixa determinada pela frequência da rede a qual encontra-se conectado, independente da velocidade do vento [11]. Esse modelo de gerador pode ser observado na figura 1.

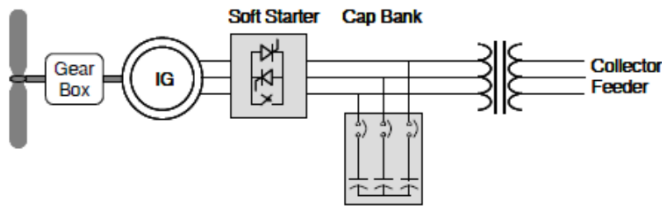


Fig. 1. Modelo Gerador de Indução Gaiola de Esquilo (SCIG) [12]

III. GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO (DFIG)

Um modelo de Gerador duplamente alimentado (DFIG) é mostrado na figura 2. Esse modelo de turbina ajusta a velocidade de rotação da turbina em uma ampla gama de velocidades do vento, com o fim de extrair o máximo potencial de vento em qualquer tempo. Para este tipo de sistema, o circuito do rotor é acoplado ao gerador da turbina eólica por intermédio da caixa de engrenagem que é responsável pela amplificação da baixa velocidade da turbina a uma velocidade mais elevada de operação do DFIG [6].

O circuito do estator é ligado diretamente à rede com tensão elétrica e frequência fixa. Através de um inversor de frequência bidirecional constituído por duas barras de conversores eletrônicos vinculados com base no DC [6].

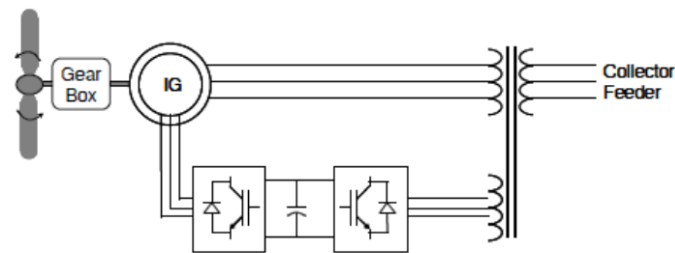


Fig. 2. Modelo Gerador de Indução com Dupla Alimentação (DFIG) [12]

IV. METODOLOGIA DE ESTUDO

O estudo inicial deste trabalho é realizado introduzindo um parque eólico ao sistema elétrico de potência sem considerar os transformadores elevadores, sistemas coletores nem as linhas de transmissão do parque, conectaremos diretamente na barra 12 do sistema elétrico de potência, a escolha desta barra foi

aleatória assumindo que os recursos favoráveis para a produção de energia eólica se encontram mais perto desta barra.

O parque eólico possui 40 aerogeradores, onde cada um dos aerogeradores dispõem de 2,5 MW de potência, para análise inicial são utilizados geradores de indução de rotor de gaiola de esquilo (SCIG) avaliando seu efeito na estabilidade do sistema, mostrados nos gráficos de velocidade e ângulo dos demais geradores síncronos.

Posteriormente esses geradores do parque eólico são substituídos por geradores duplamente alimentados (DFIG), e assim é realizado o comparativo entre os dois modos de operação do sistema, para que se possa concluir qual dos dois modos de funcionamento do parque eólico, SCIG ou DFIG apresenta melhor rendimento e vantagem para o sistema elétrico de potência.

Foi utilizado para análise descrita acima, o sistema elétrico de potência de referência de 14 barras da IEEE mostrado na figura 3 adiante.

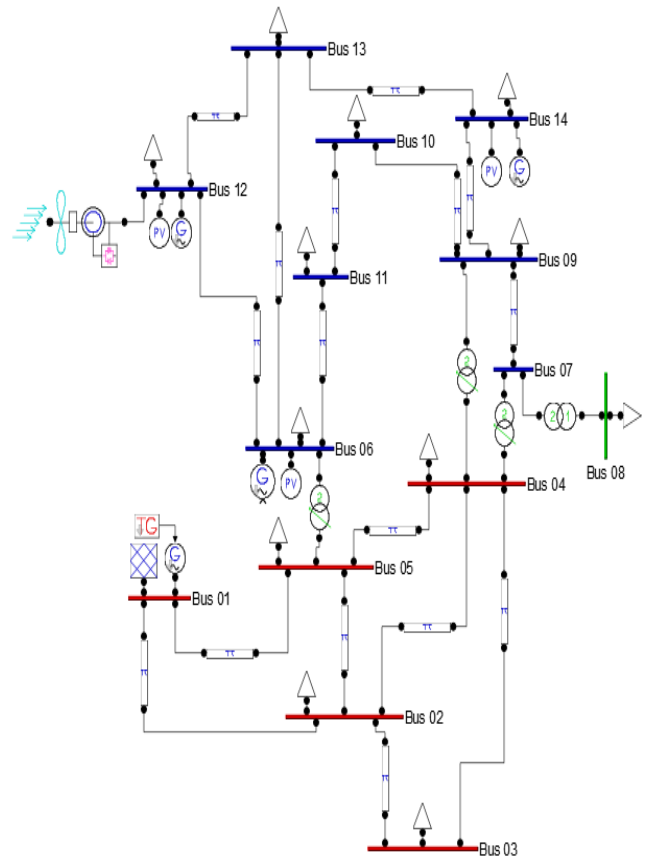


Fig. 3. Sistema de referência de 14 barras da IEEE com geração eólica

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Sistema operando com gerador de indução gaiola de esquilo (SCIG) na barra 12

O sistema eólico é representado por um parque eólico composto por 40 aerogeradores cada um com 2,5 MW de potência, inicialmente foi realizado o estudo com o gerador SCIG, como esse modelo de gerador opera com apenas duas

velocidades de rotação, a turbina só retém dois pontos de captura da máxima velocidade do vento, ocasionando uma menor geração de energia elétrica além disso, o gerador SCIG encontra-se diretamente ligado a rede elétrica, logo, variações de velocidade experimentadas pelo vento são conduzidas de forma direta a rede elétrica, ocasionando distorções de corrente e consequentemente, de tensão.

Os geradores síncronos convencionais utilizados no sistema não representam uma máquina só porém um grupo de geradores fortemente acoplados, dados das barras onde estão conectados os geradores síncronos em regime permanente calculados mediante o fluxo de potência, utilizando o PSAT/MATLAB, para o caso onde o parque eólico é composto por geradores de indução de rotor de gaiola de esquilo (SCIG) e se encontra conectado na barra 12, são mostrados na tabela I.

TABELA I. COMPORTAMENTO DO SISTEMA OPERANDO COM GERADORES DE INDUÇÃO DE ROTOR DE GAIOLA DE ESQUILO

Barras	Sistema operando com parque eólico SCIG na Barra 12			
	Tensão Vm (PU)	Potência ativa(MW)	Potência Reativa (MVar)	Ângulo (rad)
1	1,06	153,66	73,52	0
6	1,07	54,32	70,90	0,085
10	1,045	27,4	33,28	0,020
12	1,01	41,46	-62,06	0,19
14	1,09	70	12,82	0,12

Analisando os dados da tabela I, observa-se que as gerações de algumas barras ultrapassam o limite (Transformadores sem sobrecarga nas linhas e níveis de tensão no limite exigido), portanto necessita-se diminuir a quantidade de reativo, para realizar essa diminuição altera-se o valor da tensão das respectivas barras, o que gera um maior custo. O sistema apenas com geradores de indução gaiola de esquilo tem uma geração total de 383,6 MW (Potencia ativa) e 153,6 MVAR (Potencia reativa), o sistema de geração é maior que a potencia ativa da carga nos dois casos.

As figuras 4 e 5, respectivamente, apresentam o comportamento da velocidade do rotor (estabilidade) e o ângulo de potência delta (δ), dos geradores síncronos convencionais do sistema quando operam com o parque eólico compostos por geradores SCIG conectado na barra 12.

Da figura 4, pode-se perceber o sincronismo dos geradores do sistema, também é possível notar o efeito do parque eólico SCIG conectado na barra 12, na figura representada por $\omega_{SYN 4}$, nota-se que no inicio existe uma ligeira perda de sincronismo deste gerador mas a medida que passa o tempo ele tenta se recuperar e manter o sincronismo porem isto nos indica o efeito negativo na estabilidade do sistema do parque eólico SCIG.

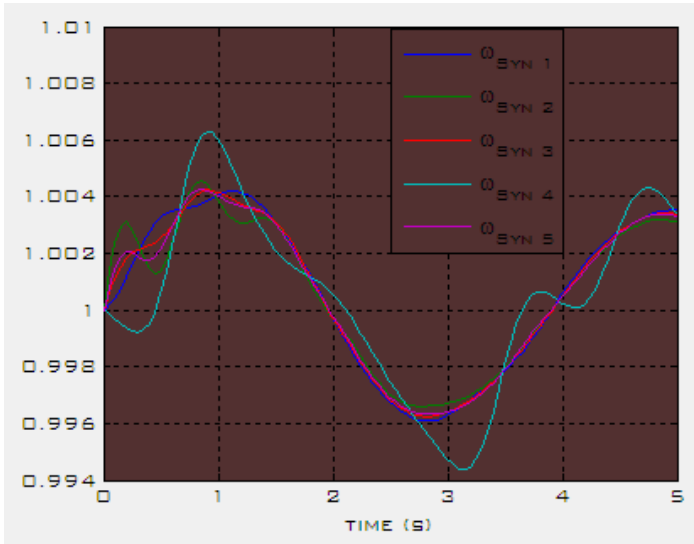


Fig. 4. Velocidade do rotor para cada gerador síncrono, com geração Eólica SCIG conectado na barra 12 ($\omega_{SYN 4}$)

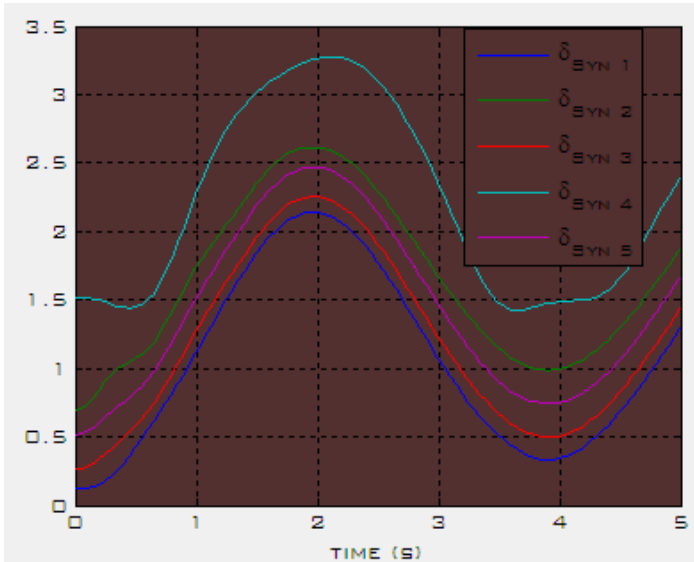


Fig. 5. Ângulo de potencia dos geradores síncronos do sistema, com geração eólica SCIG conectado na barra 12 ($\delta_{SYN 4}$)

Na figura 5, podemos confirmar esta ligeira perda de sincronismo e posterior recuperação mediante o angulo delta.

B. Sistema operando com Gerador de Indução Duplamente alimentado (DFIG) na barra 12

Posteriormente o parque eólico DFIG é adicionado ao sistema, o qual é composto por 40 turbinas sendo cada uma de 2,5 MW de potência. O parque eólico é conectado na barra 12, da mesma forma como foi conectado o parque eólico SCIG, às simulações foram realizadas com o parque funcionando com DFIGs, com intuito de evidenciar como a geração eólica acontece de forma mais estável com o uso do gerador duplo alimentado. Os resultados para o sistema operando apenas com o parque eólico DFIG são mostrados nas figuras 6 e 7 abaixo, respectivamente.

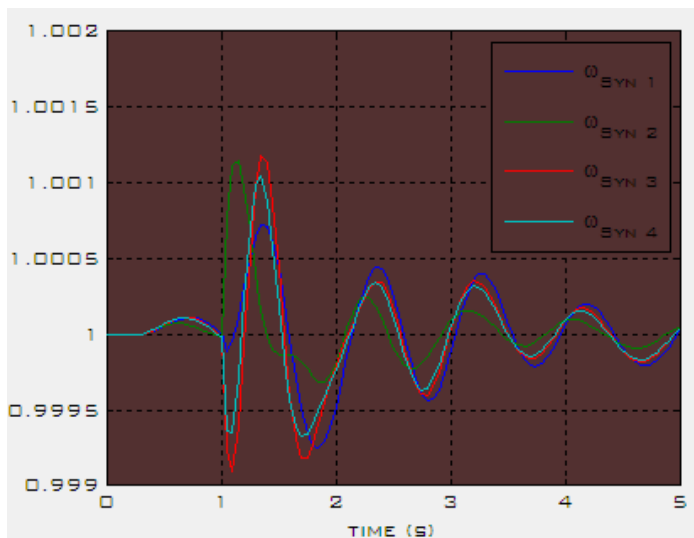


Fig. 6. Velocidade do Rotor para cada gerador síncrono, sistema com geração Eólica DFIG na barra 12

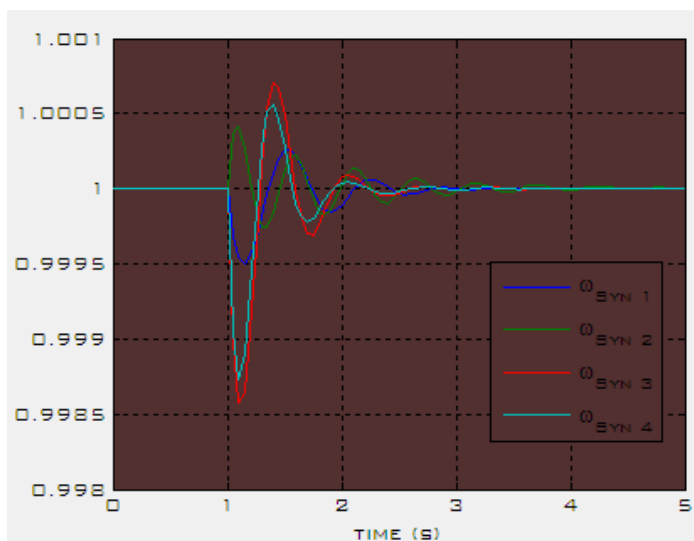


Fig. 7. Velocidade do Rotor para cada gerador síncrono, sistema com geração Eólica DFIG na barra 12

Comparando a velocidade do rotor de cada gerador nas figuras 6 e 7, pode-se assegurar que existe uma diminuição da estabilidade do sistema na figura 7, isso acontece porque não há como se controlar a tensão terminal do (DFIG), uma vez que ele está operando com $FP = 1$, porém em comparação com o caso anterior (uso do SCIG) é indicado que se trabalhe com um gerador DFIG onde se possa controlar a tensão terminal, ou seja, variar o fator de potência. Com esse DFIG o limite de estabilidade do sistema é expandido, tornando vantajoso o uso de geradores de indução duplamente alimentado (DFIG).

Ao analisar o comportamento do sistema segundo os gráficos 4 e 6, que analisam a velocidade do rotor quando interatuam com o parque eólico com geradores SCIG e DFIG, respectivamente, constata-se que o Gerador DFIG não exibe distúrbios de velocidade ao longo do tempo de funcionamento, estes distúrbios são gerados pelo parque eólico quando a velocidade do vento é mudada inesperadamente.

De acordo com a figura 7 é verificado também que para o caso do gerador DFIG, a turbina opera em seu ponto ótimo, ou seja, o gerador chega a sua potência nominal de forma mais rápida.

VI. CONCLUSÕES

Com fundamento nas simulações anteriores, é plausível concluir que há maior eficiência do parque eólico quando se opera o sistema com o gerador duplo alimentado (DFIG), ou seja, a estabilidade e geração do sistema é maior ao se operar com o DFIG, além disso, é possível observar que ocorre uma diminuição da oscilação quando este gerador é acoplado ao sistema.

Os Geradores do tipo DFIG concedem uma faixa de velocidade de operação bem mais considerável que os Geradores do tipo SCIG. Logo, para o modelo de aerogerador DFIG é possível modificar a velocidade do rotor da turbina para valores variados velocidades de vento e dessa maneira preservar a relação de velocidade constante (λ) e o coeficiente de potência (C_p) em seu valor máximo.

Em Suma, os Geradores duplamente alimentados (DFIG) proporcionam ao sistema de geração eólica um maior limite de estabilidade, quando comparado com o gerador de indução gaiola de esquilo (SCIG).

Conclui-se que o sistema eólico é variável, portanto não se pode afirmar que exista definição teórica única, uma vez que isso depende do tipo de turbina, do vento. Assim, a estabilidade transitória do sistema fica dependente destes fatores. Porém pode-se falar em vantagem de estabilidade do parque eólico, quando se utiliza o gerador de indução duplamente alimentado ao invés do gerador de indução gaiola de esquilo.

REFERÊNCIAS

- [1] A. S. Filho e J. G. Cardoso, "Energia eólica: tipos de geradores e conversores usados atualmente" Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), São Paulo, Brasil, 2014.
- [2] D. Rakesh, M. S. Kumari, M. Sydulu, F. Grimaccia, M. Mussetta, S. Leva, M. Q. Duong, "Impact of SCIG, DFIG Wind Power Plant on IEEE 14 Bus System with Small Signal Stability Assesment". IEEE India Conference (INDICON), 2014.
- [3] Energia Eólica, disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06_energia_eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06_energia_eolica(3).pdf), São Paulo, Brasil, 2002.
- [4] F. Milano, "Power System Analysis Toolbox," Version 1.3.4, Software and Documentation, July 14, 2005.
- [5] J. C. Muñoz, and C. A. Cañizares, "Comparative Stability Analysis of DFIG-based Wind Farms and Conventional Synchronous Generators" March, 2011.
- [6] J. G. Slootweg, H. Polinder, and W.L. Kling, "Dynamic modeling of a wind turbine with doubly fed induction generator" Artigo científico. Vancouver, BC, Canada, 2001.
- [7] J. Marques, "Turbinas Eólicas: Modelo Análise e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação" Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, Brasil, 2004.
- [8] L.M. Fernandez, F. Jurado, and J.R. Saenz, "Aggregated dynamics model for Wind farms with doubly fed induction

generador Wind turbines” Artigo científico. Renewable Energy, 2008.

- [9] J. C. Pequena Suni, S. P. Larissa, A. R. Jorge y E. Ruppert, “Sobre Generación Eólica y Comportamiento Dinámico del Sistema Eléctrico de Potencia Utilizando PSAT/Matlab”, CIIE, Arequipa, Perú, 2015.
- [10] R. Teciote, “A energia eólica e o meio ambiente” Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), São Paulo, Brasil, 2002.
- [11] R. Manoel Cândido de Lima. 2009. Analise do comportamento de aerogeradores frente a afundamentos momentâneos de tensão. Belo Horizonte : s.n., 2009.
- [12] Christopher L. Brooks, P.E. “Na overview of Wind plant design standards and common nomenclature and available resources to the power engineer”, IEEE, Chicago, USA, 2014.