



**XXIII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPT/11  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - II**

**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT**

**ESTUDO DA OPERAÇÃO COORDENADA DE UM STATCOM E AEROGERADOR BASEADO EM MÁQUINA DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADA**

**Francisco Kleber A. Lima\*   Marlos Diógenes Lucas   Ernande Eugenio C. Moraes   Carlos Gustavo C. Branco**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEE**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - UFC**

**RESUMO**

Este trabalho apresenta o estudo coordenado entre compensador síncrono estático (STATCOM) conectado ao sistema elétrico de potência composto tanto por geração convencional quanto por aerogerador baseado em máquina de indução duplamente alimentada (DFIG). É mostrado que um sistema com ambos os dispositivos (DFIG e STATCOM) é capaz de se comportar com tensão regulada e um FP controlado. No entanto, diante a evolução dos procedimentos de rede, este trabalho dá ênfase à suportabilidade de tensão e estabilidade do sistema. Os resultados deste estudo são apresentados através dos *softwares* MATLAB e ANAREDE, a fim de validar a teoria apresentada.

**PALAVRAS-CHAVE**

Aerogeradores, DFIG, Dispositivos FACTS, Geração distribuída.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A medida em que a capacidade instalada de fornecimento de energia se expande, a chance de ocorrer contingências na rede elétrica também aumenta. Pelo fato de nos últimos anos a conversão eólico-elétrica ter se expandido exponencialmente a nível global, como mostrado em [1], dinâmicas como curtos-circuitos, entrada ou saída de grandes blocos de cargas acabam causando oscilações na tensão do sistema. Isto pode ser bastante prejudicial para unidades geradoras que não tenham tanta robustez no que diz respeito a suportabilidade de tensão. Em especial os aerogeradores equipados com DFIG, que tem seu estator conectado diretamente à rede elétrica. O DFIG foi escolhido para este estudo devido sua capacidade de oferecer boa solução na controlabilidade da potência ativa, assim como da potência reativa em uma escala razoável [2]. Acredita-se que nos dias de hoje, a popularização do DFIG em plantas eólicas, corresponde a mais de 50% de todas as unidades *on-shore* existentes no mundo, segundo afirma [3].

Entretanto o problema da oscilação de tensão pode ser sanado com uma compensação reativa adequada. Isto significa dizer que se a compensação reativa for suficientemente rápida, não haverá qualquer mudança na característica operacional do DFIG.

Além da capacidade que o STATCOM oferece de regular a tensão no ponto de conexão através da compensação reativa, é possível ajustá-lo para que, ao invés disso, haja o controle do fator de potência do sistema. Isto pode ser feito devido a mudança da referência no controle. Nos próximos tópicos haverá uma breve abordagem para o controle do DFIG bem como do STATCOM.

Partindo deste cenário, para o cumprimento da suportabilidade de tensão através da utilização de um STATCOM, faz-se necessário ter ciência de sua potência nominal. Neste trabalho foi adotado um critério de dimensionamento

(\*) Endereço Rua Humberto Monte, S/N, Campus do Pici – Bloco 705 – CEP 60.455-760 Fortaleza, CE – Brasil  
Tel: (+55 85) 3366-9650 – Fax: (+55 85) 3366-9574 – Email: kleber@coe.ufjf.br

do STATCOM através da análise da Estabilidade Estática de Tensão (EET). Este critério consiste basicamente na análise da característica P-V do sistema. Em outras palavras, o dimensionamento do STATCOM foi feito através da análise da curva P-V visando o atendimento dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Toda a metodologia desenvolvida para a análise da EET do sistema bem como o dimensionamento do STATCOM serão especificadas nos próximos tópicos.

Os resultados deste estudo são apresentados através dos *softwares* MATLAB e ANAREDE, a fim de validar a teoria apresentada.

## 2.0 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Esta seção mostrará o princípio de funcionamento dos aerogeradores baseados em DFIG, assim como dos dispositivos STATCOM.

### 2.1 O DFIG

Esta é uma máquina de velocidade variável conectada diretamente a rede através do estator e a um conversor CA-CC-CA, comumente conhecido como conversor *back-to-back*, através do rotor, formando a topologia clássica. O conversor *back-to-back* é composto por dois conversores: o Conversor do Lado da Rede (CLR) e o Conversor do Lado da Máquina (CLM). Para maior entendimento, a Figura 1 traz a topologia estudada por este trabalho.

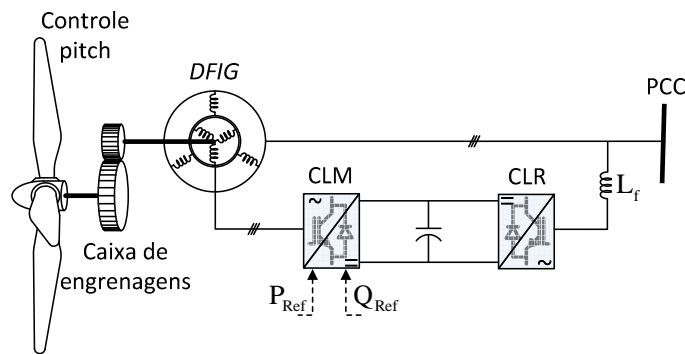


FIGURA 1 – Topologia clássica de aerogeradores equipados com DFIG.

Os conversores são acoplados através de um elo-CC que é controlado e regulado constantemente pelo CLR. Enquanto que o CLM tem o objetivo de controlar de forma independente, as potências ativa e reativa do estator através das correntes do rotor. O conversor *back-to-back* é projetado para processar apenas uma parcela de toda a energia convertida através dos ventos. Isso significa que, dependendo da operação da máquina, caso esta esteja sujeita a uma velocidade de vento acima da nominal (regime supersíncrono) o rotor poderá transmitir até +30% da potência ativa do estator. Caso o vento esteja abaixo da nominal, o simétrico ocorre, fazendo com que o rotor consuma até 30% da potência gerada pelo estator. É possível ajustar a máquina para que ela opere no regime síncrono. Isso permite que as perdas no ramo do rotor sejam muito baixas.

#### 2.1.1 DFIG: Controle do CLM

Para que o aerogeradores baseado em DFIG opere adequadamente é necessário que haja o desacoplamento das potências ativa e reativa do estator da máquina. Para isto, o Conversor do Lado da Máquina (CLM) tem a função de através da técnica de controle orientando pelo campo, do inglês, *Field Oriented Control* (FOC), controlar, através da corrente do rotor, as potências do estator.

De acordo com o desenvolvimento matemático apresentado em [3-8] é possível mostrar que as potências ativa e reativa do estator, em regime permanente, podem ser escritas como:

$$p_s = -v_{sq} \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \quad (1)$$

$$q_s = -\frac{v_{sq}^2}{\omega_s L_s} + \frac{L_m}{L_s} v_{sq} I_{rd} \quad (2)$$

Isto significa que através do controle das correntes do rotor nos eixos direto e em quadratura, nas coordenadas de Park (8), é possível controlar as potências ativa e reativa do estator de maneira independente. Com o objetivo de sintetizar esta informação a Figura 3 mostra o controle o diagrama de blocos do controle do CLM.

### 2.1.3 DFIG: Controle do CLR

$$\vec{v}_e = \frac{2}{3} \left( v_{ea} + v_{eb} e^{j\frac{2\pi}{3}} + v_{ec} e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) \quad (3)$$
$$P_{CA} = P_{CC} = \frac{3}{2} v_{ed} I_d \quad (4)$$
$$Q_r = \frac{3}{2}(v_{ed}I_q - v_{eq}I_d) = \frac{3}{2}v_{ed}I_q \quad (5)$$
[illegible]

## 2.2 O STATCOM

O STATCOM é um dispositivo FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) que tem como principal objetivo, realizar a compensação reativa de forma dinâmica em sistemas de transmissão, aumentando, inclusive, a estabilidade do sistema.

### 2.2.1. Estrutura do STATCOM

O modelo esquemático da Figura 5 mostra um conversor fonte de tensão, do inglês, *Voltage Source Converter* (VSC), um elo-CC e a indutância equivalente entre as indutâncias da rede e do transformador de acoplamento. Geralmente, o inversor faz uso de chaves semicondutoras (IGBT's) para processar a energia armazenada no capacitor para gerar tensões síncronas trifásicas nos terminais de saída [10].

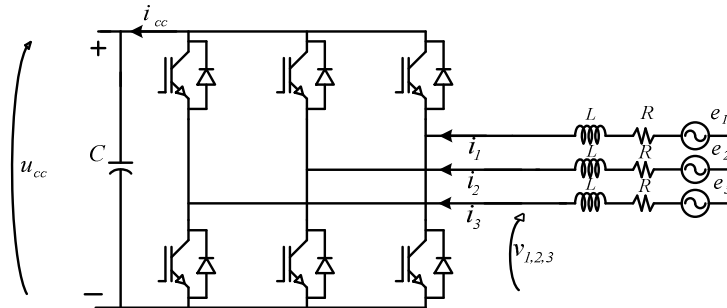


FIGURA 5 – Topologia do estágio de potência do STATCOM.

Um dos principais benefícios do STATCOM para a transmissão é a regulação de tensão através da compensação reativa. De acordo com [10] e [11] a compensação de reativos é usada tanto para regular a tensão como para a prevenção da instabilidade estática. O controle dinâmico da tensão a fim de aumentar a margem de estabilidade é um excelente benefício ao sistema.

### 2.2.2. Controle do STATCOM

O controle de um STATCOM se baseia em injetar (característica capacitiva) ou drenar (característica indutiva) uma corrente reativa sintetizada pelo conversor a fim de que o mesmo regule a tensão no ponto de conexão ou controle do fator de potência [8-11].

Neste trabalho, o sistema de controle será baseado em coordenadas estacionárias  $\alpha\beta$ , deduzidas pela transformada de *Clarke*. O diagrama de blocos do controle do STATCOM é apresentado na Figura 6

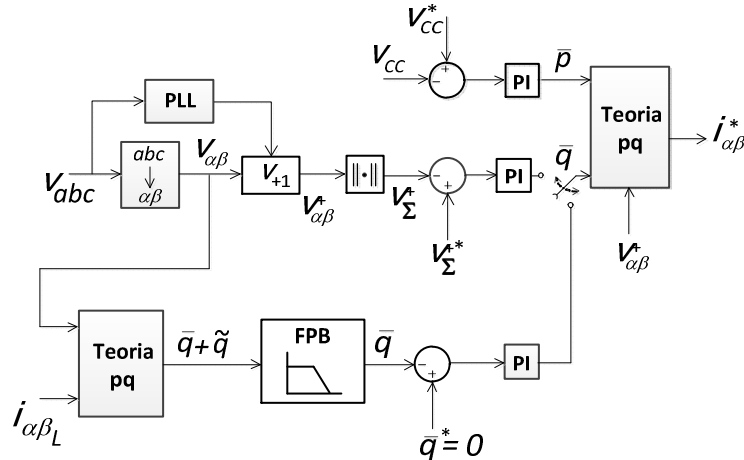


FIGURA 6 – Diagrama de blocos do sistema de controle do STATCOM.

É possível verificar no diagrama de controle que o STATCOM possui dois modos exclusivos de controle. O modo de regulação de tensão e o modo de controle do fator de potência. O STATCOM é incapaz de operar nos dois modos simultaneamente devido a existência de uma única variável de referência de controle.

Isto significa que estando a potência reativa de referência  $\bar{q}$  setada em um determinado valor de referência para atuar como regulação de tensão, O fator de potência por si já terá valor diferente de zero, e portanto, perdendo-se a capacidade de controle deste.

### 2.3. Estabilidade Estática de Tensão

Segundo [12] a estabilidade da tensão é o termo adotado para a habilidade de um sistema elétrico de potência manter a tensão em níveis aceitáveis em todos os barramentos do sistema para condições normais e pós-falta. A estabilidade de tensão é um fenômeno que está intimamente ligado com suas fontes de reativos do sistema. Isso dignifica dizer que caso essas fontes estejam muito longe para dar o devido suporte a qualquer evento de

contingência, como a perda de uma linha ou o aumento súbito de carga, por exemplo, a atuação da proteção do Sistema Elétrico de Potência (SEP) pode provocar um desligamento em cascata [13].

É entendido que se um SEP possui um bom sistema de compensação reativa, este por sua vez tem uma maior robustez operacional. Isto é, mais facilmente este sistema estará sujeito a uma situação de colapso, característica que pode levar um SEP a um desligamento geral. É possível visualizar o ponto crítico de um sistema através de curvas P-V. Muitos operadores de sistemas preferem adotar softwares especializados em fluxo de potência para o desenvolvimento destas curvas. Exemplo disso é o ANAREDE, software capaz de realizar diversos estudos em sistemas elétricos de potências baseado em fluxo de potência continuado, bastante utilizado pelo ONS. No entanto, existem diversas maneiras de se desenvolver uma curva P-V, como é mostrado por [13], que faz uso da linearidade matemática. Este trabalho não adota um modo iterativo para o cálculo do fluxo de potência.

A curva P-V determina a demanda máxima que o sistema pode atender, mostrando a proximidade que o sistema se encontra de um colapso de tensão. As curvas P-V são geralmente traçadas através de fluxo de potência. A Figura 7, trás um exemplo de curvas P-V para um sistema sob diferentes valores de FP.

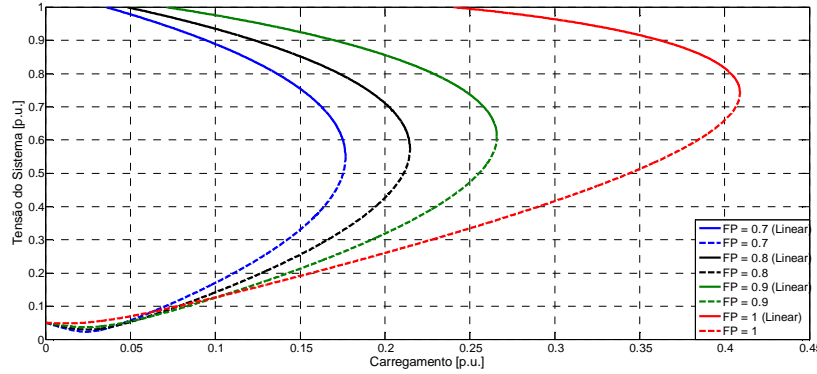


FIGURA 7 – Curvas P-V para diferentes fatores de potência de um sistema.

Através das curvas P-V desta, é possível extrair diversas análises, como carregamento do sistema, comportamento da tensão com o acréscimo de carga e até mesmo o dimensionamento de dispositivos como o STATCOM.

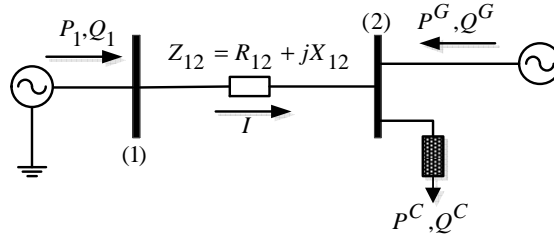


FIGURA 8 – Sistema de duas barras com geração e carga.

Analisando a Figura 8, que liga uma barra 2 a uma barra 1, pode-se estabelecer [14]:

$$\vec{I}_2 = \frac{\vec{V}_2 - \vec{V}_1}{\vec{Z}_{12}} \quad (6)$$

A potência líquida na barra 1 é dada pela equação (7). Substituindo o conjugado de (6) é possível obter.

$$\vec{S}_2 = \vec{V}_2 \cdot \vec{I}_2^* = P_2 + j \cdot Q_2 \quad (7)$$

Ao substituir a corrente na linha pelo conjugado de (6) em (7), pode-se obter a equação (8) após as devidas manipulações matemáticas.

$$a_4 \cdot V_2^4 + a_2 \cdot V_2^2 + a_0 = 0 \quad (8)$$

A equação (8) possui as mesmas características da equação descrita em [15], sendo biquadrada em  $V_y$ . Tal equação pode ser utilizada para desenhar a curva P-V da barra 2. As variáveis  $a_4$ ,  $a_2$  e  $a_0$ , dependem do conhecimento da impedância da linha entre as barras (1)-(2), das potências ativas e reativas líquidas na barra 2 e da magnitude da tensão na barra 1. Segundo [16], um sistema descrito como na Figura 8 deve apresentar uma *swing bus* com tensão conhecida em módulo e ângulo, e a outra barra pode ser uma *load bus* (barra PQ, [ANAREDE]) ou ainda uma *voltage controlled bus* (barra PV, [16]). Em ambos os casos, a potência líquida na barra 2, em questão, bem como a impedância da linha e o módulo da tensão na barra 1 devem ser conhecidos.

A potência líquida, ativa e reativa, na barra 2 pode ser obtida, de forma genérica, da equação (9), [14].

(9)

### 3.0 - OPERAÇÃO COORDENADA ENTRE DFIG E STATCOM

O sistema de compensação reativa, seja para um dispositivo FACTS ou para uma unidade de geração é obtido de forma semelhante. Em outras palavras, numa unidade de geração, a potência reativa também é controlada por uma variável de referência. Como é sabido, o STATCOM é capaz de operar tanto em controle do FP quanto regulação da tensão, criam-se duas opções, a saber:

- a. STATCOM controlando FP + DFIG regulando tensão: Com esta característica, o sistema em questão, terá um barramento com tensão regulada em 1,0 p.u. enquanto o FP tenderá à unidade.
- b. STATCOM regulando tensão + DFIG regulando tensão: Com este modo de operação, ambos equipamentos procuram o mesmo objetivo de regular a tensão em 1,0 p.u. O FP, por não está sendo controlado por nenhum dos equipamentos, poderá assumir qualquer valor.

### 3.1 Sistema Estudado

Neste trabalho, é proposta uma situação com dados reais, que uma barra de referência (barra 1) é conectada a uma barra PV (barra 2). Segundo [16], uma barra de referência possui tensão fixa e conhecida em módulo e ângulo, já a barra PV possui injeção de potência ativa e magnitude de tensão fixos e conhecidos. A barra PV, por sua vez, é inicialmente conectada à um grupo de cargas e à barra que representa um complexo de conversão eólico-elétrica. Em seguida, com objetivo de comparação, é adicionado ao sistema, um STATCOM para a otimização operacional do sistema. O STATCOM é conectado na barra 4. A Figura 9(a), mostra o diagrama completo do sistema estudado, enquanto que em (b), a equivalente do sistema simulado no ANAREDE.



FIGURA 9 – (a) Sistema estudado; e (b) Sistema simulado no ANAREDE.

Para a especificação do sistema estudado, a Tabela 1, concentra todos os valores de tensão, bem como os de nível de potência e impedância entre barras. As bases consideradas para cálculo de valores por unidades também são explicitadas.

Tabela 1 – Dados do sistema.

Parâmetros AT	Valores	Parâmetros BT	Valores	Bases (AT)	Valores	Parâmetros DFIG	Valores
Impedância da rede [p.u.]	3.95E-03	Impedância da LT [p.u.]	0.0302	Tensão [kV]	138	Potência nominal [MVA]	1.5
Impedância da LT [p.u.]	0.0229	Impedância do Trafo 2 [p.u.]	2.65	Potência [MVA]	100	Potência ativa [MW]	1.2
Impedância do Trafo 1 [p.u.]	1.355	Impedância do Trafo 3 [p.u.]	2.65	Parâmetros da Carga	Valores	Potência reativa máx[Mvar]	0.9
Tensão [kV]	138	Tensão [kV]	34.5/0.69	Potência ativa [MW]	15.8		

### 3.2 Dimensionamento

### 3.2.1. Dimensionamento do DFIG

O aerogerador equipado com DFIG tem potência nominal de 1,5 kVA e está compensando 900 kvar, além disso, foi considerado a geração de ativos igual a 1,2 MW.

### 3.2.2. Dimensionamento do STATCOM

Para o dimensionamento da potência nominal do STATCOM, foi usado um critério de análise de Estabilidade Estática de Tensão (EET). Este critério faz uso da análise da característica P-V do sistema. Isto significa que para

uma determinada carga que provoque uma queda de tensão considerável ao sistema proposto, a potência mínima do STATCOM deve ser aquela para a qual seja capaz de reestabelecer a tensão para níveis exigidos por procedimentos de rede.

A curva P-V é composta por uma solução com raízes reais e outra por uma solução com raízes complexas. Muitos softwares de fluxo de potência continuado como o ANAREDE geralmente deixam de plotar a solução complexa da curva por não ter utilidade para análise de estabilidade. Por tanto, nos gráficos processados pelo ANAREDE não estará contido a parte complexa da curva. A solução por MatLab, mostrará ambas soluções.

Nos estudos realizados no presente trabalho, foi considerada uma perda de 10 kW inerente ao STATCOM. Além disso, essa perda foi mantida constante para uma ampla faixa de valores de reativo injetado pelo STATCOM, a fim de simplificar os cálculos mantendo coerência com um modelo real de STATCOM.

Aplicando toda a teoria por trás da EET, consegue-se chegar, através do software MatLab, na curva P-V do sistema original da Figura 9(b), porém sem STATCOM, como mostra a Figura 10.

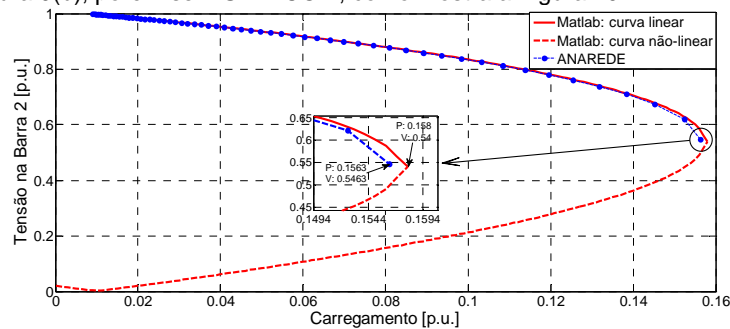


FIGURA 10 – Curva P-V para o sistema original.

É possível também verificar a validação dos resultados com o ANAREDE, com erro inferior a 1,16%. Para explicitar o benefício do STATCOM ao sistema, foi tomado como referência de análise, o ponto crítico, que é representado por uma carga com FP 0,70. Este ponto indica a máxima capacidade do sistema sem que ele entre em colapso de tensão.

No sistema da Figura 9(b), ou seja, com a presença do STATCOM, a curva P-V deve assumir um comportamento de forma otimizada. Isto significa dizer que para uma carga correspondente ao ponto crítico, a tensão assumirá um valor maior do que 0,54. De acordo com [17], a tensão na barra 2 deve ter valor mínimo de 0,95 p.u. e máximo de 1,05 p.u. Para este trabalho, como já dito, deseja-se obter um valor de STATCOM para fornecer ao sistema uma tensão de 0,95 p.u. sob a condição de carga crítica. A partir da matemática reversa, é possível chegar aos valores de potência nominal do STATCOM para qual tensão fornecida ao barramento regulado, no caso, barra 2. A Figura 11 ilustra o ábaco desenvolvido para carga crítica sob FP de 0,7, 0,8 e 0,9.

Para validação dos resultados obtido pelo ábaco, a Figura 12, mostra a curva P-V sob a potência nominal de 18,27 MVA, especificada pelo ábaco de FP igual a 0,7.

Com a comparação feita entre as curvas P-V original e final, fica claro verificar a melhoria trazida pelo STATCOM, ao sistema. No sistema original, uma carga de 15,8 MW com valor fixo de FP em 0,7, proporciona ao sistema um ponto crítico com tensão 0,54 p.u. ao sistema. Após a instalação do STATCOM é possível verificar que a curva P-V, além de proporcionar o deslocamento do ponto crítico, readequou a tensão do sistema imposta por procedimentos, tornando-o apropriado à operação.

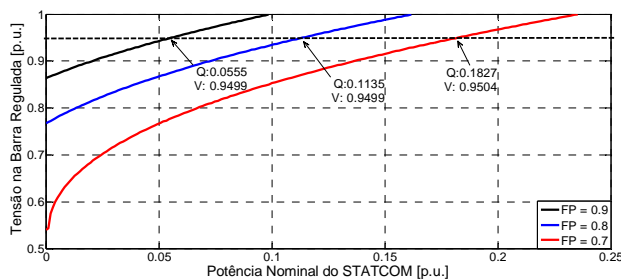


FIGURA 11 – Ábaco da relação da potência nominal do STATCOM e a tensão na barra 2.

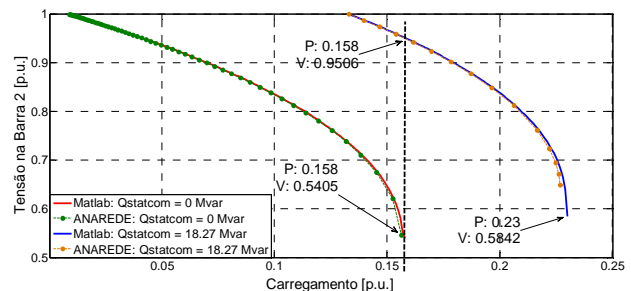


FIGURA 12 – Curva P-V após o dimensionamento do STATCOM.

#### 4.0 - OPERAÇÃO COORDENADA ENTRE DFIG E STATCOM

Existem várias perspectivas sobre o dimensionamento do STATCOM. Contudo, todas têm como objetivo dar um suporte de reativo para que os níveis de tensão dos barramentos dos sistemas fiquem dentro da normalidade frente as normas vigentes.

Diante do observado sobre a Figura 10, pode-se verificar que a capacidade nominal mínima do STATCOM pode ser estabelecida para uma dada carga cuja potência levaria a tensão da barra 2 abaixo de 0,95 p.u.

Sobre o dimensionamento da potência máxima do STATCOM algumas perspectivas levantadas por este trabalho:

- Níveis de tensão: Uma das possibilidades de existir fluxo de potência entre barras é com a diferença entre tensões das mesmas. A medida que a potência nominal do STATCOM aumenta, isso acarreta ao barramento onde ele é conectado, uma tensão demasiadamente elevada. Isso pode ser um problema no que diz respeito a cumprimentos de limites impostos por normas e procedimentos de transmissão.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo da aplicação de um STATCOM em sistemas de potência com participação de um aerogerador baseado em DFIG. Uma abordagem teórica sobre o STATCOM também foi mostrada a fim de proporcionar o conhecimento dos benefícios trazidos ao sistema na adoção do mesmo. Foi abordada a suportabilidade de tensão tanto para o DFIG quanto para o STATCOM. O trabalho apresenta também um embasamento geral sobre curvas P-V e análise da estabilidade em um sistema de potência.

O trabalho mostra uma técnica para o dimensionamento da potência nominal mínima do STATCOM para que, sob um cenário de carga crítica, seja possível tornar o sistema estudado, apto a operar sob regras vigentes de normas e procedimentos. Esta técnica torna possível o desenvolvimento de um ábaco capaz de expressar de forma prática qual potência mínima do STATCOM deve ser adotada para uma determinada exigência de tensão.

Por fim, apresentou-se uma pequena discussão abordando alguns critérios principais que podem servir como ponto de parada na definição da potência máxima do dispositivo.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Global Wind Statistics – 2014 – 10.02.2015. Disponível em: <<http://www.gwec.net>>. Acessado 30 de março de 2015
- (2) R.W. De Doncker, D. W. Novotny, "The universal field oriented controller", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, nº. 1, pp. 92-100, 1994.
- (3) F.K.A. Lima, A. Luna, P. Rodríguez, E.H. Watanabe, F. Blaabjerg, "Rotor Voltage Dynamics in the Doubly Fed Induction Generator During Grid Faults". Power Electronics, IEEE Transactions on Volume: 25, Issue: 1. 2010, pp: 118-130.
- (4) A. Luna, F.K.A. Lima, D. Santos, P. Rodríguez, E.H. Watanabe, S. Arnaltes, "Simplified Modeling of a DFIG for Transient Studies in Wind Power Applications". Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume: 58, Issue: 1. 2011, pp: 9-20.
- (5) F.K.A. Lima, E.H. Watanabe, P. Rodríguez, A. Luna, "Controle de Gerador de Indução Duplamente Alimentado Diante de Afundamentos de Tensão", Revista de Eletrônica de Potência da SOBRAEP, pp. 189-199, 2009.
- (6) F.K.A. Lima, E.H. Watanabe, P. Rodríguez, A. Luna, "Control Strategy for the Rotor Side Converter of a DFIG-WT under Balanced Voltage Sag", Proc. of COBEP, pp. 842-847, 2009.
- (7) F.K.A. Lima, Aerogerador Baseado em Máquina de Indução Duplamente Alimentada – Suportabilidade para Afundamento de Tensão. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2009.
- (8) W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*. Springer, 3ª ed., Nova York, 2006.
- (9) P.K. Kovacs, 1984, *Transient Phenomena in Electrical Machines*. Amsterdam, Netherland: Elsevier.
- (10) A. J. ORTIZ, M. AREDES, E. Bueno, P. Rodríguez, "Comparative study of the current and voltage controllers applied to the STATCOM". Industrial Electronics Society (IECON) - 33rd Annual Conference of the IEEE, Taipei, Taiwan, Nov. 5-7, 2012.
- (11) A.J.O. Riquelme, Contribuições ao Controle do STATCOM. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Outubro 2007.
- (12) P. Kundur, N. Balu, M. Lauby. *Power system stability and control*. McGraw-Hill, 1994.
- (13) MARIOTTO, L. *Avaliação da Segurança da Operação de Sistemas Elétricos de Potência Considerando os Limites de Estabilidade Angular e de Tensão*. Tese de Doutorado — UFSM, Fevereiro 2008.
- (14) J. D. Glover, M. Sarma and T. Overbye, *Power System Analysis & Design*. Cengage Learning, 2007.
- (15) M.H. Haque, "Determination of Steady-State Voltage Stability Limit using P-Q Curve", in: IEEE Power Engineering Review, 2002, Vol. 22, pp. 71-72.
- (16) ANAREDE - Análise de Redes Elétricas. Disponível em: <<http://www.anarede.cepel.br/>>. Acesso em: 30 de março de 2015.
- (17) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*. Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 30 de março de 2015.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Francisco Kleber de A. Lima**, nascido em 03 de novembro de 1968 em Fortaleza é Engenheiro Eletricista (1998) e Mestre em Engenharia Elétrica (2003), pela Universidade Federal do Ceará. Recebeu o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2009. Dr. Kleber Lima é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, qualidade de energia e acionamentos de máquinas elétricas. Francisco Kleber de A. Lima é membro da SOBRAEP desde 2002.



**Marlos Diógenes Lucas**, nascido em 15 de maio de 1989 em Fortaleza. Recebeu o título de engenheiro eletricista pela Universidade de Fortaleza (UNIFOR) em 2012. Atualmente faz parte do programa de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará (UFC) onde estuda aplicações de sistemas de geração baseados em máquina de indução duplamente alimentada (DFIG) e dispositivos FACTS em sistemas elétricos de potência.



**Ernande Eugenio C. Morais**, nascido em 28 de maio de 1987 em Fortaleza é Engenheiro Eletricista (2011) e Mestre em Engenharia Elétrica (2014), pela Universidade Federal do Ceará. Atualmente faz parte do programa de Doutorado da Universidade Federal do Ceará (UFC) onde estuda eletrônica de potência aplicada a sistemas de potência e acionamento de máquinas. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica com ênfase em sistemas de energia, eletrônica de potência e acionamentos e qualidade de energia.



**Carlos Gustavo Castelo Branco** possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (2002) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (2005). Durante o Mestrado trabalhou em Projetos de P&D na área de Fontes Ininterruptas de Energia (UPS) e Conversores de Alta Potência. Desde 2005 trabalha na área de Pesquisa e Desenvolvimento de sistemas UPS Isolados em Alta Frequência, Sistemas de Energia Fotovoltaica e Acionamentos de Máquinas. Atualmente é professor assistente do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará. É membro do IEEE e SOBRAEP.