

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIZ FERNANDO DO NASCIMENTO

**REGULAÇÃO DE POTÊNCIA EM AEROGERADORES VIA EQUIPAMENTO
STATCOM COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

CURITIBA

2019

LUIZ FERNANDO DO NASCIMENTO

**REGULAÇÃO DE POTÊNCIA EM AEROGERADORES VIA EQUIPAMENTO
STATCOM COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletrotécnica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial á obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Roman Kuiava.

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

LUIZ FERNANDO DO NASCIMENTO

REGULAÇÃO DE POTÊNCIA EM AEROGERADORES VIA EQUIPAMENTO
STATCOM COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Dedico este trabalho à minha família e amigos, em especial meu pai Luiz César do Nascimento, que me influenciou durante toda a caminhada na engenharia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente aos meus pais, Luiz César do Nascimento e Jucionara Bertolla do Nascimento, por sempre me apoiar em todos os momentos da vida, aos meus irmãos Guilherme do Nascimento e Lucas Schip do Nascimento, que sempre me incentivaram a ser uma pessoa melhor.

Aos meus amigos de infância, Bruno, Lucas, Otavio, Vinicius, André e Matheus. Que durante a infância puderam compartilhar a felicidade comigo.

Aos meus amigos de ensino médio, Erik, Fernando, Lucas, Guilherme, Marco, Clara, Isabela e Natasha. Que me ensinaram o real significado da palavra amizade.

Aos colegas de turma e amigos que conheci durante a faculdade, que me ajudaram durante todo o processo estudantil e de crescimento, assim pude me tornar uma pessoa mais justa, correta e feliz.

Aos meus familiares, que estiveram presentes durante as comemorações e eventos importantes da vida.

E um agradecimento especial para a minha namorada Isabela Wendler Miranda, que conheci apenas nos últimos anos, porém nesse espaço curto de tempo me fez perceber o quanto sou feliz e abençoado.

Agradeço também aos professores do departamento que me auxiliaram na caminhada estudantil.

Por fim agradeço a Deus por toda a saúde e sorte que tenho na vida.

“O meu sonho se tornou realidade agora, e é
a melhor sensação que tive”

LeBron Raymore James

RESUMO

Nos dias atuais, o mundo é dependente da energia elétrica, o seu consumo aumenta exponencialmente e a poluição gerada por fontes de energia não renováveis limita o potencial de geração de energia, assim se faz necessário buscar alternativas que não agredem o meio ambiente e produzam a energia necessária para suprir a demanda global. Em especial a energia eólica é ascendente em todo o mundo, apesar de sua tecnologia ser simples, o seu impacto nos sistemas elétricos é complexo e muitas vezes negativo em termos de qualidade de energia. Como a variação instantânea do vento influencia de maneira negativa a geração de potência das turbinas eólicas, é importante estudar métodos de regulação de potência para suavizar as variações geradas, assim melhorando o perfil de potência entregue a rede, o que pode impactar positivamente na melhoria de margens de estabilidade do sistema e em índices de qualidade de energia. O presente trabalho tem como objetivo estudar uma estratégia específica, regular a potência utilizando um dispositivo FACTS em conjunto com sistema de armazenamento. O modelo de dispositivo FACTS escolhido é o STATCOM. Ao utilizar o STATCOM em conjunto com uma bateria de tecnologia Lithium-Ion formando assim um equipamento denominado STATCOM/ESS, é possível regular a potência de maneira satisfatória. Para avaliar a viabilidade técnica do projeto foram feitas simulações computacionais em um sistema equivalente, o sistema equivalente brasileiro de 7 barras sul-sudeste. O sistema teste foi implementado utilizando o *software Matlab/Simulink* adicionando ao sistema um parque eólico. Com as simulações foi possível obter resultados que confirmam a capacidade do equipamento STATCOM/ESS em controlar a potência de uma turbina eólica e melhorar o perfil de potência gerado.

Palavras-chave: Energia Elétrica. energia eólica. dispositivos FACTS. STATCOM. Baterias. Regulação de potência.

ABSTRACT

Nowadays, the world is dependent on electricity, its consumption increases exponentially and the pollution generated by non-renewable energy sources limits the potential of energy generation, so it is necessary to look for alternatives that do not harm the environment and produce energy needed to meet global demand. In particular, wind power is rising worldwide, although its technology is simple, its impact on electrical systems is complex and often negative in terms of power quality. As instantaneous wind variation negatively influences the power generation of wind turbines, it is important to study power regulation methods to smooth out the generated variations, thus improving the power profile delivered to the grid, which can positively impact the improvement of wind turbines system stability margins and power quality indices. The present work aims to study a specific strategy, to regulate the power using a FACTS device in conjunction with storage system. The chosen FACTS device model is STATCOM. By using STATCOM in conjunction with a Lithium-Ion technology battery thus forming equipment called STATCOM / ESS, it is possible to regulate the power satisfactorily. To evaluate the technical feasibility of the project were made computer simulations, the Brazilian 7-bar south-southeast equivalent system was implemented using *Matlab / Simulink* software adding a wind farm to the system. With the simulations it was possible to obtain results that confirm the STATCOM / ESS equipment's ability to control the power of a wind turbine and improve the generated power profile.

Keywords: Electric Energy. Eolic Energy. FACTS devices. STATCOM. Battery. power regulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA.....	15
FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO DE PARQUES EÓLICOS POR ESTADO.....	15
FIGURA 3 – GERAÇÃO EÓLICA BR E AFLUÊNCIA HÍDRICA SE.....	16
FIGURA 4 – POTÊNCIA ATIVA DO AEROGERADOR.....	18
FIGURA 5 – VARIAÇÃO INSTANTANEA DO VENTO.....	19
FIGURA 6 –COMPONENTES DE UM AEROGERADOR.....	22
FIGURA 7 – FLUXO DE AR QUE ATRAVESSA A REGIÃO CIRCULAR.....	23
FIGURA 8 – SEÇÃO DA PÁ DE UM AEROGERADOR.....	24
FIGURA 9 – FLUXO DE AR COM CONTROLE PITCH E STALL.....	26
FIGURA 10 – CONFIGURAÇÃO SHUNT DO STATCOM.....	29
FIGURA 11 – CONEXÃO DO STATCOM COM A REDE.....	30
FIGURA 12 – CONEXÃO DO STATCOM DEMONSTRANDO CORRENTES E TENSÕES.....	31
FIGURA 13 – RELAÇÃO EIXO D-Q E COORDENADAS ABC.....	32
FIGURA 14 – RELAÇÃO EIXO D-Q/ABC.....	32
FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DAS VARIÁVEIS INSTANTÂNEAS TRIFÁSICA.....	33
FIGURA 16 – COORDENADAS ORTOGONAIS EIXO D-Q.....	34
FIGURA 17 – COORDENADAS DO EIXO D-Q COINCIDENTE COM VETOR DE TENSÃO.....	35
FIGURA 18 – MALHA DE OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS.....	36
FIGURA 19 – MALHA DE CONTROLE VAC.....	37

FIGURA 20 – MALHA DE CONTROLE VDC.....	37
FIGURA 21 – MALHA DE CONTROLE DAS CORRENTES.....	38
FIGURA 22 – AFERIÇÃO DO VETOR DE ÍNDICES.....	39
FIGURA 23 – DIAGRAMA DE CONTROLE.....	39
FIGURA 24 – MALHA DE CONTROLE STATCOM/ESS.....	42
FIGURA 25 – SISTEMA 5 GERADORES 7 BARRAS.....	42
FIGURA 26 – PARQUE EÓLICO.....	43
FIGURA 27 – RELAÇÃO POTÊNCIA VELOCIDADE DA TURBINA EÓLICA.....	44
FIGURA 28 – STATCOM/ESS.....	45
FIGURA 29 – PERFIL DE TENSÃO E DESCARREMENTO DA BATERIA.....	46
FIGURA 30 – PERFIL DO VENTO INCIDENTE.....	47
FIGURA 31 – POTÊNCIA DE SAÍDA COM CONTROLE DE PASSO.....	48
FIGURA 32 – TENSÃO DA BARRA NO PONTO DE CONEXÃO.....	49
FIGURA 33 – COMPARAÇÃO DE POTÊNCIA.....	50
FIGURA 34 – TENSÃO NO PONTO DE CONEXÃO.....	51
FIGURA 35 – SOC (STATE OF CHARGE) DA BATERIA.....	52
FIGURA 36 – CORRENTES DIRETAS.....	52
FIGURA 37 – TENSÃO VDC DA BATERIA.....	53
FIGURA 38 – TENSÃO NO PONTO DE CONEXÃO.....	54
FIGURA 39 – TENSÃO VED NA BATERIA DURANTE PERTURBAÇÃO.....	54
FIGURA 40 – CORRENTES DIRETAS DURANTE PERTURBAÇÃO.....	55
FIGURA 41 – COMPARAÇÃO DE POTÊNCIAS DURANTE PERTURBAÇÃO.....	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 OBJETIVO GERAL	19
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 GERADORES EÓLICOS	21
2.2 MODELAGEM AERODINAMICA	23
2.3 CONTROLES MECÂNICOS	25
2.3.1 CONTROLE DE PASSO	26
2.3.2 CONTROLE ESTOL	27
3 DISPOSITIVOS FACTS	28
3.1 <i>STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR</i> (STATCOM)	28
3.1.1 TRANSFORMADA PARK	31
3.2 CONTROLE DO STATCOM	35
4 METODOLOGIA	40
4.1 STATCOM/ESS	40
4.2 CONTROLE DO STATCOM/ESS	41
4.3 SISTEMA TESTE	42
5 RESULTADOS E ANÁLISES	47

5.1 RESULTADOS OBTIDOS CONSIDERANDO O AEROGERADOR COM CONTROLE DE PASSO SEM STATCOM/ESS	48
5.2 RESULTADOS OBTIDOS CONSIDERANDO O AEROGERADOR COM CONTROLE DE PASSO E COM STATCOM/ESS.....	49
5.3 RESULTADOS GERADOS AO INSERIR UMA CARGA REATIVA NO SISTEMA ..	53
6 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS	59

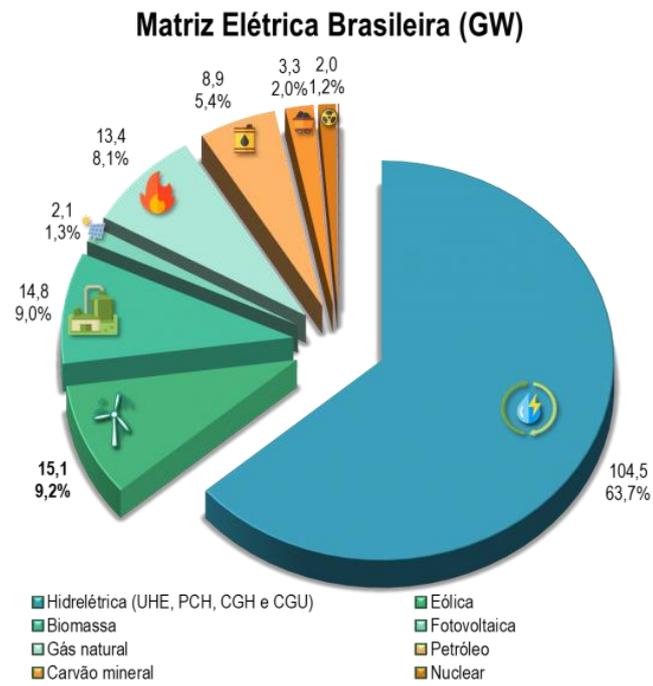
1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A disponibilidade de energia e seu uso são fatores fundamentais no desenvolvimento social e econômico de um país. O Brasil em sua história é um país na qual a produção de energia elétrica baseou-se em duas matrizes principais, as hidroelétricas e termoelétricas. No entanto, com o aumento da poluição nas últimas décadas, tem-se uma maior preocupação com o meio ambiente e o planeta em geral. Por isso, o setor energético é estratégico no desenvolvimento, buscando fontes alternativas para a geração de energia com menor impacto ambiental, porém sem limitar o crescimento socioeconômico. De acordo com a ABEEólica (Associação Brasileira de Energia Eólica) em 2017 foram instalados mais de 50GW de energia eólica no mundo. O crescimento mundial no setor é indiscutível e o Brasil segue na mesma estratégia. A região Nordeste do país, devido ao seu clima tropical semiárido, com temperaturas altas e escassez de chuva sempre foi malvista pelo setor agroindustrial, porém no quesito energia eólica a região é privilegiada. Os ventos têm velocidade superior a necessária sendo unidirecional e estável. De acordo com a ABEEólica, no dia 19 de agosto de 2018 o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) registrou recorde horário na geração eólica, com máxima diária de 8.247 MW às 9h28min, atendendo cerca de 98% de todo o Nordeste. A CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica) registrou uma movimentação no setor eólico de 331,9 milhões de reais em março de 2018 (PINTO, 2013; CENTRAIS et al., 2019).

Uma turbina eólica é um equipamento que capta parte da energia cinética dos ventos, transformando-a em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica, assim pode ser caracterizado como alternativa renovável na Matriz Elétrica Nacional. Como visto na FIGURA 1 a energia eólica já é a segunda fonte no quesito geração de energia, assim o Brasil diversifica sua matriz energética e ao mesmo tempo gera grande parte da energia de forma renovável (DUTRA, 2008).

FIGURA 1 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA



FONTE: ABEEólica (2019).

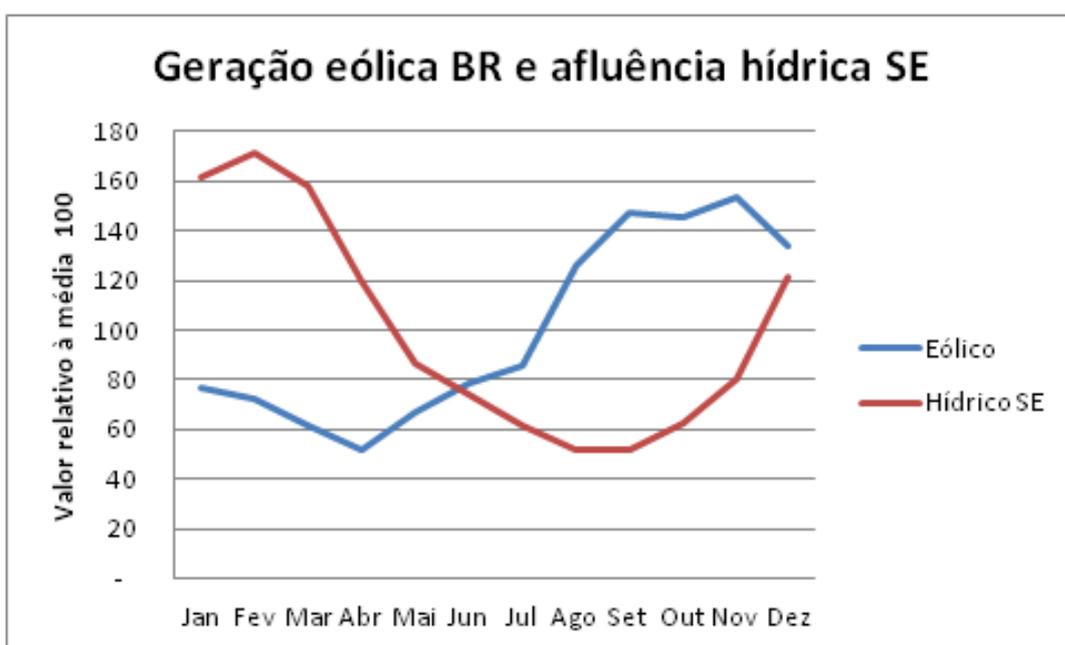
FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO DE PARQUES EÓLICOS POR ESTADO



FONTE: ABEEólica (2017).

É possível identificar que os estados da Bahia e Rio Grande do Norte tem as maiores quantidades de parques produzindo 2.291,84 MW e 3.585,55 MW, respectivamente, como mostrado na FIGURA 2. De acordo com Tendero (2013), a instalação de um empreendimento eólico em uma determinada região gera impactos ambientais e econômicos nas microrregiões onde são implantados. Assim, apesar de todos os benefícios da instalação e utilização de parques eólicos, ainda existem riscos atrelados ao seu uso como ruído gerado, uso do solo, erosão, interferência na fauna, desmatamento, efeito paisagístico e interferência eletromagnética.

FIGURA 3 – GERAÇÃO EÓLICA BR E AFLUÊNCIA HÍDRICA SE



FONTE: ECEN (2013).

A sazonalidade entre usinas eólicas e a vazão dos rios mostra que o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) deve controlar o fluxo de carga na região, ora operando com a energia eólica gerada, ora operando com outras fontes. O fato de o Brasil ter diversificação nos tipos de geração de energia demonstra como é importante estudar os melhores métodos de conexão dos aerogeradores na rede para aproveitar a máxima capacidade de extração de potência dos ventos no período de seca dos rios, como visto na FIGURA 3.

No passado a falta de conexão entre grandes sistemas de geração era um problema a ser solucionado, visto que, era necessário distribuir de maneira equivalente a energia gerada. Devido a diferença de parâmetros entre sistemas distintos e razões normativas, em várias partes do mundo a conexão era restrita. Porém com o avanço da tecnologia foi possível criar dispositivos que facilitam a conexão entre sistemas com frequências ou regimes diferentes, esses dispositivos são chamados de FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*)(MOORE; ASHMOLE, 1996).

Em 1988, N. G. Hingorani, pesquisador americano do EPRI (*Electrical Power Research Institute*), introduziu o conceito de FACTS, demonstrando como uma flexibilização do sistema estava associada a capacidade de controle ativo direto do fluxo de potência em nível de transmissão de energia. A flexibilização é feita com o uso do controle através de eletrônica de alta potência, usando conversores HVDC, compensadores estáticos reativos, controladores de fluxo de potência e conversores CC/CA viabilizando algo inédito, a ligação de sistemas de energia em corrente contínua e alternada em todos os níveis de potência. O uso dos dispositivos FACTS no sistema continua a abrir um enorme campo de aplicações, seja para o controle de novas fontes geradoras ou para melhorar a atual infraestrutura de transmissão instalada.(MOORE; ASHMOLE, 1996)

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

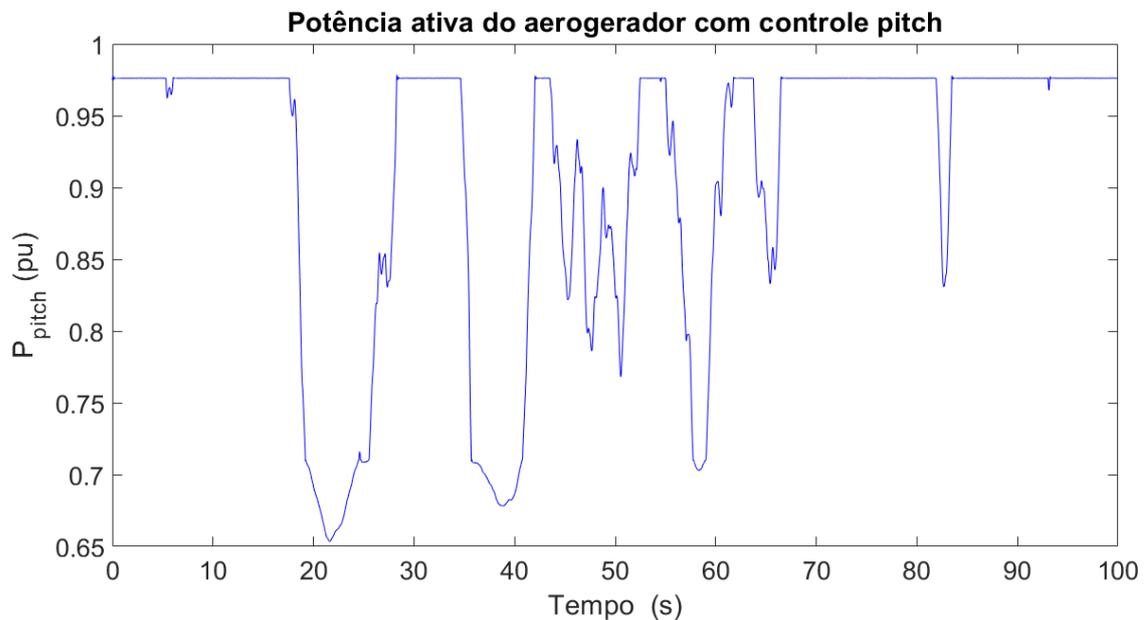
A velocidade instantânea dos ventos em turbinas eólicas não é constante como mostra a FIGURA 5, fazendo com que os valores de potência gerados flutuem como mostra a FIGURA 4. Mesmo com os controles mecânicos *pitch* e *stall* a variação ainda é relevante causando pequenas perturbações ao sistema elétrico e flutuação do valor de potência entregue. A flutuação de potência pode acarretar danos ao sincronismo de outros geradores e flutuação de tensão fazendo com que as proteções elétricas atuem de maneira indevida.

Com o aumento do número de parques eólicos conectados à rede elétrica de transmissão é necessário otimizar os métodos de conexão ou encontrar alternativas para suavizar os problemas gerados ao inserir fontes intermitentes em sistemas já estruturados. Além disso é importante entender que a dependência de geradores eólicos aumenta de maneira direta

em relação ao percentual total da fonte na matriz elétrica. Portanto quanto maior a confiabilidade em gerar a energia prevista, menores as chances de uso de termelétricas para compensar pela energia não gerada. Assim o consumidor final não é prejudicado por alterações na bandeira no consumo devido a efeitos sazonal como seca nos reservatórios de hidrelétricas ou período com poucos ventos nos parques eólicos (CORREA & DAVID, 2019).

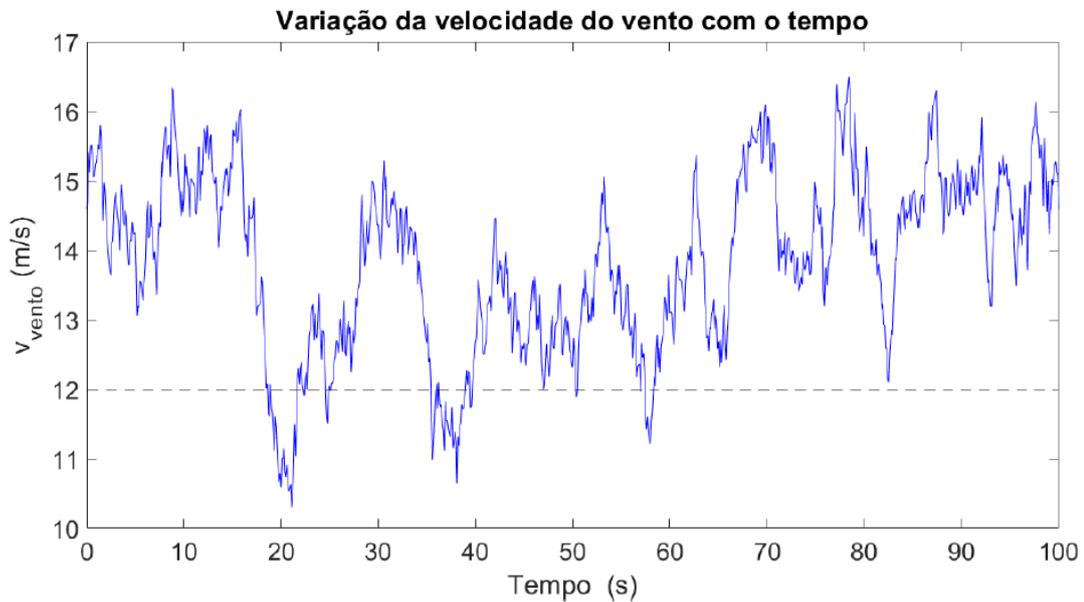
Assim surge a necessidade de regular a potência de saída dos aerogeradores com mais precisão utilizando um conjunto *Static Synchronus Compensator* (STATCOM) com armazenamento de energia.

FIGURA 4 – POTÊNCIA ATIVA DO AEROGERADOR



FONTE: (CORREA & DAVID, 2019).

FIGURA 5 – VARIAÇÃO INSTANTANEA DO VENTO



FONTE: (CORREA & DAVID, 2019).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver um estudo de controle da potência de saída de geradores eólicos usando um dispositivo FACTS (no caso, o STATCOM) mais armazenamento de energia.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho em questão são descritos abaixo:

1. Elaborar uma malha de controle para o STATCOM/ESS que permita a regulação de potência de saída do parque eólico.

2. Elaborar um sistema teste com a introdução de um modelo de parque eólico regulando a potência ativa do parque eólico via equipamento STATCOM/ESS.
3. Obter a resposta do sistema a perturbações e comparar os resultados com e sem os dispositivos estudados.
4. Analisar a viabilidade técnica da introdução do STATCOM com armazenamento para regular potência ativa em geradores eólicos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho presente é composto por 6 capítulos. O primeiro é uma introdução ao tema abordado no trabalho.

O segundo capítulo revisa de maneira bibliográfica os aerogeradores e seu funcionamento.

O terceiro capítulo discute sobre os dispositivos FACTS e suas malhas de controle.

O quarto capítulo apresenta a metodologia aplicada no projeto em questão.

O quinto capítulo dispõem dos resultados e análises obtidas a partir das simulações feitas no *Matlab/Simulink*.

O sexto capítulo agrega as conclusões tiradas a partir das simulações e estudos feitos durante todo o presente trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentado uma breve revisão dos conceitos de aerogeradores. Primeiramente será descrito de maneira simples as turbinas eólicas, seus dispositivos e funcionamento. Em seguida será feita uma modelagem aerodinâmica relacionando a velocidade dos ventos e a potência mecânica da turbina. Ao final do capítulo será introduzido os conceitos dos controles mecânicos utilizados em aerogeradores.

2.1 GERADORES EÓLICOS

O vento pode ser caracterizado como o ar em movimento, esse movimento é provocado pelo aquecimento desigual da superfície da terra pelo Sol, gerando deslocamento das camadas de ar por zonas de pressão e formando um gradiente de pressão em direção a linha do equador em ambos os hemisférios. O vento resultante do deslocamento das massas de ar é diretamente influenciado pelo gradiente de pressão e pela superfície terrestre, logo quanto mais perto da superfície, maior a turbulência mecânica, que afeta a velocidade dos ventos. Por esse motivo os parques eólicos devem ser posicionados em regiões de planície, com vento estável e unidirecional (PINTO, 2013).

As turbinas eólicas aproveitam do deslocamento das massas de ar para produzir energia. Nesse processo a energia contida nos ventos é transformada de energia cinética de translação para energia cinética de rotação pelas pás acopladas ao rotor da turbina. A energia cinética de rotação movimentada o rotor da turbina eólica. O eixo do rotor na turbina eólica está acoplado a um gerador elétrico, que converte a energia cinética rotacional em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica. Todo esse sistema segue o princípio da conservação de energia, porém existem perdas no sistema (REGUEIRO et al., 2006).

A FIGURA 6 exibe de maneira simplificada a composição de um aerogerador. Os componentes do aerogerador serão explicados de maneira breve.

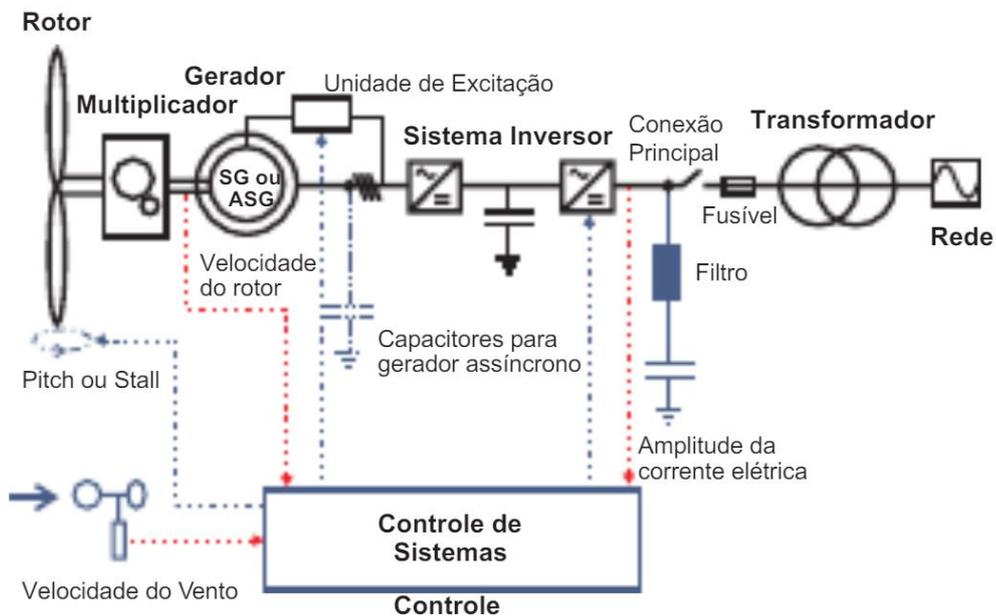
O rotor é responsável pela transformação da energia cinética dos ventos, também chamada de energia cinética de translação, em energia rotacional. A energia rotacional contida

no eixo do rotor tem sua velocidade de rotação adequada por um conjunto de engrenagens, esse conjunto é chamado de multiplicador. A energia rotacional agora operando na velocidade adequada é utilizada para movimentar o rotor do gerador (REGUEIRO et al., 2006) (DUTRA, 2008).

O gerador é uma máquina eletromecânica de conversão, a máquina converte a energia mecânica de rotação contida no rotor em energia elétrica. Em aerogeradores são utilizados ambos geradores síncronos e assíncronos. (FITZGERALD *et al.*, 2006). Após ser produzida a energia elétrica é manipulada e filtrada por conversores e filtros, respectivamente. Em seguida utilizando um transformador para elevar o nível de tensão é feita a conexão com a rede.

É importante destacar na FIGURA 6 os sistemas de controle presentes e seus sinais medidos como: velocidade do vento, velocidade do rotor, amplitude da corrente elétrica além dos dados obtidos nas pás. Alguns desses sinais serão utilizados para efetuar os controles mecânicos (*Pitch* ou *Stall*) que serão descritos na sequência.

FIGURA 6 – COMPONENTES DE UM AEROGERADOR



FONTE: DUTRA (2008).

2.2 MODELAGEM AERODINAMICA

A energia cinética de translação E , [kgm^2/s^2], descrita anteriormente pode ser calculada através da equação (1.1):

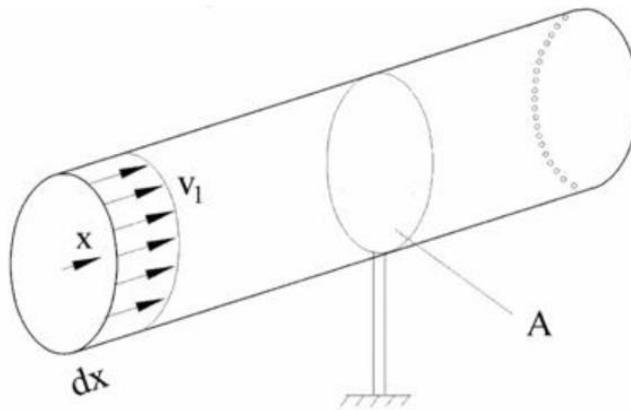
$$E = \frac{1}{2}m_{ar}v^2 \quad (1.1)$$

Onde m_{ar} é a massa do ar, [kg], e v a velocidade do vento em [m/s]. O fluxo de ar atravessa a região circular varrida pelas pás da turbina criando uma área A , [m^2], de raio R , [m], deslocando uma massa de ar por um determinado tempo, conforme a equação (1.2):

$$m_{ardest} = \rho_{ar}Av \quad (1.2)$$

Onde ρ_{ar} , [kg/m^3], é a densidade do ar, cujo valor a 1 atm e 25 °C é de 1,225 kg/m^3 . A FIGURA 7 exemplifica as equações (1.1) e (1.2) (DUTRA, 2008).

FIGURA 7 – FLUXO DE AR QUE ATRAVESSA A REGIÃO CIRCULAR



FONTE: cresesb.cepel.com.br (2008)

A partir das equações (1.1) e (1.2) obtém-se a equação (1.3):

$$P_v = \frac{1}{2}\rho_{ar}Av^3 \quad (1.3)$$

Onde P_v , [W], é a potência disponível na turbina. Apesar de todo o estudo aerodinâmico na produção das pás existe um limite na extração da energia dos ventos por aerogeradores. Para tal limite adiciona-se um fator denominado Coeficiente de Potência, C_p .

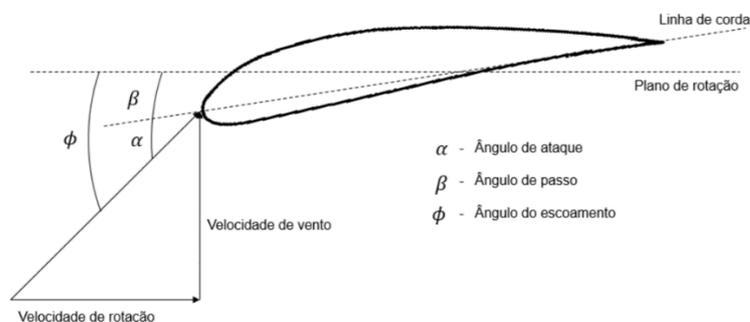
$$P_m = C_p P_v \quad (1.4)$$

Em 1920, o físico alemão Albert Betz determinou o limite do coeficiente de potência, usando um modelo em laboratório baseado na teoria da quantidade de movimento axial. Betz provou que o aproveitamento máximo num escoamento eólico é de 59%. Atualmente as turbinas eólicas possuem um coeficiente de potência na faixa de 52% a 55%, porém quando se leva em consideração as perdas elétricas e mecânicas no gerador e caixa de transmissão, o coeficiente de potência varia entre 46% a 48%. Logo as equações (1.4) e (1.5) mostram a potência mecânica na turbina eólica (PICOLO; BÜHLER; RAMPINELLI, 2014)(THONGAM et al., 2011).

$$P_m = \frac{1}{2} \rho_{ar} C_p A v^3 \quad (1.5)$$

A FIGURA 8 exibe uma turbina eólica, onde é possível visualizar alguns parâmetros importantes como: ângulo β de passo, ângulo α de ataque, ângulo ϕ de incidência ou escoamento, velocidade relativa do vento ou velocidade do vento v_{rel}^1 em [m/s] e velocidade da ponta das pás ou velocidade de rotação v_{pp} em [m/s].

FIGURA – 8 SEÇÃO DA PÁ DE UM AEROGERADOR



FONTE: B. PEGORARO, (2018).

A equação (2.1) representa a velocidade do vento com incidência perpendicular a rotação da pá; a equação (2.2) representa a velocidade do vento que incide na turbina paralela a rotação da pá.

$$v_{rel} = v_{pp} + v \quad (2.1)$$

$$v_{pp} = -\omega_t R \quad (2.2)$$

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v} \quad (2.3)$$

Organizando as equações (2.1) -(2.3) tem-se a equação (2.4) que descreve o ângulo de incidência.

$$\varphi = \arctg\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \arctg\left(\frac{v}{\omega_t R}\right) \quad (2.4)$$

Visto que a potência mecânica depende do ângulo de passo e velocidade do vento, o coeficiente de potência também depende das mesmas grandezas, assim pode-se expressar a potência mecânica da turbina como descrito na equação (2.5). Ainda na equação (2.5) é possível relacionar a potência de saída do aerogerador com o cubo da velocidade do vento, inferindo que pequenas variações do vento incidente nas pás são transferidas para a potência elétrica do gerador. Essas perturbações serão mais aprofundadas nos próximos capítulos (TAHANI et al., 2011).

$$P_m = \frac{1}{2} \rho_{ar} C_p(\lambda, \beta) A v^3 \quad (2.5)$$

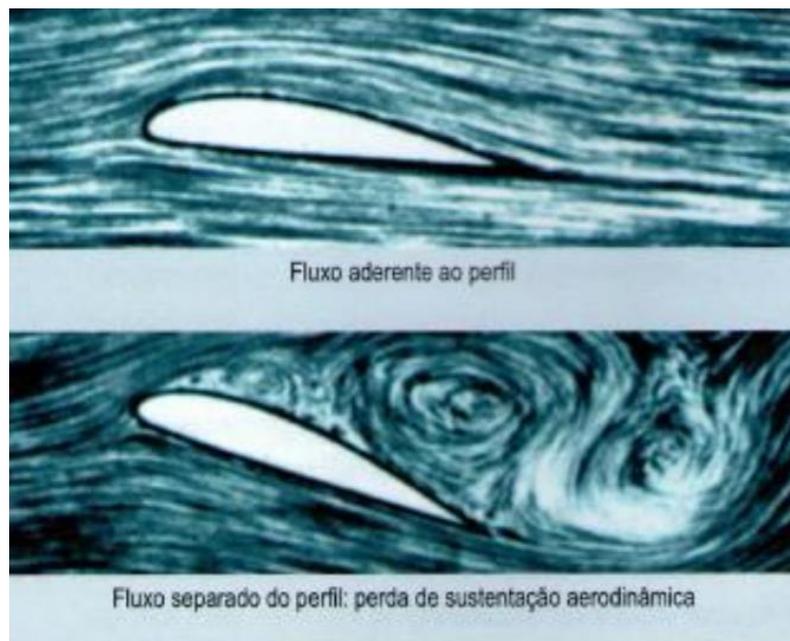
2.3 CONTROLES MECÂNICOS

Os sistemas de controle mecânicos de aerogeradores tem como objetivo limitar a potência ou torque mecânico da turbina, o objetivo é reduzir os danos estruturais a unidade eólica enquanto se faz um balanço entre potência elétrica e mecânica.

2.3.1 CONTROLE DE PASSO

O controle de passo ou controle *pitch* é um tipo de controle ativo, no qual necessita-se de uma realimentação do sistema informando certos parâmetros. Nesse mecanismo de controle sempre que a potência nominal do aerogerador é ultrapassada as pás do rotor giram em seu eixo, ou seja, mudam o ângulo de passo, assim reduzindo o ângulo de ataque. A redução do ângulo de ataque resulta na diminuição das forças aerodinâmicas do vento, por consequência, reduzindo a potência extraída do vento. Sempre que a velocidade do vento for superior à normal, o ângulo é reduzido. Assim o aerogerador não extrapola os limites mecânicos de suas estruturas (TAHANI et al., 2011).

FIGURA 9 – FLUXO DE AR COM CONTROLE PITCH E STALL



FONTE: DUTRA, (2008).

Na FIGURA 9 é possível ver que a adaptação do ângulo de ataque faz com que o escoamento seja bem aderente a superfície, produzindo sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto em comparação com um fluxo não aderente as pás, que geram perda de sustentação e turbulências.

2.3.2 CONTROLE ESTOL

O controle estol diferentemente do controle de passo, é um tipo de controle passivo, em que as pás do rotor têm ângulo de passo fixo, conseqüentemente, não giram em torno do eixo longitudinal. O ângulo de passo é parametrizado para velocidades de vento superior à normal, o escoamento nas pás é deslocado, reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto. Com menor sustentação e maior arrasto a potência do rotor é limitada. Na FIGURA 9 é possível ver como o fluxo de ar nas pás é variado dependendo do tipo de controle mecânico utilizado, para evitar que o efeito do controle estol ocorra em condições normais de vento, as pás possuem um dispositivo de torção longitudinal que suavizam os efeitos estol.

As turbinas eólicas com controle estol tem maior simplicidade, visto que, não necessitam de um sistema com mudança de passo. Na aplicação de aerogeradores, as turbinas com controle do tipo estol dominam o mercado, principalmente com a tecnologia de gerador de indução diretamente acoplado a rede. Nos últimos anos um novo tipo de controle foi desenvolvido, nomeado de controle estol ativo. No controle estol ativo as pás do rotor giram na direção do estol e não na direção de menor sustentação como no controle de passo comum, assim são necessárias pequenas mudanças no ângulo de passo, possibilitando um controle de carga sob baixa potência e uso da posição de embandeiramento das pás do rotor para situações de vento extremo (TAHANI et al., 2011).

3 DISPOSITIVOS FACTS

Em 1988, N. G. Hingorani, lançou as tecnologias FACTS no setor elétrico buscando uma maior flexibilidade de operação do sistema. Com uma capacidade de controle direto do fluxo de potência. Os dispositivos FACTS revolucionaram o sistema elétrico de transmissão. O primeiro uso foi o de controladores de fluxo de potência, esses equipamentos permitiam controlar a reatância equivalente da linha de transmissão por meio de uma compensação capacitiva série, sendo que o compensador poderia ser instalado em qualquer extremo da linha. Assim o controle da reatância poderia ser entendido como a possibilidade de modificar distâncias elétricas da rede. Outros equipamentos FACTS então ganharam relevância como: compensadores estáticos reativos, conversores HVDC, filtros ativos, conversores de frequência e sistemas de acionamento CA/CC viabilizando a conexão de corrente alternada e corrente contínua em todos os níveis de tensão (HINGORANI, 2007)(BISEN; SHRIVASTAVA, 2013).

Dada a natureza dos equipamentos FACTS, qualquer problema de resposta dinâmica rápida, habilidade de variar a frequência de saída, regulação de potência e saídas ajustáveis, podem ser solucionados utilizando um equipamento no ponto de conexão com a rede. Atualmente os equipamentos FACTS não são baseados em tiristores comuns, mas em chaves eletrônicas mais aperfeiçoadas como: GTO, MCT e IGBT, que são chaves eletrônicas mais rápidas e confiáveis quando comparadas a tiristores comuns (GEORGILAKIS; VERNADOS, 2011).

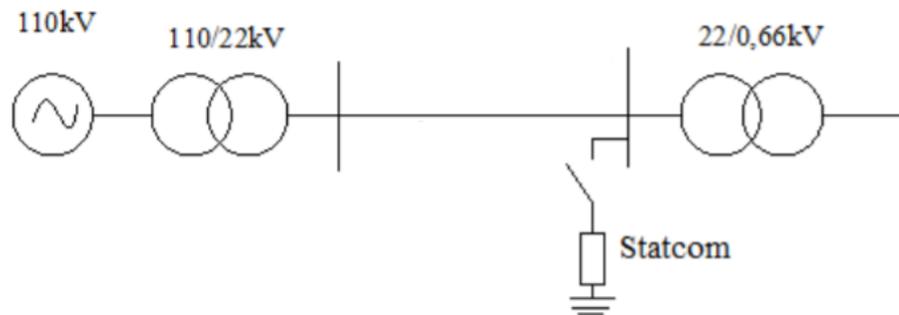
3.1 *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR* (STATCOM)

O STATCOM (sigla para o termo em inglês, *Static synchronous compensator*) foi escolhido devido a sua habilidade em melhoria rápida da estabilidade transitória através do controle rápido da tensão terminal. Em particular, o STATCOM pode ser usado para aumentar a capacidade de transferência de potência em redes de transmissão, principalmente durante falhas diminuindo a aceleração dos geradores. Outro fator importante a ser discutido é o fato de que caso ocorra uma falha na geração local, por não ter inércia mecânica o STATCOM não

contribui para o curto-circuito. No entanto o sistema possui um pequeno atraso na sua operação (CHAKRABORTY et al., 2012).

O STATCOM é um equipamento FACTS composto por inversores, transformadores, capacitores e sistema de controle. O dispositivo é projetado para controlar potência reativa capacitiva e indutiva, sua conexão é feita em *shunt* como mostra a FIGURA 10.

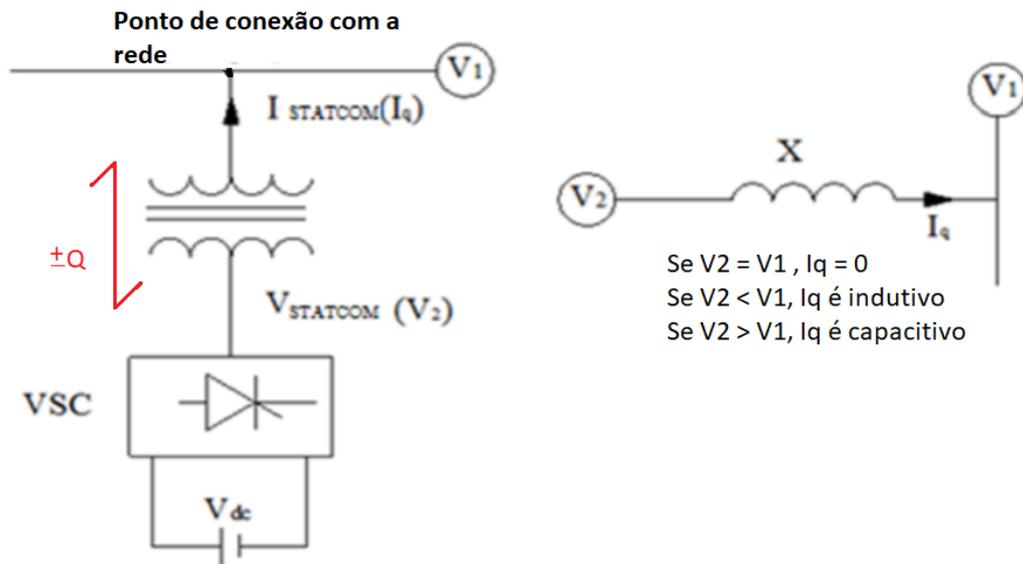
FIGURA 10 – CONFIGURAÇÃO SHUNT DO STATCOM



FONTE: (DO; LE, 2016), adaptada.

A compensação de energia reativa é feita através da entrada e saída do banco de capacitores. A estratégia é produzir uma impedância reativa em *shunt* variável que pode ser ajustada de acordo com os parâmetros definidos. A possibilidade de gerar potência reativa diretamente sem o uso de um sistema de corrente alternada, apenas variando o estado de conversores de potência foi descoberta por Gyugyi em 1976 (HINGORANI, 2000).

FIGURA 11 – CONEXÃO DO STATCOM COM A REDE



FONTE: (DO; LE, 2016), adaptada.

O dispositivo sem a adição de um sistema de armazenamento de energia funciona em dois modos de operação: regulação de tensão e controlador de potência reativa. O STATCOM opera no princípio de que: A fonte de tensão inversora (VSC) muda a potência no lado primário do transformador de acoplamento para se adequar as necessidades da rede como é visto na FIGURA 11(DO; LE, 2016; HINGORANI, 2007; KAMBLE, 2017; MATHUR; VARMA, 2002).

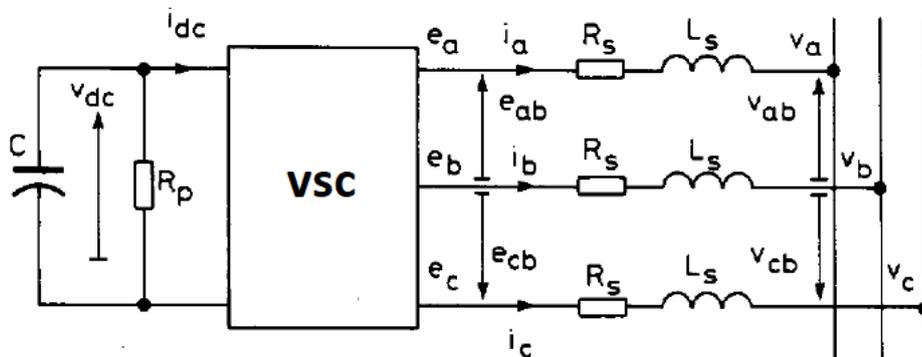
O STATCOM funciona no modo regulador de tensão quando existe variação na potência reativa que deseja ser controlada, ou seja, quando o equipamento deve funcionar injetando corrente capacitiva ou indutiva de acordo com os parâmetros de controle. Assim o dispositivo é capaz de compensar potência reativa indutiva ou capacitiva suavizando possíveis picos de tensão na rede. Quando os limites de operação do equipamento são atingidos, o funcionamento muda para apenas controlador de potência reativa. Nesse modo o STATCOM compensa o máximo de potência reativa indutiva ou o máximo de potência reativa capacitiva. O limite de operação do equipamento é dado pela capacidade de corrente dos elementos de inversão, ou seja, é limitado pela corrente máxima do IGBT ou GTO (DO; LE, 2016; HINGORANI, 2007; KIRMANI; KUMAR, 2018).

Para maior entendimento do controle do STATCOM, primeiramente é preciso analisar o seu comportamento no domínio do tempo, utilizando a transformada de Park. Após obtenção do modelo em espaço de estados é possível identificar o modelo analítico nas coordenadas d-q e montar um diagrama de blocos do sistema de controle.

3.1.1 TRANSFORMADA PARK

A transformada de Park é uma representação vetorial, onde abandona-se o sistema ortogonal convencional (abc ou rst) para um novo sistema onde as coordenadas são girantes no eixo e cada vetor é apresentado pelos componentes d, q e 0. O Eixo d-q-0 é girante na mesma frequência da rede. Ignora-se o eixo de sequência 0 pois assume-se que o equipamento esteja operando de forma trifásica equilibrada.

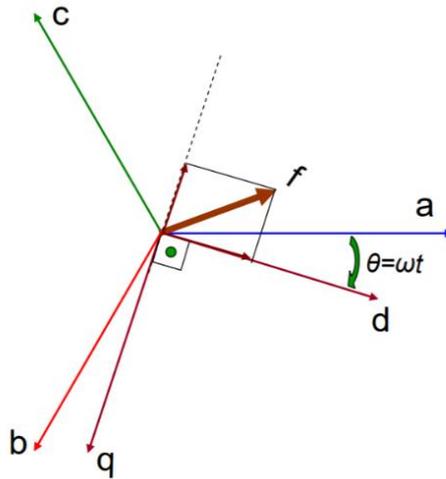
FIGURA 12 – CONEXÃO DO STATCOM DEMONSTRANDO CORRENTES E TENSÕES



FONTE: (SCHAUDER; MEHTA, 1993), adaptada.

Na FIGURA 12 é possível identificar as correntes e tensões do eixo abc que serão referenciadas pelo eixo d-q-0 (SCHAUDER; MEHTA, 1993; YANG et al., 2001).

FIGURA 13 – RELAÇÃO EIXO D-Q E COORDENADAS ABC

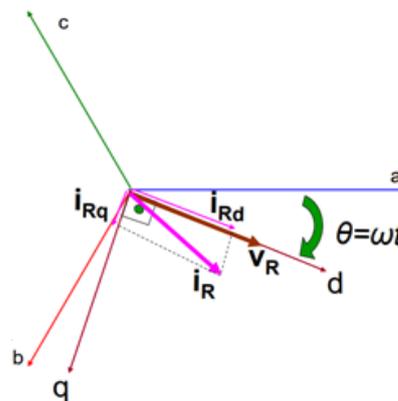


FONTE: D. PIMENTEL, (2006).

Na FIGURA 13, tem-se o contraste entre os eixos de referência abc e d-q-0, além de um vetor f que representa o vetor de eixo girante da referência abc.

Considerando a substituição do vetor f por vetores de tensão e corrente genéricos, V_r e I_r , e adicionando as correntes I_q e I_d da referência d-q-0 em fase com os vetores q e d respectivamente. Podemos decompor uma corrente I_r em fase com os vetores q e d como mostra a FIGURA 14 (SCHAUDER; MEHTA, 1993).

FIGURA 14 – RELAÇÃO EIXO D-Q/ABC



FONTE: D. PIMENTEL, (2006), adaptada.

Com as correntes Ird e Irq podemos relacionar o eixo em quadratura da transformada de Park com as coordenadas abc como mostram as equações (3.1) e (3.2):

$$[c] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}; [c]^{-1} = \frac{3}{2} [c] \quad (3.1)$$

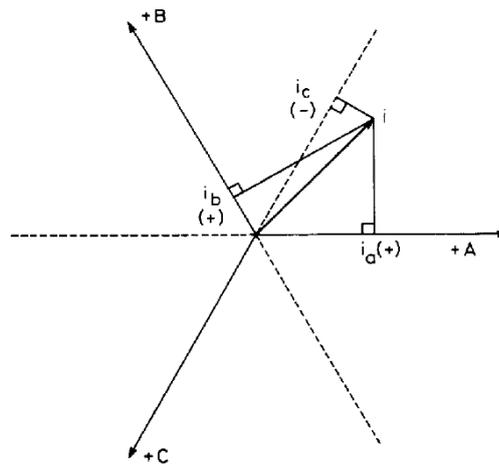
$$\begin{bmatrix} Ird \\ Irq \\ 0 \end{bmatrix} = [c] \begin{bmatrix} Ia \\ Ib \\ Ic \end{bmatrix} \text{ e } \begin{bmatrix} Vrd \\ Vrq \\ 0 \end{bmatrix} = [c] \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A potência real instantânea no ponto de conexão é dada pela equação (3.3).

$$P = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (3.3)$$

Podemos também definir através de uma análise vetorial a corrente reativa instantânea conceitualmente como parte de uma corrente trifásica que pode ser eliminada a qualquer instante sem alterar a potência P . Assim, teremos grandezas de controle de potência ativa e reativa independentes facilitando os mecanismos de controle como mostram as FIGURAS 15-17 e equações (3.4)-(3.5.1) (SCHAUDER; MEHTA, 1993).

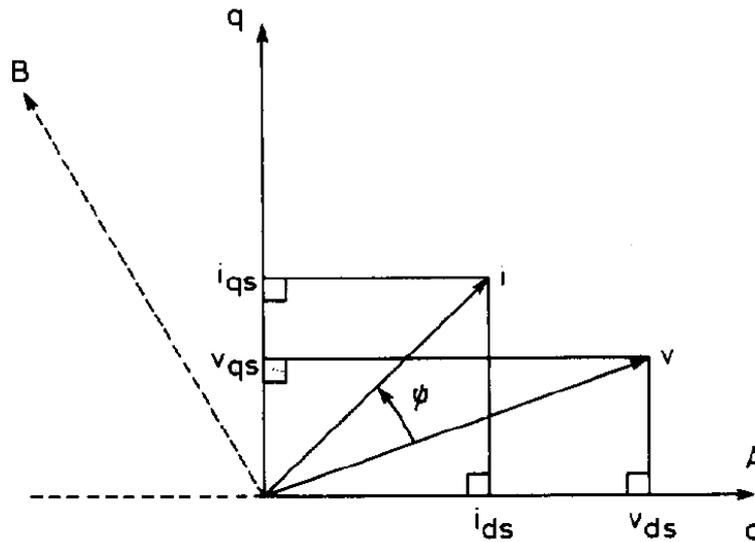
FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO VETORIAL DAS VARIÁVEIS INSTANTÂNEAS TRIFÁSICA



FONTE: (SCHAUDER; MEHTA, 1993), adaptada.

Na FIGURA 15, tem-se as três correntes da referência abc sendo somadas vetorialmente para representar um vetor de corrente em um único ponto do plano. Usando as equações (3.1) e (3.3) e reescrevendo os termos em função de d-q tem-se as equações (3.4) -(3.5). Onde φ é o ângulo entre os fasores de tensão e corrente (SCHAUDER; MEHTA, 1993).

FIGURA 16 – COORDENADAS ORTOGONAIS EIXO D-Q



FONTE: (SCHAUDER; MEHTA, 1993), adapcta.

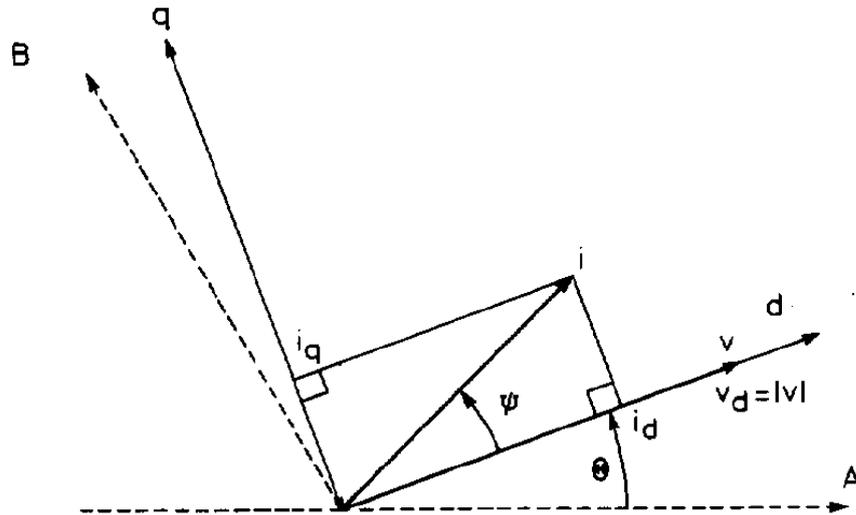
$$P = \frac{3}{2} (Vrd Ird + Vrqi Iiq) = \frac{3}{2} |V||I| \cos(\varphi) \quad (3.4)$$

$$Q = \frac{3}{2} |V||I| \sin(\varphi) = \frac{3}{2} (Vrd Iiq - Vrqi Ird) \quad (3.5)$$

A FIGURA 17 mostra um novo sistema de coordenadas onde o eixo d é sempre coincidente com o vetor de tensão instantânea e o eixo q está em quadratura com o mesmo. Pela soma vetorial da componente de tensão V , é possível interpretar que a componente Vq é de valor igual a 0, assim a componente de corrente do eixo d é referente a potência ativa instantânea e a corrente do eixo q é referente a potência reativa instantânea como mostram as equações (3.4.1 e 3.5.1), lembrando que o plano é girante, ou seja, os eixos d-q seguem a trajetória do

vetor de tensão e permanecem síncronos pela referência de frequência.(SCHAUDER; MEHTA, 1993)

FIGURA 17 – CORDENADAS DO EIXO D-Q COINCIDENTE COM VETOR DE TENSÃO



FONTE: (SCHAUDER; MEHTA, 1993), adaptada.

$$P = \frac{3}{2} (V_{rd} I_{rd}) \quad (3.4.1)$$

$$Q = \frac{3}{2} (V_{rd} I_{rq}) \quad (3.5.1)$$

3.2 CONTROLE DO STATCOM

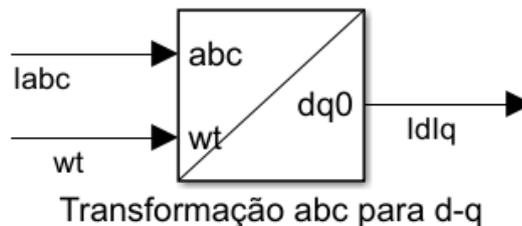
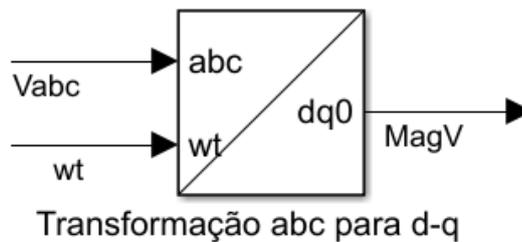
Após definidas as grandezas que controlam a potência ativa e reativa na aplicação de um STATCOM, é necessário entender como o controle dessas grandezas é feito. Primeiramente o STATCOM é um dispositivo normalmente conectado na configuração “shunt” e não tem um sistema de armazenamento de energia para produzir potência ativa. No dispositivo estudado o banco de capacitores é utilizado para manter uma tensão constante no conversor de tensão operante. Comumente a topologia do STATCOM varia entre 6-pulsos até 48-pulsos em que se

aplicam até 8 conversores de 6-pulsos operados pelo banco de capacitores previamente citado. As malhas de controle do STATCOM sem adição do conjunto ESS seguem os seguintes passos:

a) Primeiramente são obtidos os vetores de tensão e corrente no ponto de conexão do dispositivo na rede elétrica a partir dos transformadores de acoplamento como mostra a FIGURA 18 (V_{abc} , I_{abc}). Em seguida utilizando a transformada de Park, referencia-se os vetores no eixo d-q obtendo as variáveis V_{rd} , V_{rq} e I_{rd} e I_{rq} . Fazendo a manipulação matemática descrita na equação (4.1) é possível obter a magnitude de tensão (HINGORANI, 2000).

$$Mag V = \sqrt{V_{rd}^2 + V_{rq}^2} \quad (4.1)$$

FIGURA 18 – MALHA DE OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS

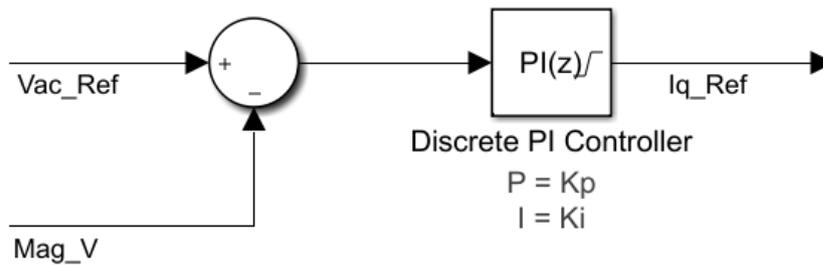


FONTE: Autor (2019).

b) Em sequência tem-se duas malhas de controle, a primeira chamada de regulação de tensão AC. Nessa malha utilizando o valor de magnitude obtido no item a) em conjunto com um controlador PI (Proporcional Integral) é possível aferir o valor da corrente em quadratura controlada ($I_{rq_{comand}}$ ou $I_{rq_{ref}}$) como visto na FIGURA 19.

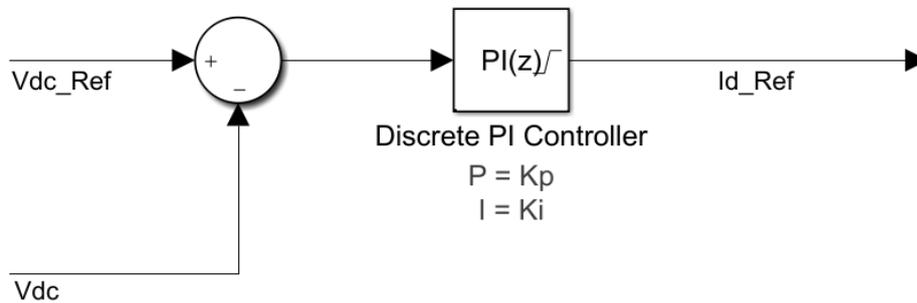
A segunda malha de controle chama-se controle de tensão DC. Essa malha é responsável por manter a tensão no elemento capacitivo (como mostra a FIGURA 12) constante. Na malha faz-se uma subtração dos valores de tensão Vdc_{ref} ou Vdc_{comand} por Vdc ou Vdc_{medido} em conjunto com um controlador PI. Assim é possível aferir o valor da corrente direta comandada (Ird_{comand} ou Ird_{ref}) como visto na FIGURA 20 (HINGORANI, 2000).

FIGURA 19 – MALHA DE CONTROLE VAC



FONTE: Autor (2019).

FIGURA 20 – MALHA DE CONTROLE VDC



FONTE: Autor (2019).

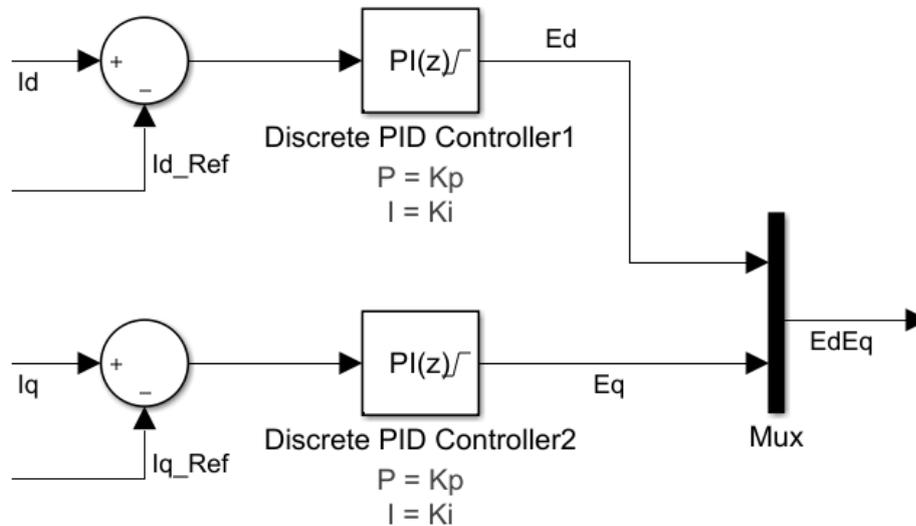
c) Com os valores das correntes controladas direta e quadratura e correntes medidas direta e quadratura calcula-se o erro de Id e Iq, ou seja, a diferença entre valores medidos e valores referência (desejados) descrita nas equações (4.2) e (4.3). Em sequência aplica-se um controlador PI para que o valor das correntes controladas seja sempre o mais próximo das correntes medidas. Usando um multiplexador (MUX) transforma-se os valores de erro em um

vetor de erro. A malha de controle das correntes pode ser mais bem interpretada com o auxílio da FIGURA 21.

$$erro_{Id} = Id - Id_{ref} \quad (4.2)$$

$$erro_{Iq} = Iq - Iq_{ref} \quad (4.3)$$

FIGURA 21 – MALHA DE CONTROLE DAS CORRENTES



FONTE: Autor (2019)

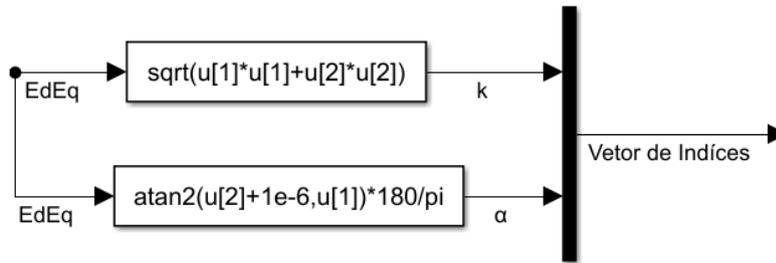
d) Com o vetor de erros, novamente faz-se uma manipulação matemática, nesse caso, a partir do vetor de erros obtém-se o vetor de índices de controle dos elementos IGBT que estão localizados na fonte inversora VSC.

No vetor de índices, a amplitude da onda de tensão que será gerada na fonte inversora é representada por um fator k , enquanto a defasagem angular entre as ondas de tensão gerada pela fonte VSC e a onda medida no ponto de conexão é representado por um fator α como mostra a FIGURA 22. Após várias adequações matemáticas ainda se faz necessário adequar o vetor de índices para um modelo de pulso com amplitude variável (PWM) e introduzir o índice PWM no terminal *gate* (porta) dos elementos IGBT. Como o foco do presente trabalho é a aplicação de um STATCOM e não o funcionamento eletrônico dele, não será abordado a problemática de eletrônica de potência.

$$k = \sqrt{Ed^2 + Eq^2} \quad (4.4)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{Eq}{Ed} \right) * \frac{180}{\pi} \quad (4.5)$$

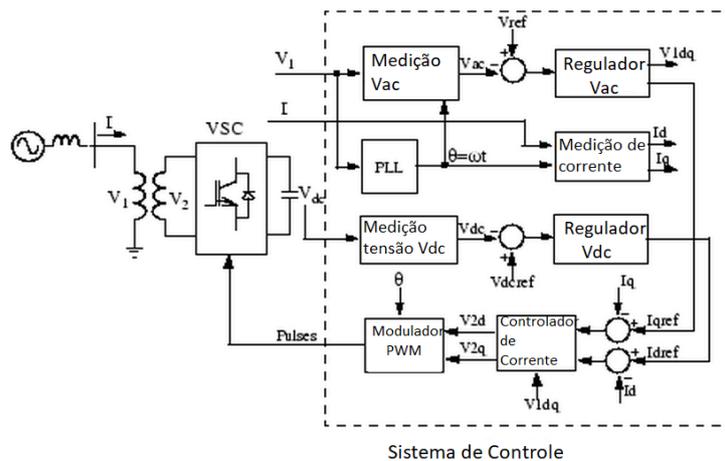
FIGURA 22 – AFERIÇÃO DO VETOR DE ÍNDICES



FONTE: Autor (2019).

e) Todas as malhas de controle explicadas nos itens anteriores funcionam em conjunto. O conjunto pode ser mais bem visualizado pelo diagrama da FIGURA 23 (CHAKRABORTY et al., 2012; DO; LE, 2016; HINGORANI, 2007; MULJADI et al., 2006; SWIERCZYNSKI et al., 2010).

FIGURA 23 – DIAGRAMA DE CONTROLE



FONTE: (HINGORANI, 2000), adaptada.

4 METODOLOGIA

O presente trabalho foi subdividido em duas partes: estudo dos dispositivos e suas malhas de controle e simulações computacionais para verificação da teoria na prática. A princípio foi feita uma revisão bibliográfica sobre aerogeradores e dispositivos FACTS, em sequência foi realizado um estudo de implementação de um STATCOM com sistema de armazenamento de energia (STATCOM/ESS). Este capítulo apresenta o STATCOM/ESS e a proposta de malha de controle para regulação de potência ativa. Foram então feitas simulações computacionais utilizando modelos matemáticos para comprovar a diferença na regulação de potência ativa de uma turbina eólica com ou sem equipamento STATCOM em conjunto com sistema de armazenamento. Ainda neste capítulo, o sistema-teste utilizado é apresentado com devidas modificações para inserção de parque eólico e STATCOM/ESS. A metodologia utilizada para validação do STATCOM/ESS para regulação de potência foi baseada na análise das potências ativa na barra de saída do aerogerador e na barra de conexão com a rede e tensão terminal dela. Outro parâmetro medido foi a eficiência do equipamento STATCOM em relação a bateria acoplada a ele.

4.1 STATCOM/ESS

O STATCOM é configurado para controlar tensão pois pode injetar e absorver potências reativas rapidamente e tem a habilidade de manter uma tensão pré-definida com compensação de potência reativa. Essas propriedades geralmente melhoraram indicadores de estabilidade transitória e favorecem o amortecimento de oscilações eletromecânicas e, até mesmo, subsíncronas (CHAKRABORTY et al., 2012; YANG et al., 2001). Entretanto, ao combinar o STATCOM com um sistema de armazenamento (ESS/ *Energy Storage System*) é possível melhorar a performance dinâmica. O STATCOM sem armazenamento tem dois quadrantes de operação em regime permanente: indutivo (ou atrasado) e capacitivo (adiantado) e apesar das magnitudes de tensão e ângulo de fase serem controladas, não existe malha de controle para compensação da corrente direta I_d , visto que o equipamento não é fonte de potência ativa (YANG et al., 2001). Já na configuração STATCOM/ESS e adicionando a malha

para controle da corrente direta I_d o número de operações em regime permanente é estendido aos 4 quadrantes. Portanto o conjunto STATCOM/ESS opera injetando e absorvendo potência reativa e ativa (BARRADO; GRINÓ; VALDERRAMA-BLAVI, 2010; CHAKRABORTY et al., 2012; OBANDO-MONTAÑO et al., 2014; SHEIKH et al., 2012; SWIERCZYNSKI et al., 2010; YANG et al., 2001).

Dado a natureza do conjunto, o STATCOM/ESS não pode ser operado infinitamente em um dos quatro quadrantes de operação (visto que a bateria não pode absorver ou injetar corrente infinitamente), ou seja, o sistema opera em regime quase permanente, entretanto dependendo da energia emitida pelo ESS, o perfil de carregamento e descarregamento é tipicamente suficiente para manter o sistema operante a longo prazo (YANG et al., 2001).

4.2 CONTROLE DO STATCOM/ESS

Existem poucas diferenças na estratégia de controle do STATCOM convencional para o conjunto STATCOM/ESS, a mais significativa está na obtenção das correntes controladas direta e quadratura. Na configuração tradicional tem-se duas malhas, uma de controle de tensão AC e outra de controle de tensão DC, responsáveis pelas correntes controladas em quadratura e direta respectivamente. Já na configuração do dispositivo FACTS com armazenamento de energia a obtenção das correntes descritas segue os seguintes passos:

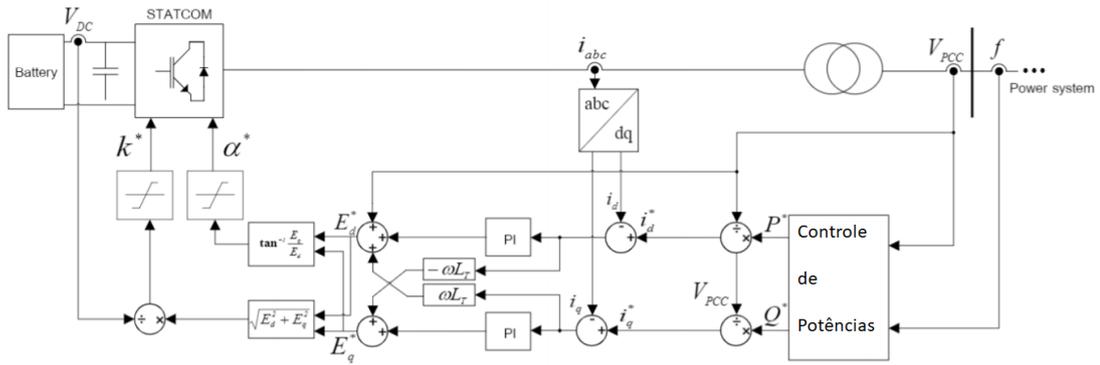
a') Primeiramente calcula-se o erro de potências, ou seja, a diferença entre o valor das potências ativa e reativa medidas pelo valor controlado delas obtendo um erro de potência. Esse erro é multiplicado por um ganho Kg como mostram as Equações (5.1) e (5.2). Ao dividir os erros de potência pela magnitude de tensão é possível captar o valor das correntes direta e quadratura comandadas.

A partir das correntes controladas o conjunto segue os mesmos passos já descritos na subseção 3.2 que podem ser mais bem visualizados na FIGURA 24.

$$erro_Q = (Q_{medido} - Q_{comand}) * Kg \quad (5.1)$$

$$erro_P = (P_{medido} - P_{comand}) * Kg \quad (5.2)$$

FIGURA 24 – MALHA DE CONTROLE STATCOM/ESS

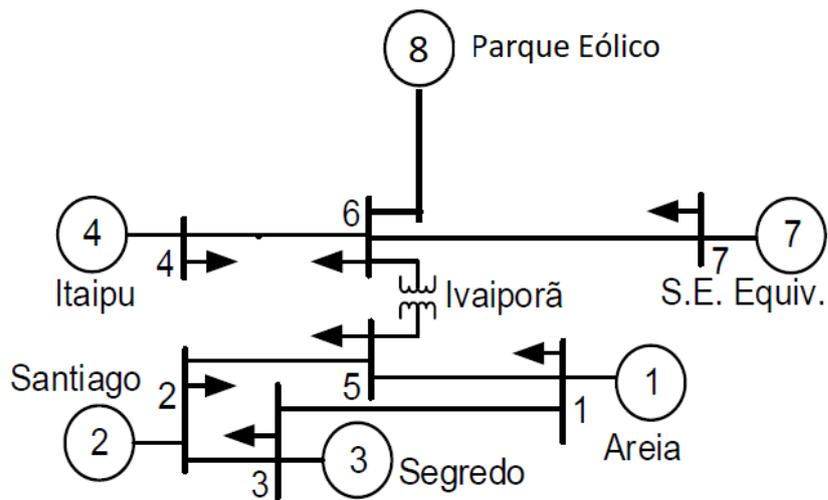


FONTE: (PARK et al., 2016).

4.3 SISTEMA TESTE

O sistema teste utilizado para validar a aplicação do STATCOM/ESS na regulação de potência ativa de parques eólicos é baseado no modelo equivalente brasileiro de 7 barras sul sudeste porém com a adição de um parque eólico na barra 6 (CANIZARES et al., 2017). Os geradores presentes no sistema foram implementados com dois sistemas de controle, estabilizadores de potência e sistemas de excitação.

FIGURA 25 – SISTEMA 5 GERADORES 7 BARRAS.

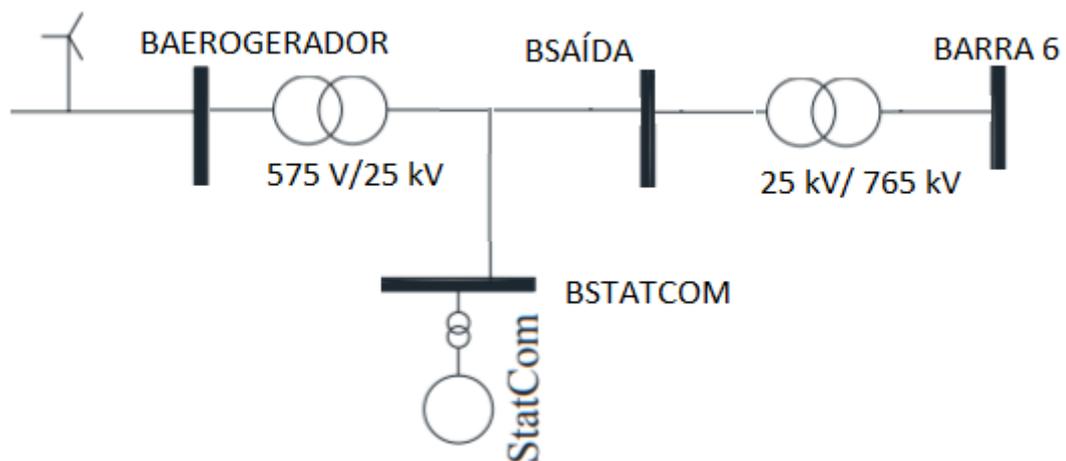


FONTE: (CANIZARES et al., 2017), adaptada.

O sistema teste utilizado no presente trabalho foi implementado no software *Matlab/Simulink* na biblioteca *SimpowerSystems*, visto que, a biblioteca *SimpowerSystems* possui modelos prontos de geradores eólicos, STATCOM e baterias, portanto não seria necessário criar modelos dos equipamentos, apenas adequá-los ao sistema e mudar suas malhas de controle.

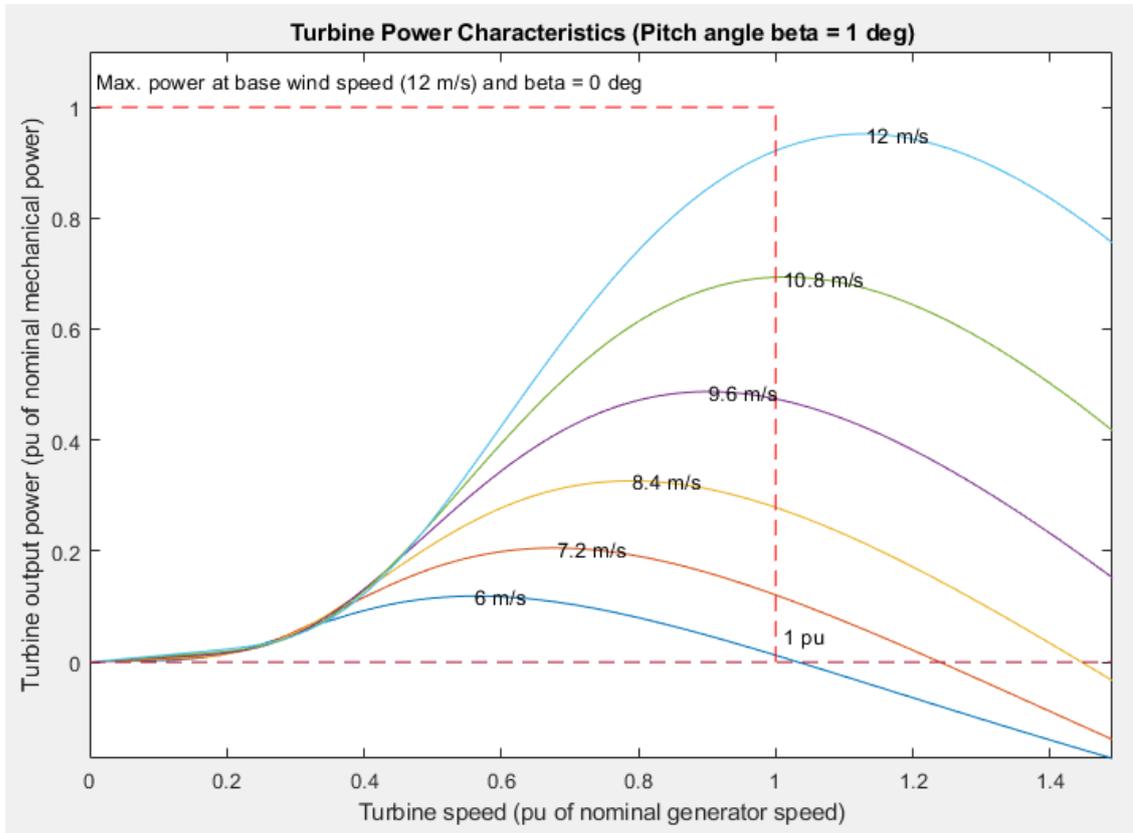
O parque eólico foi implementado utilizando dois transformadores elevadores. A tensão nominal da turbina eólica é de 575 V, o primeiro transformador elevador adequa o nível de tensão da turbina e do equipamento STATCOM (25 kV). O segundo transformador elevador adequa o nível de tensão gerada pelo parque ao nível do sistema na barra 6 (765 kV). Como mostra FIGURA 26 primeiro mede-se a potência ativa na barra “BAEROGERADOR”, em sequência a potência ativa na barra “BSTATCOM” e no final a potência na barra “BSAÍDA”. Assim é possível confrontar os valores medidos na geração, no STATCOM/ESS e no ponto de conexão da rede. Na parte interna do gerador eólico um controle de passo (*pitch*) foi implementado e suas características de potência produzida por velocidade de rotação em pu são mostradas na FIGURA 27.

FIGURA 26 – PARQUE EÓLICO



FONTE: Autor (2019).

FIGURA 27 – RELAÇÃO POTÊNCIA VELOCIDADE DA TURBINA EÓLICA



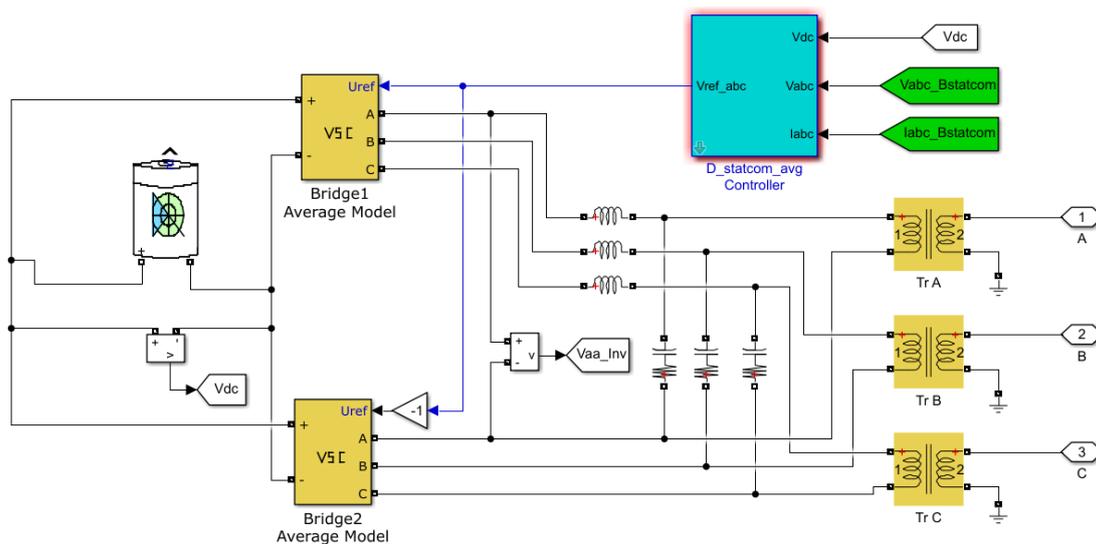
FONTE: Autor (2019).

O STATCOM utilizado é o modelo: D-STATCOM (*Average Model*) com adaptações que serão descritas. No sistema teste do trabalho presente, na parte interna do STATCOM, primeiramente desativou-se o a malha de controle de potência reativa, já que, o foco do trabalho consiste em regular potência ativa da turbina eólica e não potência reativa para suavizar picos de tensão. Em seguida implementou-se as malhas de controle descritas na subseção 4.2 para regular potência ativa e então conectou-se uma bateria de tecnologia Lithium-Ion nos terminais das fontes VSC onde se localizava o capacitor Vdc das FIGURAS (11, 12, 23 e 24).

Devido ao nível de tensão alto, é preciso utilizar duas fontes VSC para gerar a onda de tensão em 25 kV. Uma fonte recebe o sinal do vetor de índices normal e outra o sinal invertido, assim cada fonte gera uma onda inversa da primeira. Nos terminais dos transformadores de acoplamento, no terminal positivo entra a fonte com índice normal e no negativo a fonte com índice invertido. Assim gerando uma onda de tensão com amplitude dobrada mantendo os parâmetros definidos pelo vetor de índices. A FIGURA 28 ilustra de maneira esquemática a

configuração do STATCOM/ESS implementado no *Matlab/Simulink*. Na Tabela 1, tem-se os dados de potência nominal, tensão nominal e frequência da turbina eólica e do STATCOM, na Tabela 2 a tensão nominal da bateria e sua carga elétrica.

FIGURA 28 – STATCOM/ESS



FONTE: Autor (2019).

TABELA 1

	Potência Nominal (MW)	Tensão Nominal (V)	Frequência (Hz)
Turbina Eólica	6	575	60
STATCOM	1	25000	60

FONTE: Autor (2019).

TABELA 2

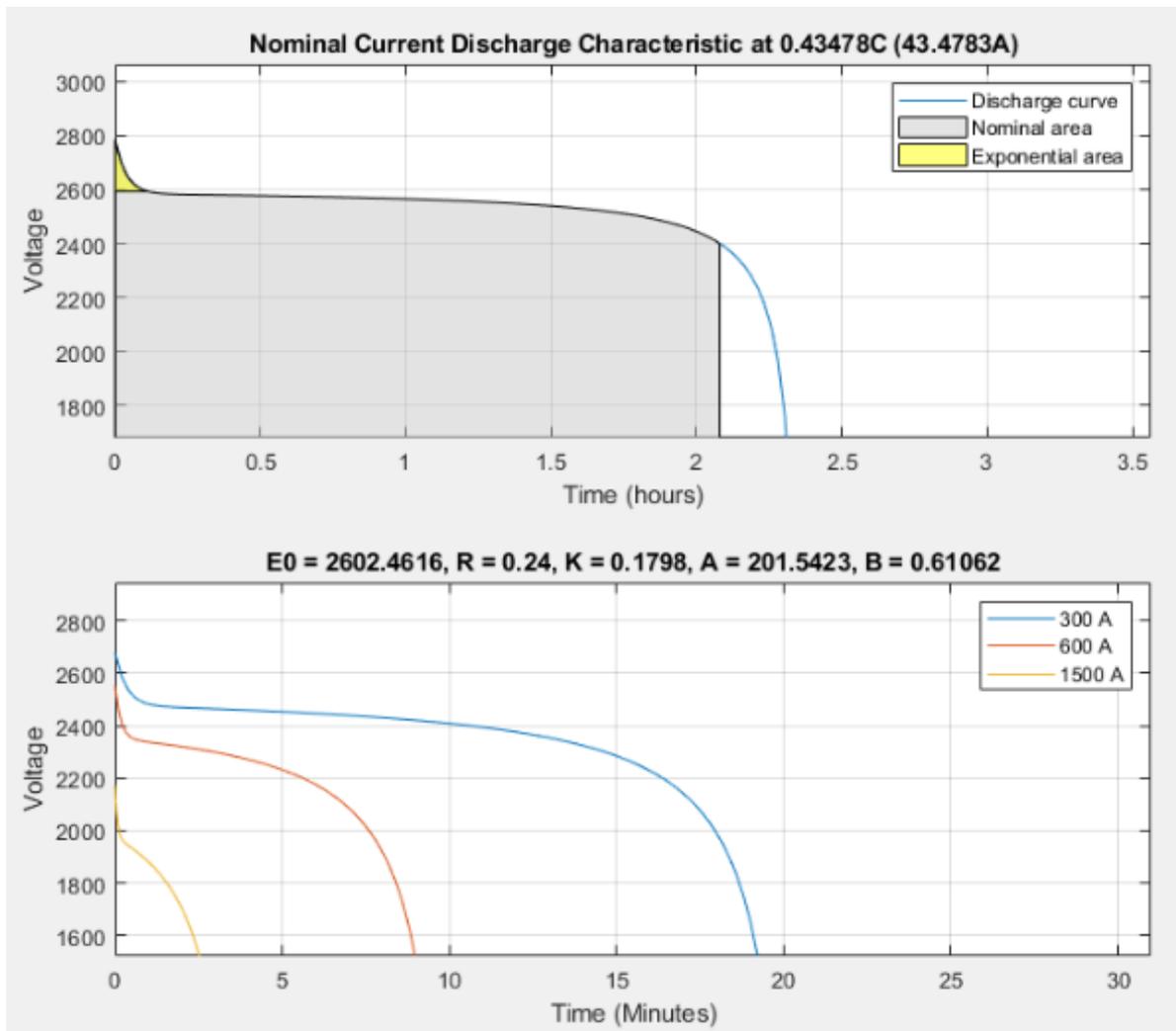
	TENSÃO NOMINAL (V)	QUANTIDADE DE CARGA (Ah)
BATERIA LITHIUM ION	2400	100

FONTE: Autor (2019).

A potência controlada ou referência do conjunto STATCOM/ESS foi de 5.8 MW, pois para verificar a operação de absorção de energia ativa, é preciso que a turbina eólica forneça mais potência que o valor de potência referência. Assim nos resultados que serão mostrados foi possível observar o conjunto injetando e absorvendo potência ativa regulando o perfil do parque eólico.

Como dito anteriormente, conectou-se uma bateria de tecnologia Lithium-Ion no equipamento STATCOM, formando o conjunto STATCOM/ESS. O perfil de tensão terminal e descarregamento da bateria serão mostrados na FIGURA 29.

FIGURA 29 – PERFIL DE TENSÃO E DESCARREGAMENTO DA BATERIA



FONTE: Autor (2019).

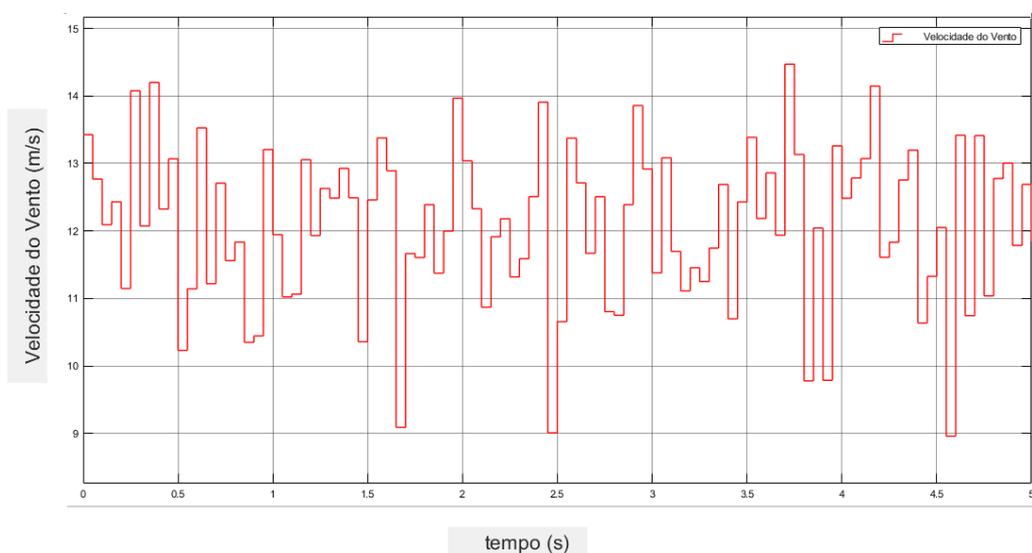
5 RESULTADOS E ANÁLISES

Todos os resultados que serão mostrados nesse capítulo foram obtidos com o mesmo vento incidente e tempo de amostragem.

Primeiramente foi realizado um teste para analisar o comportamento da potência ativa de saída do parque eólico considerando apenas o controle de passo. Em seguida, realizou-se um teste considerando, além do controle de passo, a adição do equipamento STATCOM/ com suas técnicas de controle. Por fim, foi realizado um teste considerando uma perturbação no sistema dada pela remoção de uma carga reativa na barra 5. O intuito deste último teste é avaliar possíveis impactos de perturbações no sistema de transmissão na operação do equipamento STATCOM/ESS.

A FIGURA 30 mostra o perfil do vento incidente na turbina eólica. Vale lembrar que a velocidade nominal de operação do aerogerador é de 12 m/s.

FIGURA 30 – PERFIL DO VENTO INCIDENTE



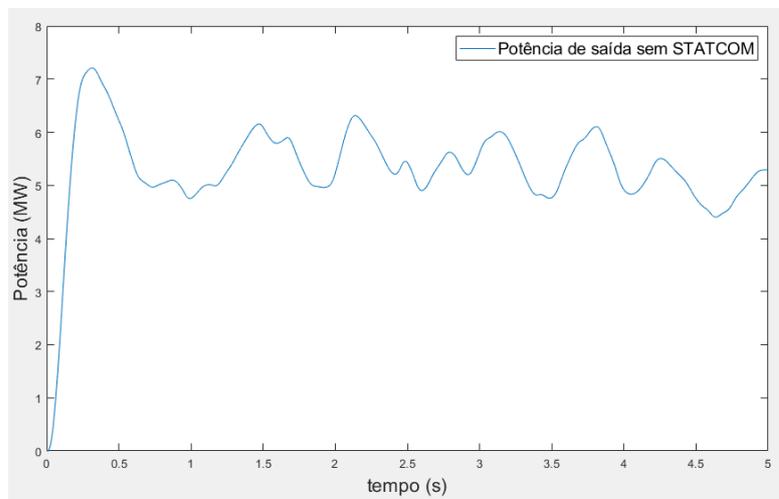
FONTE: Autor (2019).

5.1 RESULTADOS OBTIDOS CONSIDERANDO O AEROGERADOR COM CONTROLE DE PASSO SEM STATCOM/ESS

A primeira simulação foi realizada com apenas o controle de passo da turbina ativo. Na FIGURA 31 é possível identificar algumas características comuns quando se trata de geradores eólicos. Primeiramente a turbina demora cerca de 0,5 segundos para entrar em regime permanente. Durante o período transitório, a potência de saída atinge o seu valor máximo, inclusive sendo um valor superior ao nominal. Pelo fato de a turbina superar seus limites nominais na geração de potência já é possível caracterizar o controle de passo utilizado como ineficaz. Contudo a maior prova da falha no controle mecânico está na flutuação de potência ativa. Os valores variam entre 6 a 4 MW em um período curto de tempo, sendo que o vento incidente tem média constante confirmando os problemas discutidos anteriormente.

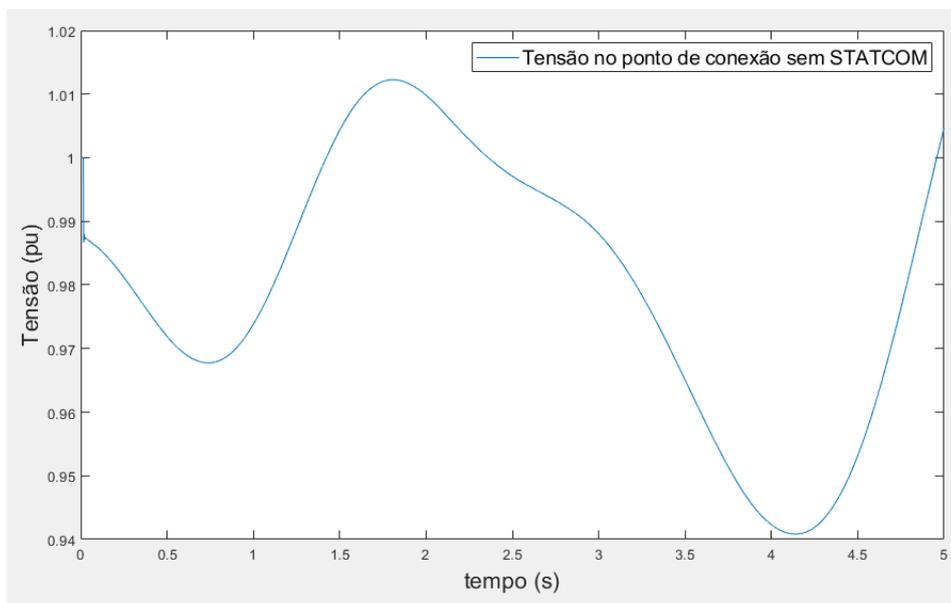
Outro parâmetro medido foi o de tensão da barra no ponto de conexão. Como será demonstrado na sequência não houve diferença na tensão da barra no ponto de conexão independente das estratégias de controle aplicados. A igualdade entre os dois perfis de tensão é justificada pelo dimensionamento do parque eólico em comparação com os geradores do sistema. Em comparativo ao gerador equivalente de ITAIPU o parque eólico é 1100 vezes menor (CANIZARES et al., 2017).

FIGURA 31 – POTÊNCIA DE SAÍDA COM CONTROLE DE PASSO



FONTE: Autor (2019).

FIGURA 32 – TENSÃO DA BARRA NO PONTO DE CONEXÃO



FONTE: Autor (2019).

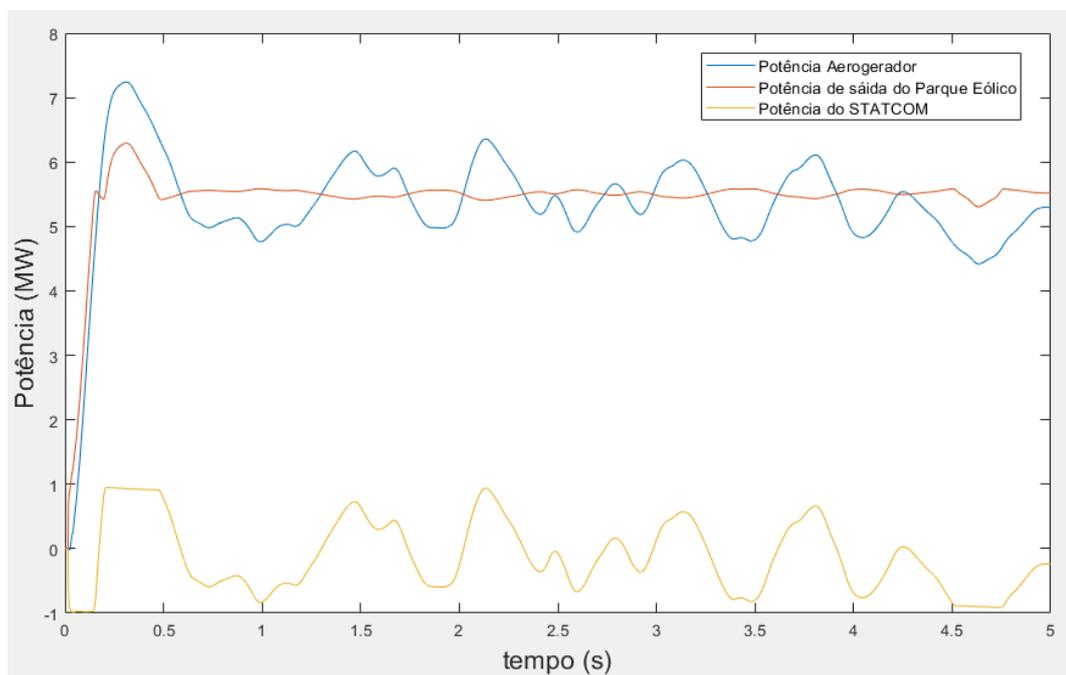
5.2 RESULTADOS OBTIDOS CONSIDERANDO O AEROGERADOR COM CONTROLE DE PASSO E COM STATCOM/ESS

A segunda simulação realizada engloba as técnicas de controle do STATCOM/ESS abordadas previamente em conjunto com o controle de passo para regular a potência do aerogerador. A FIGURA 33 mostra que o perfil de potência gerado pela turbina é o mesmo quando comparado ao caso anterior, em que não se tinha presença do STATCOM/ESS. Entretanto o perfil de potência na barra de saída do parque (curva em vermelho) é completamente diferente. O seu perfil é regular, ainda com pequenas variações, porém é possível notar a diferença visualmente entre a potência regulada e não regulada.

Ainda na FIGURA 33 tem-se o perfil de potência do equipamento STATCOM/ESS. Devido a convenção utilizada, quando a potência do STATCOM/ESS é positiva o equipamento está absorvendo potência ativa, quando é negativa o equipamento está injetando, com isso em mente é possível interpretar as curvas de potência. Quando a potência gerada na turbina é superior a referência escolhida (5,8 MW) o valor de potência do dispositivo FACTS é positivo. Se a potência gerada é menor que a referência o valor é negativo.

Alguns dados importantes a serem destacados, no período transitório quando a turbina ainda não produz um valor substancial de potência. O equipamento fornece seu máximo valor de -1 MW para compensar o fato de que a potência é menor que o valor de referência. Após alguns milissegundos a potência é superior a referência então, o equipamento suaviza o pico de potência absorvendo o seu valor máximo 1 MW. Ao final da simulação entre 4,5 e 5 segundos é possível visualizar a saturação do equipamento STATCOM/ESS em regular a potência do parque. Esse fato é causado pela baixa potência gerada na turbina, assim, mesmo que o STATCOM/ESS forneça sua potência máxima, o perfil de potência ainda ia sofrer um leve decaimento. Uma alternativa para resolver esse problema seria redimensionar a bateria. Assim seria possível injetar ou absorver uma quantidade de potência maior. O maior dimensionamento dos sistemas de armazenamento é ideal, porém devido aos custos envolvidos na instalação dos sistemas, o aumento da potência das baterias é inviável em certos casos (SWIERCZYNSKI et al., 2010).

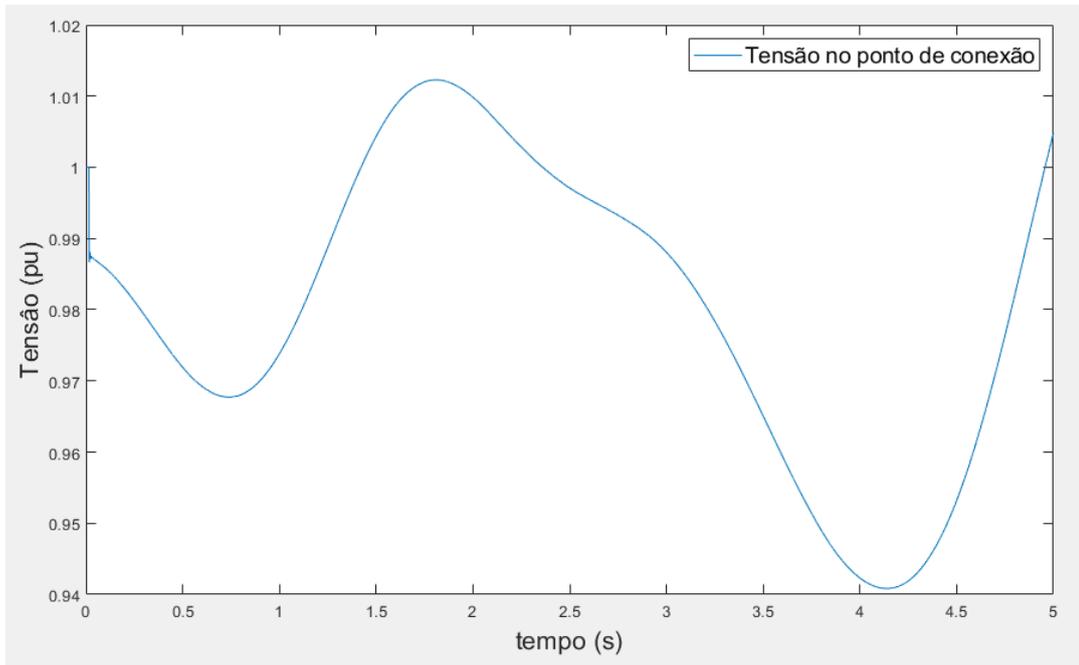
FIGURA 33 – COMPARAÇÃO DE POTÊNCIA



FONTE: Autor (2019).

Como dito anteriormente não houve diferença no perfil de tensão no ponto de conexão com a rede como mostra a FIGURA 34.

FIGURA 34 – TENSÃO NO PONTO DE CONEXÃO

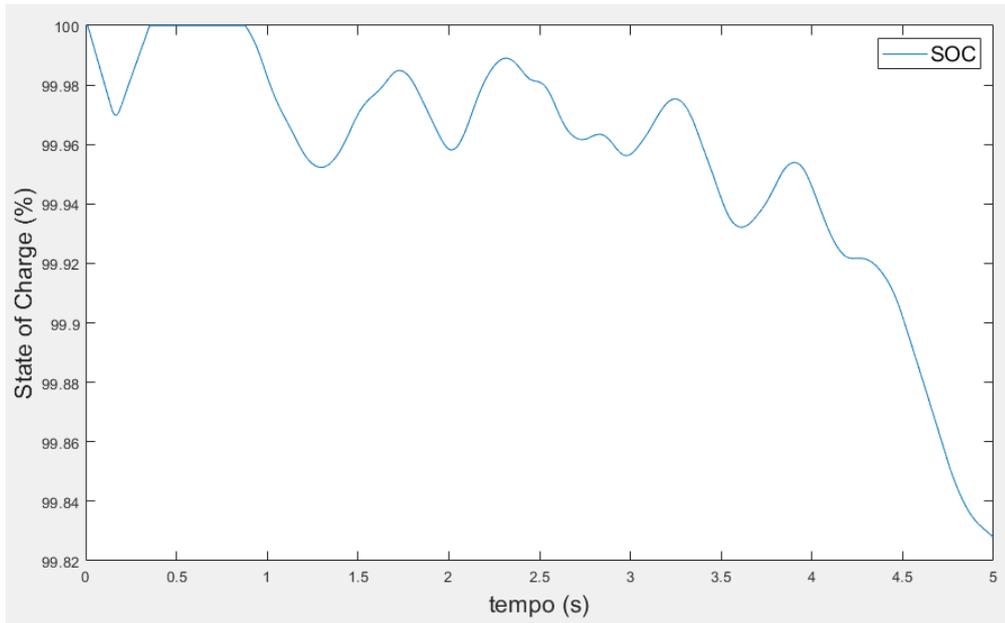


FONTE: Autor (2019).

No gráfico da carga da bateria, FIGURA 35, é possível destacar alguns pontos importantes. Primeiramente os modos de carregamento e descarregamento estão funcionando de acordo com a relação das potências. Além disto, o dimensionamento do sistema de armazenamento é coerente visto que durante 5 segundos a carga da bateria quase não se alterou. Portanto para o funcionamento em regime permanente, a bateria seria capaz de cumprir seu papel durante todo o período. Entretanto dependendo do vento incidente na turbina, o tempo de carga da bateria seria menor (YANG et al., 2001).

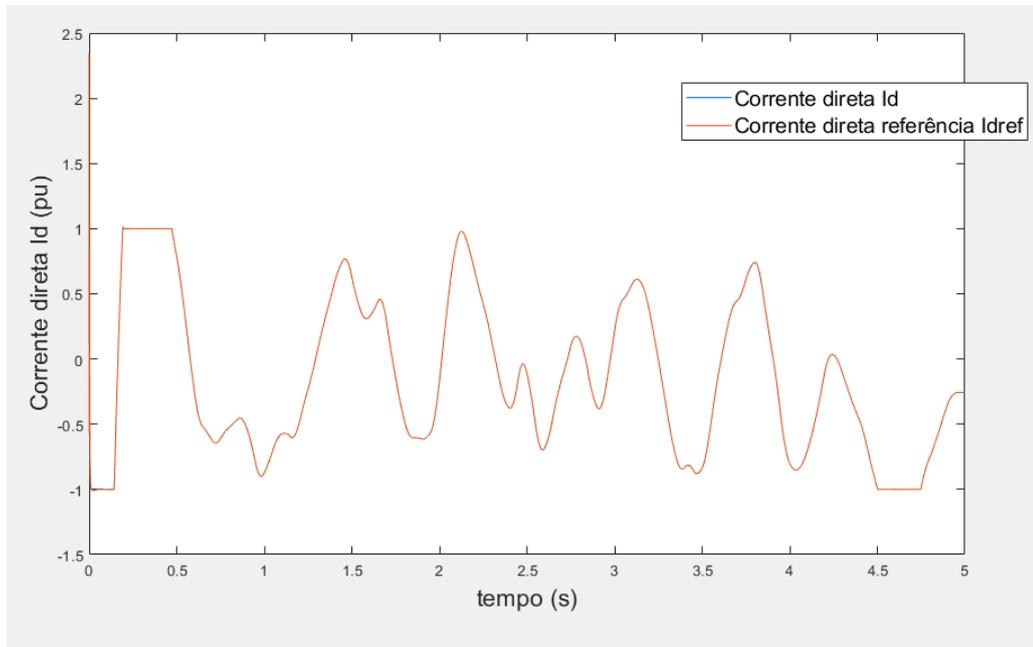
A FIGURA 36 mostra a relação entre as correntes direta controlada e a corrente direta medida. Na figura os dois perfis se sobrepõem, demonstrando que a corrente de referência sempre é semelhante a corrente medida. Assim é possível confirmar que a malha de controle das correntes está bem dimensionada. Os ganhos do controlador PI são coerentes com a necessidade do sistema.

FIGURA 35 – SOC (STATE OF CHARGE) DA BATERIA



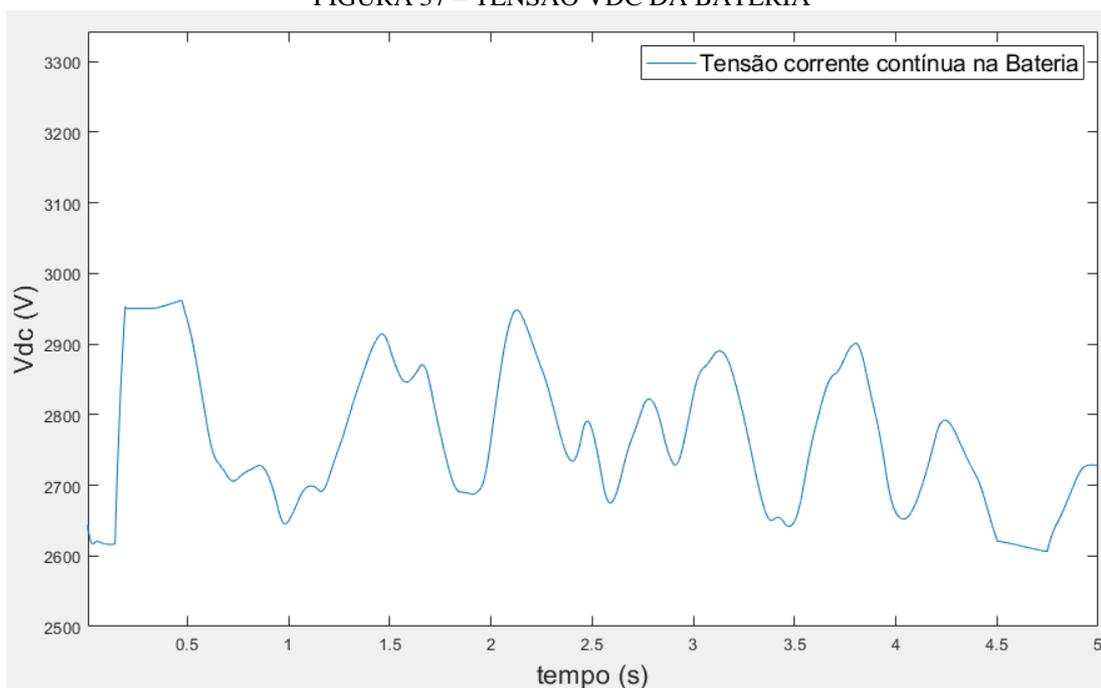
FONTE: Autor (2019).

FIGURA 36 – CORRENTES DIRETAS



FONTE: Autor (2019).

FIGURA 37 – TENSÃO VDC DA BATERIA

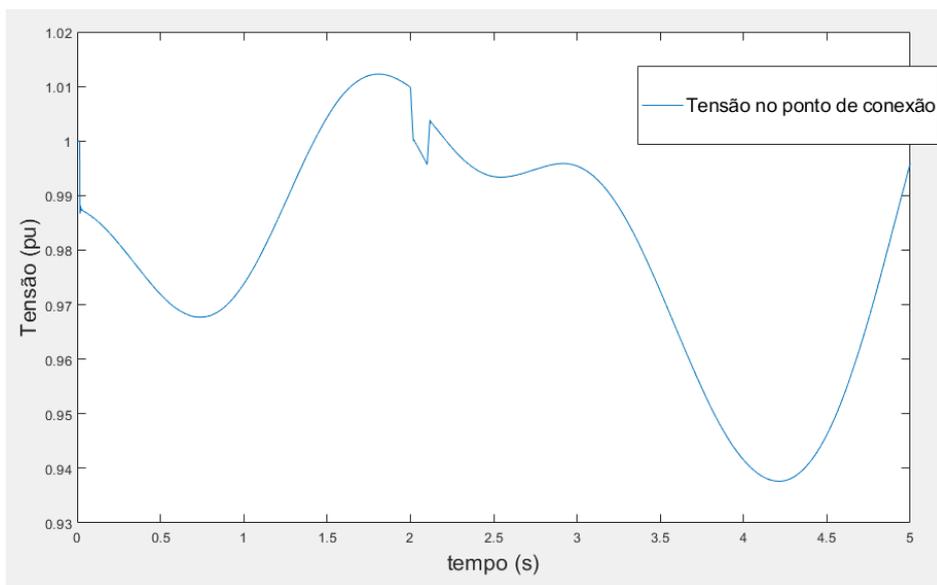


FONTE: Autor (2019).

5.3 RESULTADOS GERADOS AO INSERIR UMA CARGA REATIVA NO SISTEMA

Apesar de não ser o foco do trabalho a verificação de estabilidade de sistemas elétricos, é interessante verificar a estabilidade do sistema teste a uma perturbação e se a mesma interfere no comportamento do STATCOM/ESS. Primeiramente utilizando uma chave controlada, foi inserida e retirada uma carga reativa (indutiva) de 500 MVar. A carga é injetada no sistema no instante 2,00 segundos e retirada no instante 2,10 segundos, ou seja, simulando uma perturbação na rede. A FIGURA 38 mostra o perfil de tensão no ponto de conexão da rede antes, durante e após a perturbação. É interessante observar que houve uma ligeira queda de tensão no barramento, portanto as estratégias de controle de potência ativa não conseguem efetuar um controle de tensão no barramento, diferentemente da aplicação do STATCOM em linhas de transmissão (HINGORANI, 2007; KAMBLE, 2017; MAHANTY; GUPTA, 2004; MATHUR; VARMA, 2002).

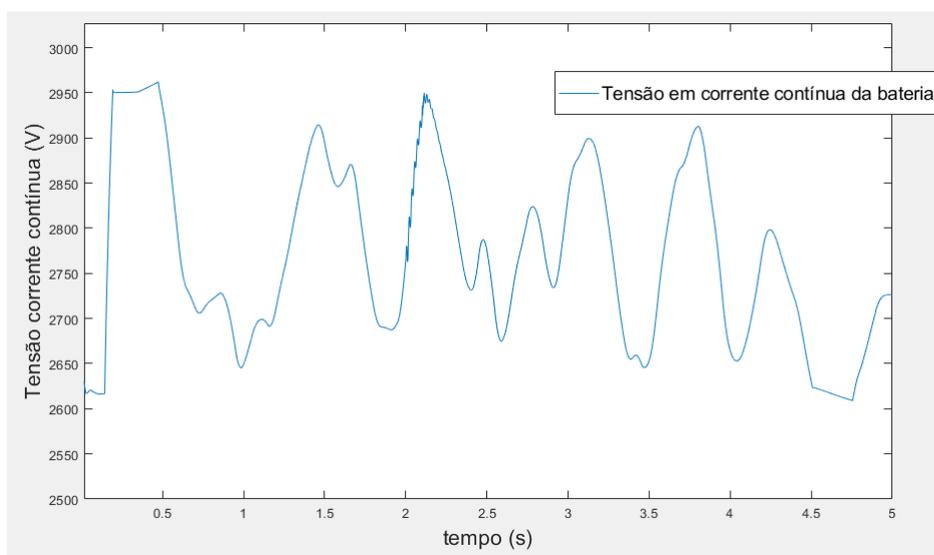
FIGURA 38 – TENSÃO NO PONTO DE CONEXÃO DURANTE PERTURBAÇÃO



FONTE: Autor (2019).

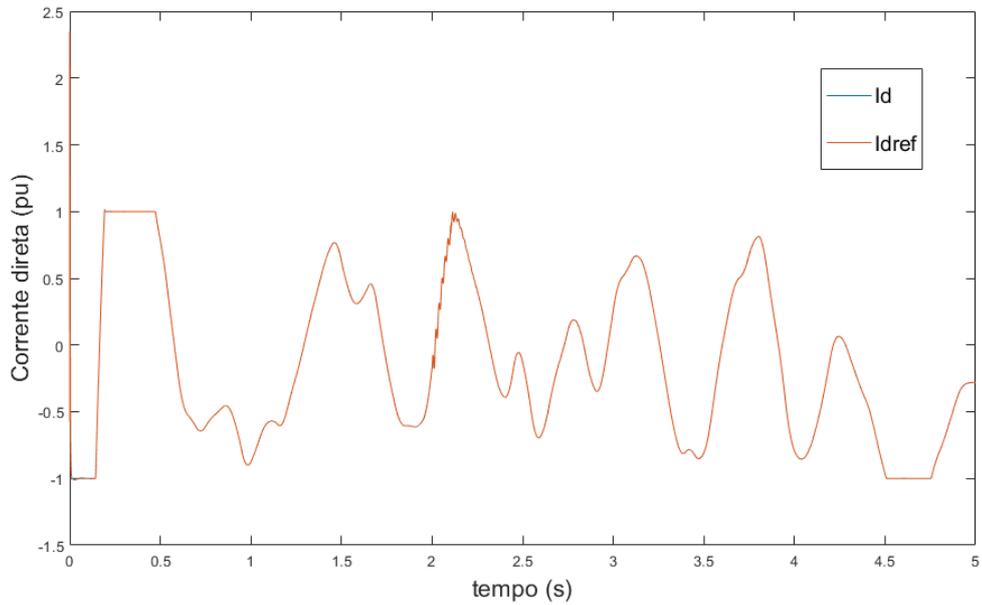
Além da diferença na tensão, houve também pequenas perturbações nos elementos de eletrônica de potência. As FIGURAS 39 e 40 mostram essas pequenas variações durante o tempo de entrada e saída de carga, após 2,20 segundos o sistema se estabiliza novamente e opera de maneira regular.

FIGURA 39 – TENSÃO VDC NA BATERIA DURANTE PERTURBAÇÃO



FONTE: Autor (2019).

FIGURA 40 – CORRENTES DIRETAS DURANTE PERTURBAÇÃO

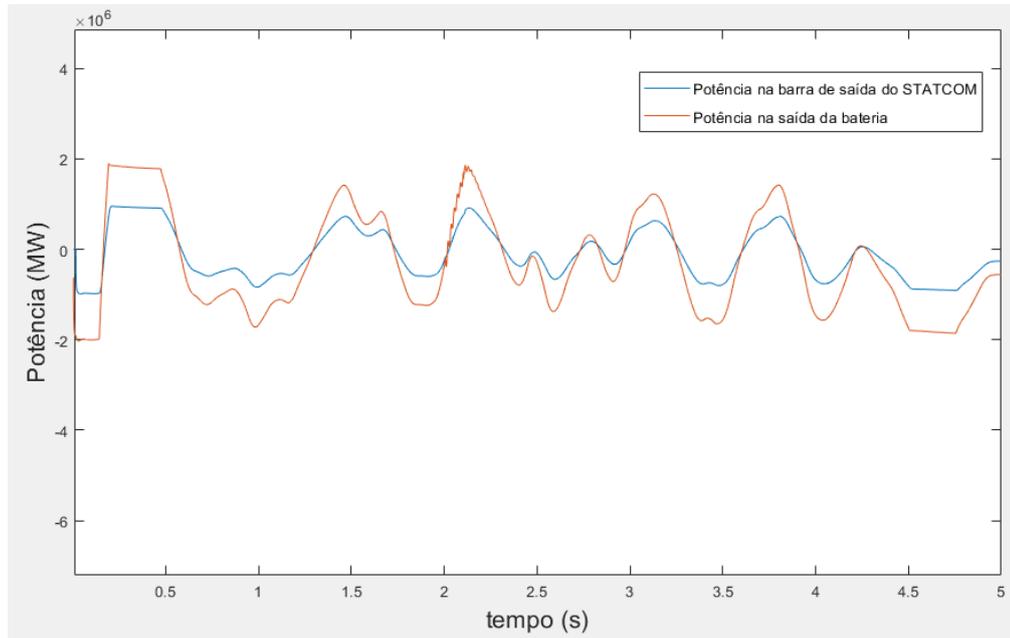


FONTE: Autor (2019).

Ao medir a potência da bateria durante a perturbação, tem-se uma pequena variação que se assemelha as variações das figuras anteriores. Como mostra a FIGURA 41, porém a variação é apenas interna do STATCOM/ESS e não é refletida na potência de saída do parque eólico.

Ainda tratando da FIGURA 41, a eficiência do sistema STATCOM/ESS é baixa, cerca de 50%, isso é resultado do método de medição. Já que, ao medir a potência em corrente contínua da bateria não é possível relacionar com a potência base do sistema, assim esse resultado é caracterizado como erro de medição. O valor esperado para a eficiência do equipamento seria bem superior ao medido, pois os tiristores utilizados (IGBT) tem alta eficiência (HINGORANI, 2007; MATHUR; VARMA, 2002).

FIGURA 41 – COMPARAÇÃO DE POTÊNCIAS DURANTE PERTURBAÇÃO



FONTE: Autor (2019).

6 CONCLUSÃO

O trabalho presente teve como objetivos verificar a viabilidade técnica na aplicação de um equipamento STATCOM com armazenamento de energia para regulação de potência ativa de aerogeradores.

Durante o estudo dos equipamentos utilizados, percebeu-se que o casamento entre fontes intermitentes e sistemas de armazenamento é ideal (SWIERCZYNSKI et al., 2010). Entretanto a execução dessa união é complexa, muito estudo deve ser feito para que haja confiabilidade nos sistemas de geração intermitente ao introduzi-los na rede elétrica. No estudo do equipamento STATCOM encontrou-se dificuldade para alcançar os objetivos necessários sem alteração das malhas de controle. Ao adaptar as malhas de controle e adicionar um sistema de armazenamento o conjunto STATCOM/ESS foi capaz de suprir as necessidades de regulação de potência de maneira coerente e satisfatório (PARK et al., 2016; YANG et al., 2001).

As simulações executadas resultaram em dados satisfatórios ao comparar a potência do aerogerador com e sem equipamento STATCOM/ESS. A primeira simulação mostrou os limites dos controles mecânicos para situações reais de variação de velocidade instantânea do vento. A potência de saída além de ser superior a nominal foi variante no tempo, apenas pela potência ser superior a nominal o gerador eólico está suscetível a danos em sua estrutura mecânica. No quesito da variação da potência, as variações podem interferir de maneira negativa em outras fontes geradoras do sistema (DO; LE, 2016; HINGORANI, 2007; KIRMANI; KUMAR, 2018; SWIERCZYNSKI et al., 2010; YANG et al., 2001). Assim é perigoso a inserção de fontes intermitentes no sistemas elétricos, atualmente a capacidade geradora desse tipo fonte é baixa em comparação com usinas hidrelétricas (CHAKRABORTY et al., 2012). Porém como a tendência é o aumento significativo nos próximos anos do uso de aerogeradores, principalmente localizados *off-shore* (fora da costa), é importante o estudo de métodos para reprimir as interferências futuras (ARGIN et al., 2019).

Durante a segunda parte de simulações foi interessante observar a efetividade do controle de potência do conjunto STATCOM/ESS. O perfil da potência de saída foi regular, entretanto foi possível observar os limites de operação dessa tecnologia. O dimensionamento do bloco de baterias é importante em dois quesitos, primeiro, se subdimensionado o sistema

não é capaz de regular a potência ativa de maneira eficiente, segundo se sobre dimensionado devido ao alto custo de implantação de baterias atualmente a solução da problemática se torna muito cara. Assim seria importante um estudo complementar de viabilidade econômica na aplicação da tecnologia proposta pelo trabalho (PARK et al., 2016; YANG et al., 2001).

Outro fator a ser concluído foi a não influencia do sistema STATCOM/ESS sem controle reativo na flutuação de tensão durante perturbações. Como visto durante a terceira parte de simulações, o equipamento não foi capaz de regular a tensão no ponto de conexão. O equipamento se mostrou suscetível as perturbações, porém a aplicação do STATCOM em seu modo natural, como regulador de tensão é muito eficiente ao executar suas tarefas (HINGORANI, 2007; MATHUR; VARMA, 2002; SCHAUDER; MEHTA, 1993). Portanto um estudo mais complexo viabilizando tanto o controle ativo, como controle reativo deve ser feito para assegurar um bom funcionamento do conjunto para diferentes necessidades.

Em resumo, a problemática é real e deve ser solucionada em breve para evitar possíveis contratempos futuros. A solução proposta cumpre os requisitos técnicos, entretanto ainda existem barreiras na aplicação da tecnologia descrita. O quesito viabilidade econômica ainda é a barreira mais difícil de ser alcançada (SWIERCZYNSKI et al., 2010).

REFERÊNCIAS

Energia eólica. ANEEL. 2017. Disponível em: < [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf) >. Acesso em 25 de agosto de 2019.

Associação Brasileira de Energia Eólica. ABEEólica. 2019. Disponível em: < <http://abeeolica.org.br/> >. Acesso em 25 de agosto de 2019.

ARGIN, M. et al. Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multi-criteria site selection. **Energy Strategy Reviews**, v. 23, n. March 2018, p. 33–46, 2019.

BARRADO, J. A.; GRIÑÓ, R.; VALDERRAMA-BLAVI, H. Power-quality improvement of a stand-alone induction generator using a STATCOM with battery energy storage system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 4, p. 2734–2741, 2010.

BISEN, P.; SHRIVASTAVA, A. Comparison between SVC and STATCOM FACTS Devices for Power. v. 4, n. 2, p. 101–109, 2013.

CANIZARES, C. et al. Benchmark Models for the Analysis and Control of Small-Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 32, n. 1, p. 715–722, 2017.

CENTRAIS, P. et al. Coordenação da Operação de Geradores Termelétricas em Sistemas de Distribuição. n. March, 2019.

CORREA, F. P, DAVID M. E. B, Estudo de estratégias para regulação de potência de saída de geradores eólicos. 2019.

CHAKRABORTY, A. et al. Integrating STATCOM and battery energy storage system for power system transient stability: A review and application. **Advances in Power Electronics**, v. 2012, 2012.

Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. 2008. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/>> . Acesso em 25 de agosto de 2019.

DANIEL G. de M. PIMENTEL, Modelagem Matemática de um Statcom para regimes permanente e dinâmico, Rio de Janeiro, (2006).

DO, N. Y.; LE, X. T. Improvements to the operation of wind power generators in Vietnam. **Journal of Vietnamese Environment**, v. 8, n. 3, p. 173–178, 2016.

ECONOMIA E ENERGIA . ECEN. 2013. Disponível em: < ecen.com.br/>. Acesso em: 25 de Agosto de 2019.

Lithium Ion Batteries. Energy Storage Association - ESA . 2019. Disponível em < <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/>> . Acesso em 19 de novembro de 2019.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, Stephen D. Maquinas elétricas: com introdução a eletrônica de potência . Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p.ISBN 9788560031047.

GEORGILAKIS, P. S.; VERNADOS, P. G. Flexible ac transmission system controllers: An evaluation. **Materials Science Forum**, v. 670, n. March 2014, p. 399–406, 2011.

HINHORANI, N. G., L. GYUGYI, “Understanding FACTS; Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems,” IEEE® Press book, 2000.

HINGORANI, N. G. FACTS technology - State of the art, current challenges and the future prospects. **2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES**, p. 11–14, 2007.

KAMBLE, P. S. S. Mid-Line Segmentation To Increase Voltage Profile. **Asian Journal of Convergence in Technology**, v. III, n. 2350, p. 1–4, 2017.

KIRMANI, S.; KUMAR, B. Power quality improvement by using STATCOM control scheme in wind energy generation interface to grid. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 114, n. 1, 2018.

KOSOW, Irving. Maquinas elétricas e transformadores . Sao Paulo: Globo, 2005. ~

M. de O. Pinto, Fundamentos de energia energia eólica. LTC, 1ed. 2013.

MAHANTY, R.; GUPTA, P. Voltage stability analysis in unbalanced power systems by optimal power flow. **IEE Proceedings-Generation, Transmission and ...**, v. 151, n. 3, p. 201–212, 2004.

MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. **Thyristor-based facts controllers for electrical transmission systems**. [s.l: s.n.].

MOORE, P.; ASHMOLE, P. Flexible AC transmission systems Part 2 methods of transmission line compensation. **Power Engineering Journal**, v. 10, n. 6, p. 273–278, 1996.

MULJADI, E. et al. Power quality aspects in a wind power plant. **2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES**, 2006.

OBANDO-MONTAÑO, A. F. et al. A STATCOM with supercapacitors for low-voltage ride-through in fixed-speed wind turbines. **Energies**, v. 7, n. 9, p. 5922–5952, 2014.

PARK, J. et al. Myelination | Elsevier Enhanced Reader. **IFAC-PapersOnLine**, p. 296–300, 2016.

PEGORARO, B, Modelagem Aerodinâmica de Turbinas eólicas (2018).

PICOLO, A. P.; BÜHLER, A. J.; RAMPINELLI, G. A. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 4, 2014.

REGUEIRO, E. et al. Energia eólica. 2006.

SCHAUDER, C.; MEHTA, H. Vector analysis and control of advanced static VAR compensators. **IEE Proceedings C: Generation Transmission and Distribution**, v. 140, n. 4, p. 299–306, 1993.

SHEIKH, M. R. I. et al. Wind generator output power smoothing and terminal voltage regulation by using STATCOM/SMES. **Proceedings of 2nd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology, ICDRET 2012**, n. August, p. 303–307, 2012.

SOHN, Alexandre Prodóssimo. Estudos de estabilidade de sistemas de potência na presença de diferentes modelos de unidades eólicas. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SWIERCZYNSKI, M. et al. Overview of the energy storage systems for wind power integration enhancement. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, p. 3749–3756,

2010.

TENDERO, Suzie. PARQUES EÓLICOS E IMPACTOS SOCIOECONOMICOS E AMBIENTAIS NA PERCEPÇÃO DE AGRICULTORES EM OSÓRIO-RS. 2013. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Desenvolvimento Rural, Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

TAHANI, M. et al. Simulation and Technical Comparison of Different Wind Turbine Power Control Systems. **Proceedings of the World Renewable Energy Congress – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden**, v. 57, p. 4233–4240, 2011.

THONGAM, J. S. et al. Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio, *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. v. 1, n. 1, p. 339–360, 2011.

YANG, Z. et al. Integration of a StatCom and battery energy storage. **Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference**, v. 3, n. SUMMER, p. 1798, 2001.