

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE POEHLMANN CORREA
MATHEUS EDUARDO DE BRAGA DAVID

ESTUDO DE ESTRATÉGIAS PARA REGULAÇÃO DE POTÊNCIA DE SAÍDA DE
GERADORES EÓLICOS

CURITIBA

2019

FELIPE POEHLMANN CORREA
MATHEUS EDUARDO DE BRAGA DAVID

ESTUDO DE ESTRATÉGIAS PARA REGULAÇÃO DE POTÊNCIA DE SAÍDA DE
GERADORES EÓLICOS

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

Orientador: Prof. Dr. Roman Kuiava.

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

**FELIPE POEHLMANN CORREA
MATHEUS EDUARDO DE BRAGA DAVID**

ESTUDO DE ESTRATÉGIAS PARA REGULAÇÃO DE POTÊNCIA DE SAÍDA DE GERADORES EÓLICOS

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Roman Kuiava
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Dra. Elizete Maria Lourenço
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Dr. Vilson R. G. R., da Silva
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, 25 de junho de 2019

Dedicamos este trabalho às nossas famílias e amigos, em especial para nosso amigo Victor Romano Pereira Lourenço (*In Memoriam*), que nos ajudaram nessa luta e nunca pararam de nos apoiar durante a vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, as nossas mães e pais, Luzia Aparecida Braga David, Ricardo Expedito David, Vera Poehlmann Correa e Joelson da Cunha Correa, por todo apoio, financeiro e psicológico, e palavras de ajuda durante esse período tão importante de nossas vidas. Nossos pais, que fizeram sacrifícios e acreditaram que o investimento em educação é a melhor coisa que eles podiam nos dar.

Aos nossos colegas de turma, em especial: Arthur, Felipe, Helder e André. Que nesses 5 anos de universidade nos fizeram dar risadas e nos apoiaram nas dificuldades.

A todos nossos familiares e amigos que conhecemos durante os últimos anos, em especial às nossas namoradas Letícia Schevisbisky de Souza e Isadora Koller, que nos apoiaram em todos os nossos obstáculos e tiveram a paciência suficiente durante todos esses anos.

Por fim a todos os professores que foram responsáveis por nossa formação e por estarmos concluindo o curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Paraná.

“Emancipate yourselves from mental slavery, none but ourselves can free our minds”

Bob Marley

RESUMO

O funcionamento do mundo moderno, da maneira que é conhecido hoje em dia, não seria possível sem a energia elétrica, e o consumo desta forma de energia se intensificou consideravelmente ao passar dos anos. Novas formas de geração surgiram e as fontes amigáveis ao meio ambiente estão cada vez mais em alta. Especificamente, a geração de energia a partir da força dos ventos está mais presente ao redor do mundo, impactando intensamente a matriz energética mundial e brasileira, através da implantação de grandes parques eólicos e também das microgerações que são conectadas ao sistema elétrico de potência. Porém, a utilização crescente da energia eólica traz consigo, além de inúmeras vantagens ambientais, deterioramento de índices de qualidade de energia devido à dificuldade de previsão de geração e principalmente devido à intermitência na geração devido à variabilidade da velocidade dos ventos, tão importante na geração eólica. O presente trabalho tem como objetivo um estudo das diferentes estratégias de controle da potência gerada por aerogeradores, assim como uma comparação entre elas. As estratégias de controle estudadas podem ser divididas em duas classes: sem o armazenamento de energia e com o armazenamento de energia elétrica. As estratégias de controle sem o armazenamento de energia são aquelas que se utilizam das propriedades geométricas da turbina para realizar o controle de energia, não necessitando de dispositivos capazes de armazenar energia. Entretanto, são incapazes de compensar a energia gerada pela turbina. Os controles com equipamentos capazes de armazenar energia elétrica são distintos do método anterior em funcionamento e propósito: utilizam a energia elétrica de sistemas de armazenamento para suavizar a energia entregue à rede pelo aerogerador. Nesse trabalho, foram feitas simulações computacionais (no *software* MATLAB/Simulink) dos dois métodos de controle como forma de comparação entre eles. Nessas simulações, foi utilizado um sistema teste com linhas de transmissão e transformadores, representando uma barra infinita da rede elétrica. A partir das simulações computacionais, foi inferido que o método de controle sem armazenamento de energia era suficiente para controlar a velocidade de rotação da turbina e extrair a máxima potência da velocidade do vento incidente, porém o método com armazenamento de energia apresentou resultados mais satisfatórios na compensação da energia produzida pela turbina a qualquer velocidade de vento incidente.

Palavras-chave: Energia Elétrica, microgerações, sistema elétrico de potência, energia eólica, controle da potência.

ABSTRACT

The workings of the modern world, in the way it is known nowadays, would not be possible without electric energy. The demand of this type of energy has been intensified considerably in the last years. New forms of generation appeared and the environment-friendly kind are growing in use. The wind power generation, specifically, is growing substantially all around the world, impacting ever more the global and Brazilian energy matrix through the implementation of big wind farms and microgrids connected to the power grid. The use of wind energy brings with it, besides innumerable environmental advantages, the worsening of energy quality indicators because of the unpredictability of wind speed, which is so important in the generation of wind energy. This work has a study of the different strategies of power control in wind turbines and a comparison between them. The studied strategies can be divided in two groups: with and without energy storage system. The types which don't use energy storage systems utilize the geometric properties of the wind turbine to control the power generated, not needing mechanisms capable of storing electric energy, but they are incapable of making the power compensation. The type of control that uses energy storage systems is very distinct from the one before, in functionality and purpose: they utilize energy storage systems to smooth the power generated by the turbine and injected in the grid. Computer simulations (MATLAB/Simulink) were used in this paper to compare the two methods of power control. The test system used in the computer simulations had transmission lines and transformers representing an infinite bus of the grid. With the simulations it was possible to infer that the method that didn't utilize the energy storage system was enough to control the rotation speed of the turbine and extract the most power from the wind, but the method of control with the energy storage system had the most satisfactory results in the compensation and smoothing of the power generated by the turbine, for any wind speed.

Keywords: Electric Energy, microgrids, power grid, wind energy, power control.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA NO BRASIL.....	13
FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DE PARQUES EÓLICOS POR ESTADO.....	13
FIGURA 3 - COMPOSIÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA.....	14
FIGURA 4 - AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL.....	16
FIGURA 5 - AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL.....	16
FIGURA 6 - COMPOSIÇÃO DOS AEROGERADORES.....	17
FIGURA 7 - FLUXO DE AR QUE PASSA PELAS TURBINAS.....	18
FIGURA 8 - SEÇÃO VERTICAL DA PÁ DE UM AEROGERADOR.....	20
FIGURA 9 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DE CONTROLE PITCH.....	23
FIGURA 10 - POTÊNCIA DE SAÍDA VARIANDO COM O ÂNGULO DE PASSO.....	24
FIGURA 11 - SISTEMA BESS LIGADO A UM AEROGERADOR.....	27
FIGURA 12 - FESS LIGADO AO SISTEMA DE GERAÇÃO.....	30
FIGURA 13 - MODELOS DE CONEXÃO <i>STRING</i> OU <i>DAISY-CHAIN</i>	32
FIGURA 14 - EQUIVALENTE DA CONEXÃO <i>DAISY-CHAIN</i>	32
FIGURA 15 - DIAGRAMA UNIFILAR UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES.....	33
FIGURA 16 - MODELO DO DIAGRAMA UNIFILAR NO SIMULINK.....	33
FIGURA 17 - VELOCIDADE DO VENTO VARIANDO COM O TEMPO.....	35
FIGURA 18 - SISTEMA DE CONTROLE DA BATERIA.....	36
FIGURA 19 - BLOCO QUE REPRESENTA A BATERIA.....	36
FIGURA 20 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLE DAS BATERIAS.....	36
FIGURA 21 - POTÊNCIA ATIVA SEM CONTROLE <i>PITCH</i>	37
FIGURA 22 - SISTEMA DE PROTEÇÃO DA TURBINA.....	38
FIGURA 23 - ROTAÇÃO DA TURBINA SEM CONTROLE <i>PITCH</i>	38
FIGURA 24 - POTÊNCIA ATIVA NA TURBINA COM CONTROLE <i>PITCH</i>	39
FIGURA 25 - VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DA TURBINA NO CONTROLE <i>PITCH</i> ...	40
FIGURA 26 - DIAGRAMA UNIFILAR DA SIMULAÇÃO COM BESS.....	40
FIGURA 27 - POTÊNCIA ATIVA COM CONTROLE BESS.....	41
FIGURA 28 - COMPARAÇÃO ENTRE AS POTÊNCIAS DAS SIMULAÇÕES.....	41
FIGURA 29 - TENSÕES NAS BARRAS B4 E B5 (CONTROLE <i>PITCH</i>).....	42
FIGURA 30 - ESQUEMA BÁSICO DO STATCOM.....	49
FIGURA 31 - MODELO ESQUEMÁTICO STATCOM E MODOS DE OPERAÇÃO.....	50

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABEEólica	-	Associação Brasileira de Energia Eólica
BESS	-	<i>Battery Energy Storage System</i>
CCEE	-	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
ESS	-	<i>Energy Storage System</i>
FACTS	-	<i>Flexible Alternating Current Transmission Systems</i>
FESS	-	<i>Flywheel Energy Storage System</i>
IRENA	-	<i>International Renewable Energy Agency</i>
PROINFA	-	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
SCESS	-	<i>Supercapacitor Energy Storage System</i>
SMESS	-	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage System</i>
STATCOM	-	<i>Static Synchronous Compensator</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2	PROBLEMATIZAÇÃO	14
1.3	OBJETIVOS	15
1.3.1	OBJETIVO GERAL.....	15
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	AEROGERADORES.....	16
2.2	FUNCIONAMENTO DE AEROGERADORES	17
2.3	PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR	17
2.3.1	GERADORES	18
2.4	POTÊNCIA DE SAÍDA DE AEROGERADORES	18
3	CONTROLE DA POTÊNCIA DE SAÍDA DE AEROGERADORES	22
3.1	SISTEMAS DE CONTROLE SEM O ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	22
3.1.1	CONTROLE AERODINÂMICO.....	22
3.1.2	CONTROLE A PARTIR DA ENERGIA CINÉTICA.....	25
3.2	CONTROLE COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	26
3.2.1	BATERIAS.....	27
3.2.2	ULTRACAPACITORES.....	28
3.2.3	SUPERCONDUTOR.....	29
3.2.4	FLYWHEEL.....	29
4	METODOLOGIA	31
4.1	SISTEMA TESTE E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	31
5	RESULTADOS E ANÁLISES	37
5.1	SEM CONTROLE PITCH	37
5.2	COM CONTROLE PITCH	38
5.3	COM CONTROLE PITCH E BESS	40
5.4	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE CONTROLE	41
6	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICE 1 – STATCOM	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

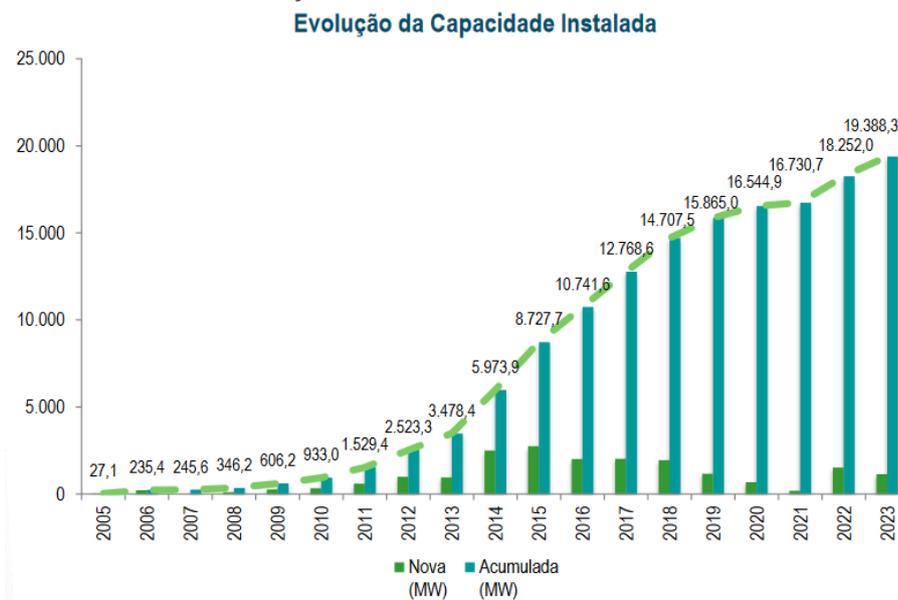
Há indícios de que a energia proveniente dos ventos já era utilizada por volta de 2000 A.C. para sistemas de irrigação primitivos pela China e pelo Império Babilônico. Os primeiros registros de moinhos de eixo vertical, para bombeamento de água e moagem de grãos, provêm da Pérsia em torno de 200 A.C. Este tipo de moinho foi trazido para a Europa há cerca de 900 anos após o retorno das grandes cruzadas. De acordo com Dutra (2008), os moinhos de eixo horizontal começaram a ser utilizados no século XII na França, Holanda e Inglaterra e o modelo holandês foi amplamente utilizado por toda a Europa. A utilização de cata-ventos para geração de energia elétrica se deu em 1888, quando o inventor Charles Francis Brush montou em Cleveland, Ohio, um aerogerador capaz de gerar 12kW em corrente contínua. O moinho de vento de Brush tinha 144 pás e 18 m de altura, de acordo com Shefherd (1994).

Em relação às turbinas eólicas de grande porte, os pioneiros foram os Russos em 1931 com o aerogerador *Balaclava*, com 30 m de altura. Este modelo gerava 100 kW conectado a uma linha de transmissão de 6,3 kV com 30 km de comprimento, que o ligava a uma usina termelétrica de 20 MW (Sektorov, 1934).

Segundo dados da ANEEL (2017), no Brasil, a evolução da energia eólica se deu principalmente após a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) em 2002. Em 2004, foram contratados 1,4 GW de potência, em torno de 54 usinas eólicas. Já em 2009, ocorreu o primeiro leilão exclusivo para energia eólica. Conforme pode ser observado na figura 1, a capacidade instalada no Brasil deu um salto de 2005 de 27.1 MW para 14,7 GW em 2018, chegando a alcançar a 7ª posição entre os maiores geradores de energia eólica do mundo.

Segundo os dados divulgados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE, que publicou os resultados da contabilização do setor de energia elétrica –, no Brasil, em novembro de 2018, o consumo total foi de 64.440 MW médios e a geração total foi de 64.498 MW médios. Destes 7.063 MW médios foram produzidos através da geração eólica, assim sendo, a geração de energia a partir dos ventos já chega a representar 11% da geração total de energia elétrica no Brasil (ABEEólica, 2019).

FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA NO BRASIL



FONTE: ABEEólica (2019).

No Brasil, os grandes parques eólicos se concentram em estados banhados pelo mar, principalmente na região nordeste e sul do país, conforme figura 2, a seguir.

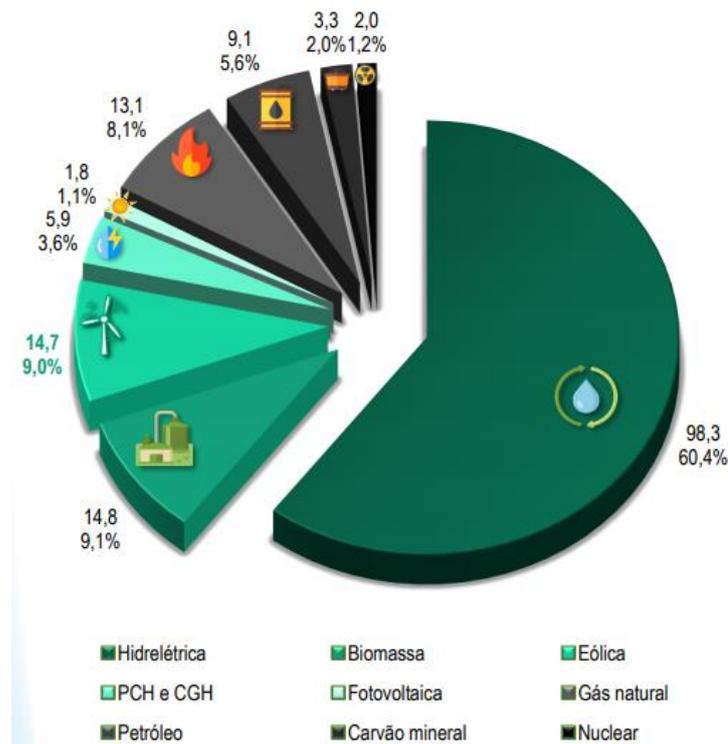
FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DE PARQUES EÓLICOS POR ESTADO



FONTE: ABEEólica (2017).

Analisando o ano de 2018, os 14,7 GW gerados representaram ao todo 9% da matriz energética brasileira, representada na figura 3. A previsão para 2019 é de que a fonte de energia proveniente dos ventos se torne a segunda maior fonte de energia elétrica brasileira.

FIGURA 3 - COMPOSIÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA
Composição da Matriz Elétrica Brasileira (GW)



FONTE: ABEEólica (2017).

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

Gerar energia a partir dos ventos traz consigo muitos benefícios: é uma fonte amigável ao meio ambiente e reduz a emissão de gases do efeito estufa, visto que substitui outras fontes de energia e é uma fonte inesgotável de energia. Porém, o crescimento acelerado na utilização da energia eólica está afetando alguns índices de qualidade de energia, tais como: flutuações de tensão, injeção de harmônicos, sobretensões e variações no perfil de tensão. (Silva et al; 2003). Isto ocorre devido à natureza irregular dos ventos que, além de dificultar a previsão de geração de energia, causa microirregularidades na potência ativa entregue para a rede. Isto ocorre devido a resposta lenta dos métodos de controle de potência utilizados atualmente em aerogeradores, tais como o controle *pitch* ou *stall*, que não possuem sistemas de armazenamento de energia e se enquadram em controles aerodinâmicos. Há outras formas de controle envolvendo o armazenamento de energia que podem atuar de maneira mais rápida e eficiente, como armazenamento com baterias (BESS), ultracapacitores (SCESS), supercondutores (SMESS) e *flywheel* (FESS).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho consiste no estudo de estratégias para a regulação da potência ativa de saída de geradores eólicos. Além disso, serão feitas simulações computacionais como forma de comparação de diferentes tipos de controle de potência.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os que seguem, abaixo:

1. Estudo de ferramentas de adequação de potência de saída de geradores eólicos;
2. Implementar controle *pitch* para regulação de potência de saída;
3. Implementar o controle com armazenamento de energia (BESS);
4. Análise comparativa entre estratégias de controle simuladas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto de 6 capítulos. O primeiro é uma introdução sobre o histórico das turbinas eólicas e da geração de energia elétrica a partir de vento, assim como os problemas encontrados nesse tipo de geração. Também se encontra nesse capítulo os objetivos dessa monografia.

O segundo capítulo é composto de uma revisão bibliográfica sobre os aerogeradores e de uma explicação sobre a potência gerada pelos geradores elétricos.

O terceiro capítulo apresenta um apanhado geral sobre os diferentes tipos de controle da potência gerada pelas turbinas eólicas.

O quarto capítulo é composto da metodologia utilizada no trabalho, sendo composta por explicações das diferentes partes envolvidas nas simulações computacionais.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos através das simulações feitas no MATLAB/Simulink.

O sexto e último capítulo agrega as conclusões tiradas das simulações computacionais junto com a comparação entre os tipos de controle simulados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AEROGERADORES

Há dois tipos de aerogeradores utilizados: o aerogerador de eixo horizontal, figura 4, e de eixo vertical, figura 5. Os aerogeradores são movidos por forças de sustentação e arrasto, o de eixo horizontal é movido principalmente através de forças de sustentação, o que permite liberar mais potência, mas em contrapartida exige um sistema de giro ao redor da torre de modo que sempre esteja na posição perpendicular em relação à direção do vento. Já os de eixo vertical, são mais simples pois não necessitam de nenhum sistema para acompanhar a direção do vento, podem ser utilizados mais próximos ao solo, mas somente apresentam vantagens trabalhando com vetos reduzidos (Coelho, 2013).

FIGURA 4 – AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL



FONTE: Coelho (2013).

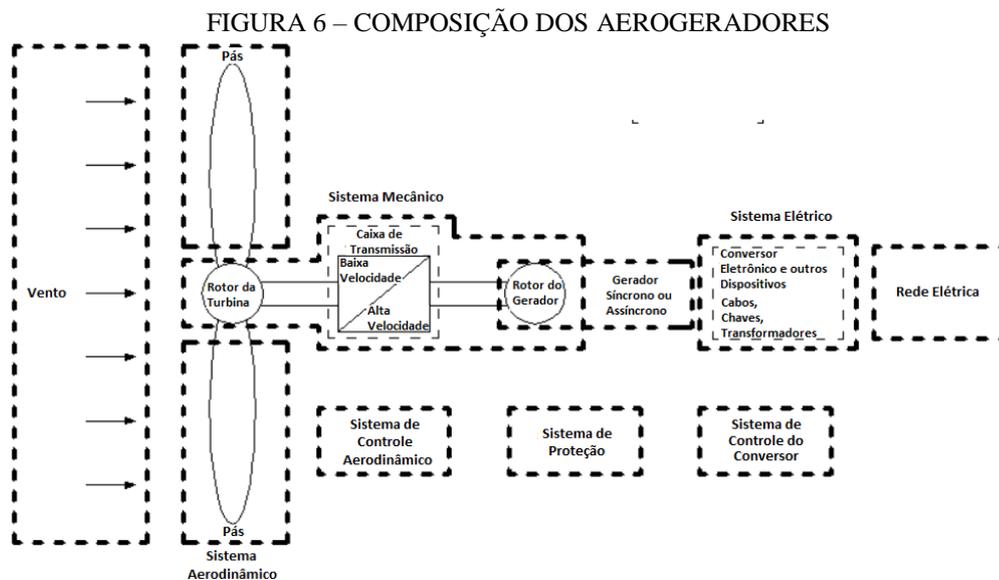
FIGURA 5 – AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL



FONTE: Stroski (2019).

2.2 FUNCIONAMENTO DE AEROGERADORES

O funcionamento de aerogeradores é um processo simples que converte a energia contida nos ventos em energia elétrica. Primeiramente, as pás recebem a força do vento, iniciando o movimento de rotação e transferindo energia eólica para o rotor – este está ligado a caixa de transmissão que recebe a rotação baixa e entrega a rotação nominal para qual o gerador foi dimensionado para operar. Por fim, o gerador converte a energia mecânica recebida em energia elétrica e transfere para a rede. A figura 6 mostra a composição dos aerogeradores como diagrama de blocos.



FONTE: Sohn (2014).

2.3 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR

Os aerogeradores são compostos por diversos sistemas interligados conforme a figura 6. O sistema mecânico, composto por rotor, eixos e caixa de transmissão, realiza a ligação do sistema aerodinâmico, composto pelas pás, ao sistema elétrico. O sistema elétrico é composto de cabos, chaves, transformadores, dispositivos de controle e conversores eletrônicos de potência.

Além dos sistemas diretamente ligados à rotação e à geração, há o sistema de controle do conversor, o sistema de controle aerodinâmico que controla o ângulo de incidência do vento nas pás e o sistema de proteção que conta com relés de proteção para subtensão, sobretensão e sobre velocidade. (Sohn, 2014)

2.3.1 Geradores

Os geradores são os responsáveis pela conversão eletromecânica e essa etapa apresenta problemas quando falamos de sistemas de conversão eólica. São eles: variações na velocidade do vento, variações do torque de entrada, dificuldade de instalação, operação e manutenção e exigências de frequência e tensão constantes. Devido a estes problemas, devem ser analisadas com cuidado as vantagens e desvantagens que cada tipo de gerador apresente. São utilizados em aerogeradores geradores de corrente contínua, síncronos, assíncronos e de comutador de corrente alternada. (Cresesb, 2008)

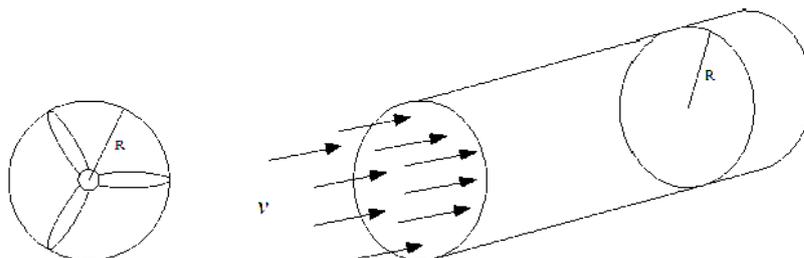
2.4 POTÊNCIA DE SAÍDA DE AEROGERADORES

A potência de saída de aerogeradores consiste na conversão da energia cinética de translação, presente nos ventos, em energia cinética de rotação pelas pás da turbina. A energia cinética das pás é convertida em energia mecânica pelo rotor da turbina e, posteriormente, é convertida em energia elétrica pelo gerador elétrico. A energia cinética do vento que atinge as pás da turbina está diretamente relacionada com a velocidade do vento incidente nelas. A equação 1, a seguir, explicita essa relação.

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

Nesta equação, E [kgm^2/s] é a energia cinética do vento, m_{ardest} [kg] é a massa de ar deslocada pelo fluxo de vento que incide nas pás da turbina e v [m/s] é a velocidade do vento incidente nas pás. A figura 7, abaixo, mostra o fluxo de ar que percorre as pás da turbina e passa pela área circular formada por elas.

FIGURA 7 - FLUXO DE AR QUE PASSA PELAS TURBINAS



FONTE: Sohn (2014)

Na figura 7, podemos perceber que o raio R [m] da área circular formada pela rotação das pás do aerogerador é o comprimento das pás da turbina. Esta área A [m²] está demonstrada pela equação 2, e a massa de ar deslocada m_{ardest} está demonstrada na equação 3, a seguir.

$$A = \pi R^2 \quad (2)$$

$$m_{ardest} = \rho_{ar} A v \quad (3)$$

Onde ρ_{ar} [kg/m³] é a densidade do ar (em condições atmosféricas de 1 ATM e 25 °C equivale a 1,225 kg/m³). A partir das equações 1 e 3, é possível exprimir a potência total P_v [W] presente no vento que incide nas turbinas e é extraída pelo aerogerador, dada pela equação 4, abaixo.

$$P_v = \frac{1}{2} \rho_{ar} A v^3 = \frac{1}{2} \rho_{ar} \pi R^2 v^3 \quad (4)$$

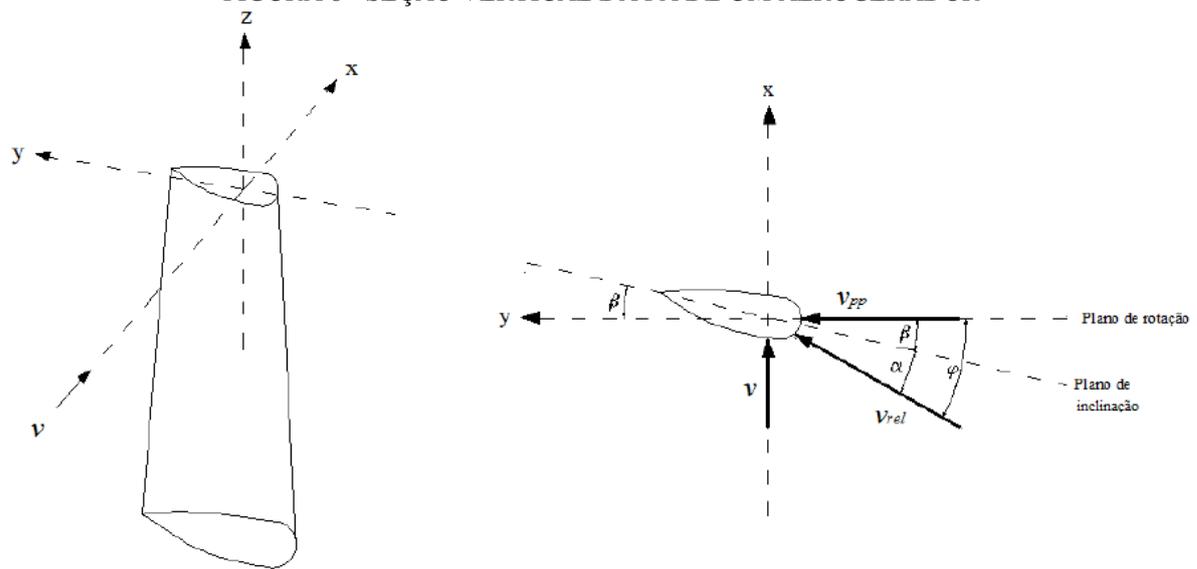
Como existem perdas na conversão da potência do vento em potência mecânica, é utilizado um fator de potência C_p para adequar a equação da potência mecânica gerada pelo aerogerador. Esse coeficiente depende do ângulo de inclinação das pás e da relação entre as velocidades do vento incidente no aerogerador. As equações 5 e 6, a seguir, apresentam a potência mecânica produzida pelo gerador eólico.

$$P_m = C_p P_v \quad (5)$$

$$P_m = \frac{1}{2} \rho_{ar} C_p A v^3 \quad (6)$$

A figura 8, abaixo, exibe a seção vertical da pá de um aerogerador. Nela, é possível notar alguns parâmetros importantes: o ângulo de ataque α [°] do vento, que é o ângulo de incidência do vento em relação ao plano de inclinação da pá; o ângulo de passo β [°], que é o ângulo de inclinação da pá em relação ao plano de rotação; o ângulo de incidência φ [°] e as velocidades do vento incidentes na pá.

FIGURA 8 - SEÇÃO VERTICAL DA PÁ DE UM AEROGERADOR



FONTE: Sohn (2014).

Nessa figura, são apresentadas as velocidades do vento incidente na pá da turbina. A velocidade de ponta de pá v_{pp} [m/s] é a velocidade do vento que incide na turbina com direção paralela ao plano de rotação da pá, e está representada pela equação 7; a velocidade relativa do vento v_{rel} [m/s] é a velocidade do vento que incide com ângulo de incidência φ relativo ao plano de rotação da pá do aerogerador, e está representada pela equação 8 e a velocidade do vento v , com incidência perpendicular ao plano de rotação da pá. A relação entre as velocidades λ está contemplada na equação 9.

$$v_{pp} = -\omega_t R \quad (7)$$

$$v_{rel} = v_{pp} + v \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v} \quad (9)$$

A grandeza ω_t [rad/s] é a velocidade angular do rotor da turbina. A partir da equação 9, temos o ângulo de incidência φ , dado pela equação 10.

$$\varphi = \arctg\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \arctg\left(\frac{v}{\omega_t R}\right) \quad (10)$$

Como o coeficiente de potência depende tanto do ângulo de passo quanto da relação das velocidades, podemos reescrever a equação 6, da potência mecânica do aerogerador, como:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho_{ar} C_p(\lambda, \beta) A v^3 = \frac{1}{2} \rho_{ar} C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 v^3 \quad (11)$$

A partir da equação (11), é possível inferir que a potência mecânica de um aerogerador varia proporcionalmente ao cubo da velocidade do vento incidente nas pás e também depende do comprimento delas. A potência de saída varia muito com pequenas variações na velocidade do vento. Como a velocidade do vento varia constantemente, e muitas vezes bruscamente, tem-se uma dificuldade na previsão da potência gerada pelo gerador eólico. Essas variações de potência trazem diversas reações para o sistema elétrico ao qual o parque eólico está ligado (afundamento de potência, sobretensão, piora da qualidade da energia fornecida), portanto são necessários instrumentos de controle dessa potência de saída.

3 CONTROLE DA POTÊNCIA DE SAÍDA DE AEROGERADORES

Como ilustrado nos capítulos anteriores, a potência de saída de aerogeradores necessita de um sistema de controle para que haja sua adequação ao sistema elétrico, prevenindo falhas e danos mecânicos aos equipamentos da turbina e, como objetivo principal, extrair a máxima potência do vento incidente na turbina. Este sistema de controle pode ser dividido em duas ênfases principais: o controle sem o armazenamento de energia e o controle com o armazenamento de energia. Cada tipo de sistema de controle tem suas vantagens e desvantagens, que serão discutidas nos capítulos a seguir.

3.1 SISTEMAS DE CONTROLE SEM O ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Sistemas de controle sem o armazenamento de energia são métodos de controle da potência de saída de aerogeradores sem a utilização de equipamentos capazes de armazenar energia. Utilizam as propriedades físicas e geométricas do aerogerador para fazerem o controle da potência e, por não precisarem de armazenamento de energia elétrica, possuem custos mais baixos se comparados a outros sistemas de controle. Como esses métodos trabalham em propriedades intrínsecas à turbina, possuem tempo de resposta maior que outros métodos (atuadores levam certo tempo para rotacionar as pás da turbina) e ainda podem causar danos estruturais à turbina, como é o caso dos controles que criam uma região de turbulência nas pás.

Esse tipo de controle pode ser dividido em controle aerodinâmico e controle a partir da energia cinética armazenada na rotação da turbina. Ambos possuem vantagens e desvantagens, porém são fundamentalmente diferentes (o controle a partir da energia cinética se aproxima mais do controle com armazenamento de energia).

3.1.1 Controle aerodinâmico

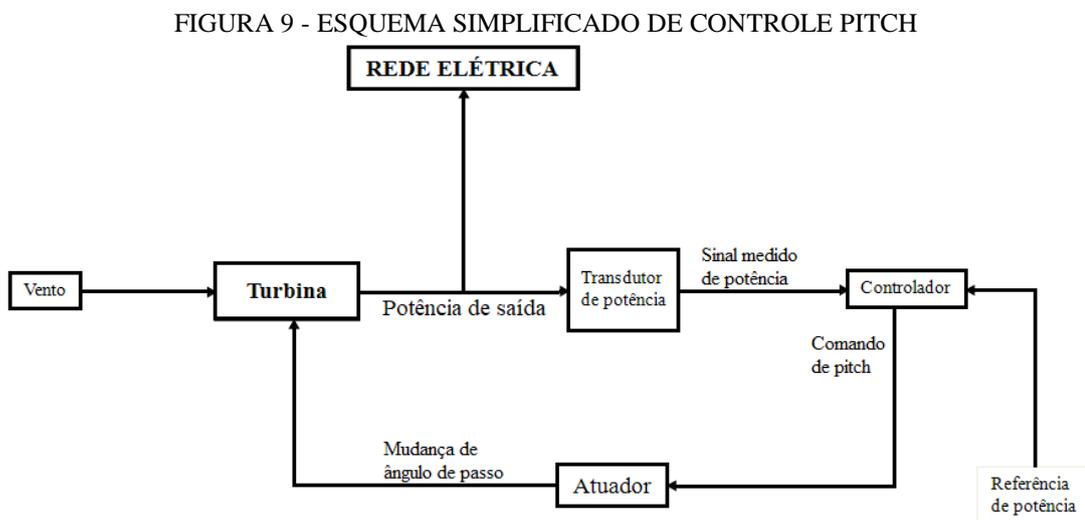
O controle aerodinâmico utiliza as propriedades geométricas da turbina para a limitação da potência de saída entregue pela máquina. Esse controle tem como objetivo uma limitação da velocidade de rotação da turbina, como forma de proteção e controle de potência. Existem dois tipos de controle aerodinâmico: o controle *stall* e o controle *pitch*.

O controle *stall* consiste em se manter fixo o ângulo de passo β da turbina. Quando a velocidade do vento aumenta acima da velocidade nominal para a turbina, cria-se uma região de turbulência nas pás. Essa região de turbulência aumenta a força de arrasto (que faz a

frenagem da turbina) e diminui a força de sustentação das pás (que faz a aceleração da turbina) fazendo com que a velocidade de rotação da turbina se mantenha constante em um valor pré-estabelecido pelo projetista e assim a potência de saída entregue pelo aerogerador se mantém constante.

O controle *pitch* é muito parecido em princípio com o controle *stall*, porém atua de forma ativa na turbina. Enquanto a velocidade do vento aumenta, o ângulo de passo das pás da turbina varia proporcionalmente através de um sistema de controle acoplado a atuadores (servomotores, pistões hidráulicos). A velocidade de rotação da turbina permanece constante e, assim, a potência entregue pelo aerogerador é limitada de acordo com a programada pelo projetista. Como o método *stall*, esse método traz uma maior proteção contra velocidades do vento muito superiores à nominal, ou seja, protege a turbina contra danos mecânicos. De acordo com Howlader et al. (2013), é um método de controle barato, robusto, eficiente e de alto nível de confiança, mas que apresenta velocidade de resposta lenta se comparado com outros métodos de controle.

A figura 9, a seguir, mostra o controle *pitch* através de uma representação de diagrama de blocos, onde é possível perceber os atuadores, transdutores, e os outros mecanismos necessários para se fazer esse controle. De uma maneira simplificada, um transdutor mede o sinal de potência gerada pela turbina e manda esse sinal para o controle. Se a potência estiver abaixo dos valores nominais, o controle envia um sinal para os atuadores nas pás para que seja feita a mudança do ângulo de passo da turbina, ou ângulo de inclinação em relação ao plano de rotação dela.

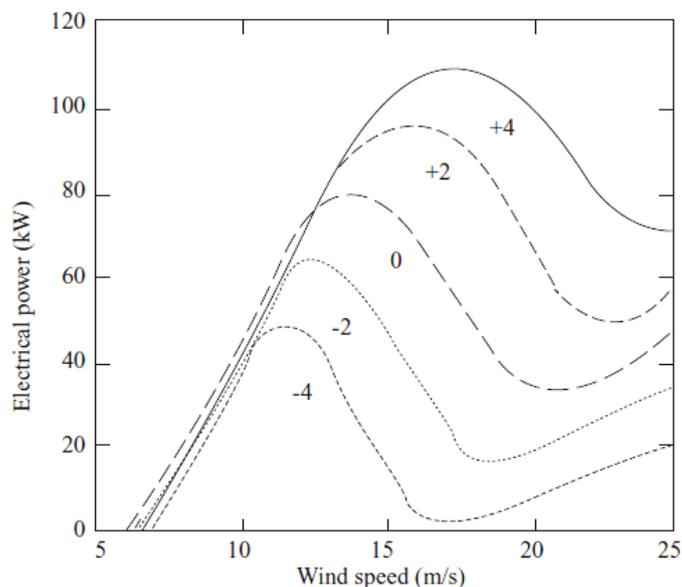


FONTE: O Autor (2019), adaptada de Burton et al. (2011)

Na figura 10, a seguir, é possível perceber a variação da potência de saída de aerogeradores quando o ângulo de passo das pás é variado. A partir dela, é possível perceber dois dos tipos de inclinação que as pás da turbina podem sofrer. O primeiro é quando o ângulo de passo aumenta, mais conhecido como *pitch to stall*. Nele há uma diminuição do ângulo de passo em relação ao nominal (no gráfico da figura 10 é representado como “0”) através de uma rotação das pás da turbina na direção do vento, ou seja, a favor do vento. Isso faz com que o ângulo de ataque do vento α seja reduzido e, concomitantemente, o impulso nas pás diminui, gerando um maior arrasto nas pás. Essa região de arrasto, ou *stall*, cria uma turbulência nas pás e assim limita a potência gerada pelo aerogerador. (Burton et al; 2011)

O segundo tipo é conhecido como *pitch to feather*. Nele o ângulo de passo aumenta em relação ao nominal através da rotação das pás, em seu eixo, na direção contrária à direção da velocidade do vento. Esse tipo de inclinação faz com que o ângulo de ataque do vento e o arrasto nas pás diminuam. *Pitch to feather* é o método mais utilizado no controle da potência de saída de aerogeradores se comparado com *pitch to stall*, pois as cargas no comprimento das pás podem ser mais facilmente previstas, apesar desse controle ser mais complexo, como escreve Burton et al. (2011). Quando as pás da turbina entram em *stall*, pequenos movimentos de rotação da turbina são suficientes para que o torque aerodinâmico seja controlado. O controle de *pitch* por *pitch to stall* resulta em cargas mecânicas elevadas na turbina, devido ao arrasto nas pás, porém essas forças mecânicas são constantes na região de *stall* e, por isso, o desgaste nas pás é menor.

FIGURA 10 - POTÊNCIA DE SAÍDA VARIANDO COM O ÂNGULO DE PASSO



FONTE: Burton et al. (2011)

As mudanças no ângulo de passo do vento incidente nas turbinas precisam ser feitas de forma eficiente e rápida, para que a potência de saída do aerogerador seja suavizada e limitada da melhor forma possível. Para isso, o controlador do *pitch control* precisa estar bem calibrado e os atuadores (máquinas que farão a rotação das pás) precisam responder rapidamente às mudanças na velocidade do vento. Existe uma variedade bem grande de atuadores para as turbinas eólicas, os mais comuns são hidráulicos e servomotores, e cada tipo apresenta suas vantagens e desvantagens que devem ser levadas em consideração no projeto do aerogerador.

De acordo com Burton et al. (2011), o controle *pitch* nas pás pode ser feito tanto simultaneamente em todas as pás quanto individualmente em cada pá. Porém, o controle individual é pouco utilizado pela dificuldade de se fazer um controle de cada pá. A rotação das pás pode ser dividida em duas ênfases: rotação total ou parcial. A rotação total das pás da turbina é o método preferido pelos fabricantes de aerogeradores, porém, o controle da potência de saída de turbinas eólicas pode ser alcançado quando somente 15% da pá é rotacionada. Essa rotação parcial das pás é atingida através de muitos mecanismos: rotação das pontas das pás, utilizando flaps ou outros equipamentos que modifiquem as propriedades aerodinâmicas das pás. Algumas das vantagens de se fazer a rotação parcial das turbinas são: menos estresse mecânico nas pás e no atuador, e ainda a diminuição das cargas mecânicas nas pás. Esse método de controle através de rotação parcial das pás da turbina também apresenta desvantagens relacionadas à introdução de uma massa maior nas pontas da pá, dificuldade de manutenção, entre outras, que podem ser encontradas em Burton et al. (2011).

3.1.2 Controle a partir da energia cinética

O controle a partir da energia cinética consiste na reutilização da energia cinética contida na turbina quando ela está rotacionando. Quando a velocidade do vento aumenta, a velocidade de rotação da turbina aumenta e, assim, a energia cinética da turbina E_t aumenta de acordo com a equação 12, abaixo. A energia cinética armazenada na turbina por sua rotação é grande, pois as pás da turbina têm massa com centenas de quilogramas.

$$E_t = \frac{1}{2} m_t v_r^2 \quad (12)$$

Sendo $m_t [kg]$ a massa da turbina e $v_r [m/s]$ a velocidade de rotação das pás, quando a velocidade do vento diminui, essa energia cinética é liberada no sistema em forma de potência.

A diminuição da potência gerada pelo aerogerador, causada pela diminuição na rotação da turbina, é compensada pela energia liberada no sistema.

3.2 CONTROLE COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os métodos de controle com armazenamento de energia, também conhecidos como ESS (do inglês, *Energy Storage System* ou Sistema de Armazenamento de Energia), consistem em um sistema de controle que faz a medição da potência gerada pelo aerogerador e utiliza a energia elétrica armazenada nos equipamentos para fazer uma suavização, ou compensação, da potência entregue ao sistema. Estes métodos não são adequados para fazer um controle da velocidade de rotação da turbina, portanto necessitam de outros métodos de proteção utilizados concomitantemente (como freios mecânicos ou controle pitch/stall). A energia elétrica armazenada é proveniente de diferentes fontes, entre elas: do excedente de geração do gerador eólico, de um sistema de geração distribuída ou da própria rede elétrica à qual o parque eólico está ligado. O sistema de controle precisa ser robusto e com tempo de reação rápido para que a potência de saída seja a mais suave possível.

Com o acréscimo do sistema de controle e do armazenamento de energia, o custo total do projeto aumenta consideravelmente, podendo tornar inviável o projeto final. As tecnologias de armazenamento estão sendo estudadas a mais de 100 anos e estão sendo aperfeiçoadas para aumentar a densidade de armazenamento, diminuindo o preço e tamanho do equipamento (através de estudos realizados pela engenharia de materiais). Nos próximos itens serão especificados diferentes tipos de equipamentos capazes de armazenar energia, além de suas vantagens e desvantagens e, abaixo, na tabela 1 adaptada de Díaz-Gonzalez et al. (2012), encontra-se uma relação entre os diversos tipos de sistemas de armazenamento de energia elétrica utilizados na geração eólica e seus parâmetros mais importantes.

TABELA 1 – COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

ESS	Custo	Capacidade (MWh)	Potência (MW)	Ciclos	Vida útil (anos)	Eficiência (%)	Descarga diária (%)
BESS*	R\$1822,5/kWh	0,4 - 244,8	0,05 - 34	2500	10 - 20	75 - 87	Não
SCCESS	R\$81000/kWh	0,01	0,05 - 0,25	$5 \times 10^5 - 10^6$	8 - 17	65 - 90	5 - 20
SMCESS	-	0,001 - 0,015	1 - 100	$10^4 - 10^5$	20	80 - 95	10 - 15
FCESS	R\$1620/kWh - R\$3240/kWh	0,0052 - 5	0,1-20	$10^5 - 10^7$	20	85	100

FONTE: O Autor (2019), adaptada de Díaz-Gonzalez et al. (2012).

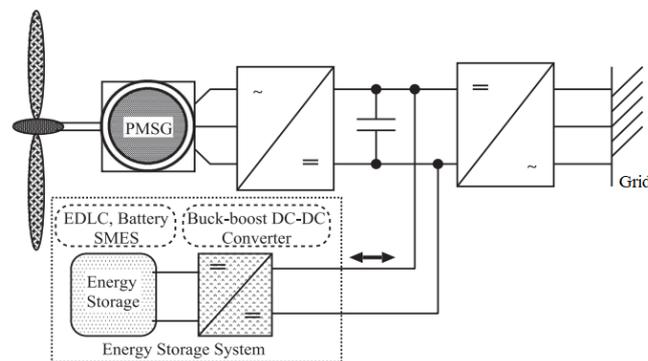
*BESS construído com baterias NaS (Sódio-enxofre).

3.2.1 Baterias

A tecnologia de armazenamento de energia elétrica a partir de baterias já vem sendo estudada a mais de 100 anos, e essa tecnologia está bem fundamentada no mercado. Por esses motivos, são os métodos de armazenamento mais utilizados tanto para a geração de energia quanto em formas mais comerciais como baterias de aparelhos eletrônicos. Existem muitos tipos de baterias, entre eles as que mais se destacam são as baterias de chumbo-ácido – baterias com tecnologia mais madura – e baterias de íon-lítio (com eficiência de até 95%), que possuem uma densidade de energia muito alta comparada com outros materiais. Estudos dos diferentes tipos e aplicações de baterias para a suavização da potência de saída intermitente de fontes renováveis podem ser encontrados em Beaudin et al. (2010); Barton, Infield (2014) e Díaz-Gonzalez et al. (2012).

Na competência de geração distribuída, mais especificamente a geração eólica, temos bancos de baterias ligados a um sistema de controle que faz a compensação da energia elétrica em casos de falta e também uma suavização da potência de saída de aerogeradores quando a velocidade do vento varia muito ou está abaixo da velocidade nominal para o funcionamento ótimo da turbina. De acordo com ESA (2019), existe, somente no Japão, mais de 190 parques eólicos que utilizam baterias de Sódio-Enxofre (NaS), sendo que o maior deles utiliza um banco de baterias com 34MW, 246 MWh, instalado para compensação e estabilização da energia gerada pelo parque eólico. O sistema (bateria e controle) é chamado de BESS, ou *Battery Energy Storage System* (do inglês, sistema de armazenamento de energia a partir de baterias). Esse sistema é ligado em paralelo com o parque eólico, como mostra a figura 11, para fazer o controle da potência do sistema de geração de energia elétrica a que ele está ligado através da injeção de potência ativa.

FIGURA 11 - SISTEMA BESS LIGADO A UM AEROGERADOR



FONTE: Howlader et al. (2013)

A figura 11 mostra como o sistema BESS injeta e absorve potência do aerogerador. Na figura, são mostrados alguns inversores de potência necessários para o funcionamento do sistema. Os inversores fornecem em suas saídas tensões com frequência fixa e ainda com corrente de saída controlada. Como a energia é armazenada na bateria em CC, a potência do aerogerador precisa passar por um conversor CA-CC para que seja somada a potência fornecida pela bateria. Essa soma de potências é depois convertida em CA (por um inversor) para atender a rede elétrica. O controle da potência de saída do BESS é normalmente feito por dispositivos como o STATCOM, que é discutido no apêndice A. Esses dispositivos são utilizados para controlar a tensão e potência da rede elétrica a qual eles estão acoplados.

Para fazer um bom controle da potência entregue à rede, a capacidade das baterias precisa estar adequada ao tamanho do sistema de geração. A geração eólica trabalha com valores altos de potência, portanto é necessário um banco de baterias para se fazer o controle, aumentando significativamente o custo final.

As baterias possuem tempo de resposta baixo, porém existem métodos de armazenamento com tempo de carga e descarga muito superiores. As baterias se destacam pelo tempo de armazenamento: os eletrodos perdem elétrons e descarregam com uma taxa baixíssima, o que torna esse método ótimo para casos em que a suavização da potência aconteça durante longo tempo sem carregamento do banco de baterias ou que haja uma falha em alguma linha de transmissão da rede elétrica.

3.2.2 Ultracapacitores

Ultracapacitores, também conhecidos como supercapacitores, possuem tecnologia e funcionamento análogo ao de baterias, no qual células eletroquímicas com eletrodos condutores são separadas por uma fina membrana que deixa o fluxo de íons passar de um lado para o outro. Diferentemente das baterias, em supercapacitores não ocorre reações redox, pelo fato de trabalhar com tensões de operação muito baixas, aumentando o tempo de vida do equipamento. O sistema de armazenamento de energia através de supercapacitores é chamado SCESS, do inglês, *Supercapacitor Energy Storage System*.

Para se atingir os valores de tensão necessários para um sistema de geração de energia eólica, são necessários muitos capacitores em série ou paralelo, de acordo com Abbott, Pickard (2012), o que causa um aumento considerável no custo final do sistema de geração. O fluxo de energia elétrica é rápido, carrega e descarrega rapidamente – portanto, tem utilidade de compensação mais pontual que as baterias – e o tempo de armazenamento da energia no

supercapacitor é curto, se comparado às baterias. Um estudo comparativo entre baterias e supercapacitores pode ser encontrado em Rafik et al. (2007).

3.2.3 Supercondutor

A tecnologia SMESS (do inglês, *Superconducting Magnetic Energy Storage*) consiste no armazenamento de energia em um campo magnético criado pela corrente contínua que passa por uma bobina supercondutora resfriada a temperaturas criogênicas ($T=4,2K$). A necessidade de resfriamento diminui a eficiência do sistema, mas a energia necessária para diminuir a temperatura é menor que a potência liberada pelo SMESS, portanto o gasto de energia para resfriar o sistema é compensado pelo próprio sistema.

É uma tecnologia recente e com pouco desenvolvimento prático, por isso esses equipamentos possuem preços muito elevados, dificultando projetos para geração. A desvantagem de pouco tempo de armazenamento e carga do SMESS é superada pela velocidade de descarga da energia elétrica na rede e pelo ciclo de vida, que pode chegar aos milhares de ciclos de recarga (correspondente a décadas de uso).

Aplicações do sistema SMESS na geração a partir de fontes renováveis podem ser observadas em Molinas, Nielsen (2010) e Kinjo et al. (2006). A figura 11 explicita a ligação do SMESS ao sistema de geração de energia elétrica.

3.2.4 Flywheel

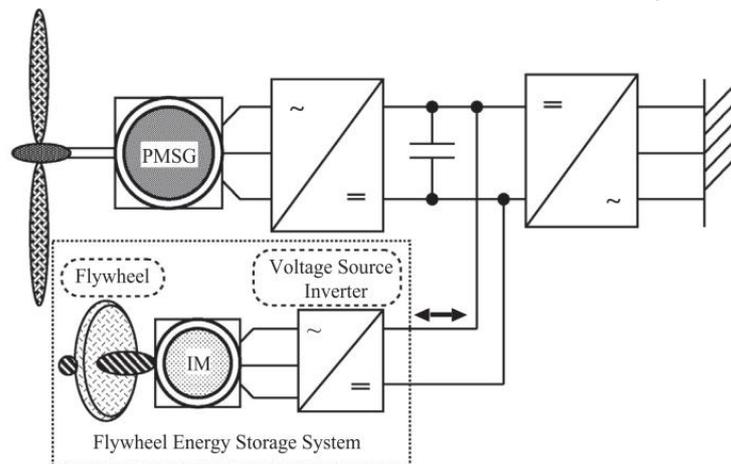
O sistema FESS (do inglês, *Flywheel Energy Storage System*) consiste em uma máquina eletromecânica que armazena energia cinética. Quando a potência gerada pelo aerogerador é maior que a potência base, ela é injetada no FESS e um peso começa a girar (ligado a dois rolamentos magnéticos, para diminuir a fricção) e a armazenar energia cinética. Todo o sistema é colocado dentro de um compartimento a vácuo para diminuir o gradiente do vento e o arrasto, melhorando a eficiência da máquina. A energia cinética é proporcional ao quadrado da velocidade de rotação do peso e é liberada quando a potência gerada pela turbina é menor que a nominal. Por ser um sistema mecânico, o tempo de armazenamento de energia é baixo, sendo toda a energia armazenada no FESS descarregada em poucas horas. A energia total armazenada no sistema FESS ΔE é dada pela equação 13:

$$\Delta E = \frac{J(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)}{2} \quad (13)$$

Onde ω_{max}^2 equivale a máxima velocidade de operação do *flywheel*, ω_{min}^2 equivale a mínima velocidade de operação e J é o momento de inércia do sistema. Alguns exemplos de controle de sistemas FESS são mostrados por Boukettaya et al. (2010) e a aplicação de FESS na geração de energia elétrica através de fontes renováveis e de suavização da potência gerada por aerogeradores podem ser observados em Mercado, Suvire (2010).

A figura 12, a seguir, mostra o acoplamento do FESS ao sistema de geração para a compensação de potência entregue à rede.

FIGURA 12 - FESS LIGADO AO SISTEMA DE GERAÇÃO



FONTE: Howlader et al. (2013)

4 METODOLOGIA

Este trabalho foi dividido em duas partes principais: estudo das estratégias de controle da potência de saída de aerogeradores e simulações computacionais com intuito de comparar os dois tipos de método de controle. Estes métodos de controle são: o método *pitch* (sem armazenamento de energia) e o método baseado no uso de sistemas de armazenamento de energia e baterias. Primeiramente, foi feita uma revisão bibliográfica sobre os diferentes tipos de controle da potência e como é o funcionamento de aerogeradores. Em seguida, foi realizado um estudo sobre a implementação tanto do sistema elétrico quanto dos métodos de controle no *software* escolhido para o projeto. A partir disso, foi testado o modelo de sistema elétrico de potência escolhido, com intuito de garantir seu funcionamento pleno.

Após confirmado o funcionamento do modelo, foram feitas as simulações computacionais necessárias para a comparação entre as diferentes formas de regulação de potência, e foram efetuadas as comparações entre os métodos escolhidos, através dos gráficos da potência ativa entregue pela turbina e pela tensão de linha nas barras do sistema elétrico. Também como forma de comparação, foi medida a máxima variação de tensão e potência (em pu) nas simulações computacionais, para que além de uma comparação visual, fosse realizada uma comparação numérica dos resultados.

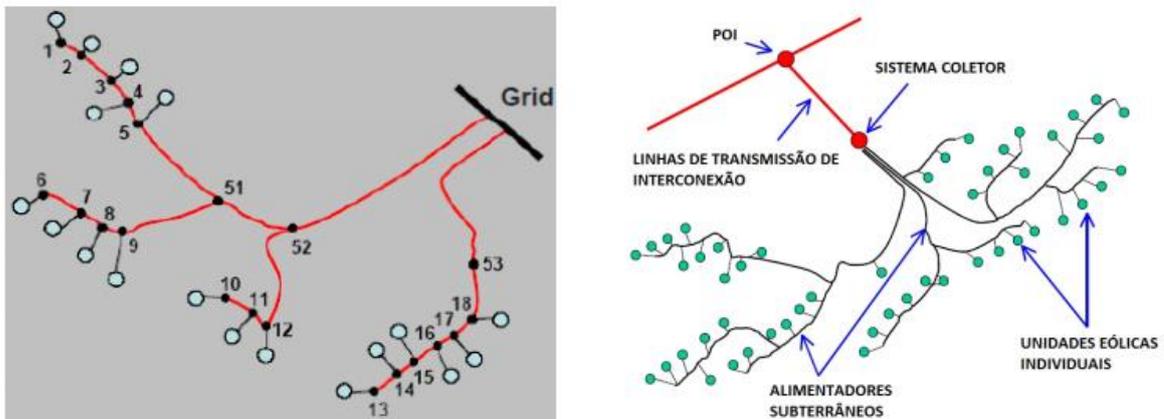
4.1 SISTEMA TESTE E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A partir do estudo das estratégias, foi compreendido que o método *pitch control* seria um bom representante dos sistemas de controle sem armazenamento de energia. Para a simulação computacional sem armazenamento de energia, foi utilizado o bloco de parque eólico do MATLAB/Simulink que já possuía um controle de *pitch* acoplado à turbina. Para o controle com armazenamento de energia, foi escolhido o método que utiliza BESS, pelo maior uso no mercado de geração e maior avanço nas tecnologias. Para o método de controle BESS, foi necessário construir o modelo equivalente do sistema de baterias.

Nas simulações computacionais, foi utilizado o software MATLAB/Simulink, mais especificamente a biblioteca *simscape* do Simulink, pelo fato dela abranger os dispositivos FACTS e toda a parte de distribuição e geração de energia elétrica. Foram feitas 3 simulações computacionais para comparação: sem nenhum tipo de controle, com o controle *pitch*, e com o controle *pitch* e controle BESS acoplados ao aerogerador.

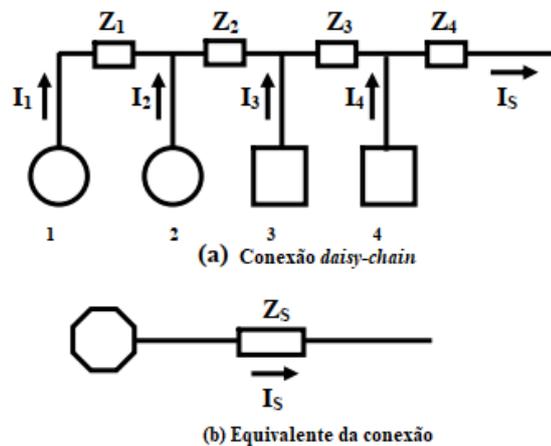
Para a realização das simulações, foi escolhido um modelo equivalente de parque eólico ligado à rede elétrica. Normalmente, os parques eólicos são representados por uma topologia *string* ou *daisy chain*, apresentada na figura 13. Essa conexão corresponde a múltiplas turbinas eólicas (ligadas em paralelo) que formam um grupo gerador. Grupos geradores são ligados em paralelo (através de alimentadores subterrâneos) a um sistema coletor e conectados à rede elétrica por linhas de transmissão. Em Mujaldi et al. (2008), encontra-se a modelagem do modelo equivalente da conexão *daisy chain*, representado na figura 14. Através da bibliografia, foi escolhido o modelo utilizado por Sohn (2014), indicado na figura 15. Nesse modelo, é perceptível o bloco do parque eólico – já simbolizado pelo modelo equivalente da conexão *string* –, as linhas de transmissão e um barramento infinito que representa a rede elétrica. Os dados de linha do modelo escolhido podem ser observados na tabela 2.

FIGURA 13 – MODELOS DE CONEXÃO *STRING* OU *DAISY-CHAIN*



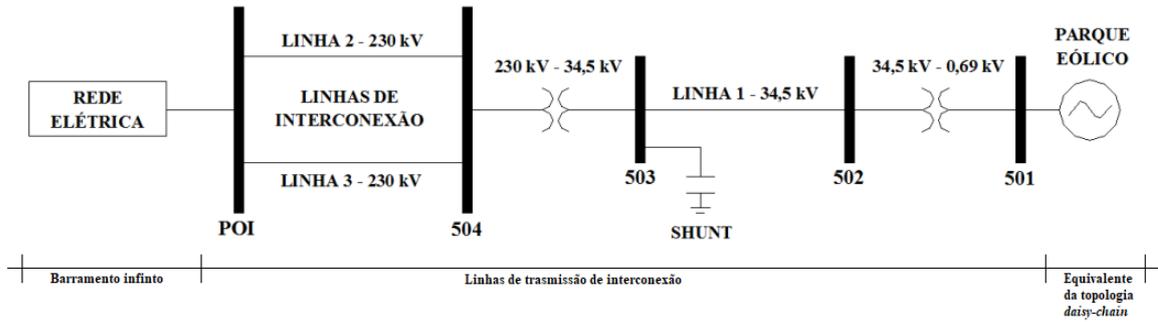
FONTE: Sohn (2014).

FIGURA 14 – EQUIVALENTE DA CONEXÃO *DAISY-CHAIN*



FONTE: Mujaldi et al. (2008).

FIGURA 15 - DIAGRAMA UNIFILAR UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES



FONTE: Sohn (2014)

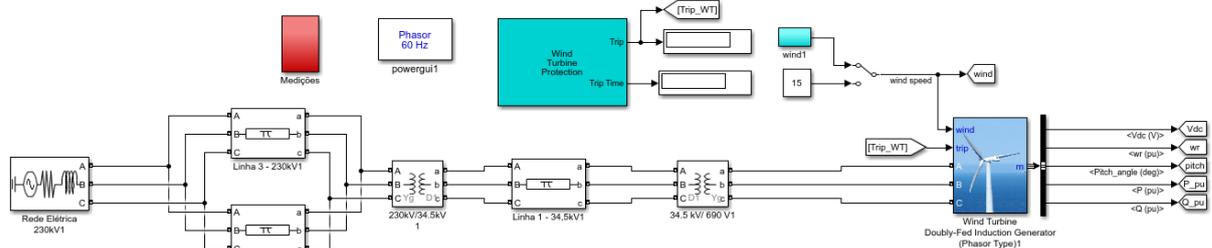
TABELA 2 – DADOS DE LINHA

Barra de	Barra para	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Shunt total (pu)	Tap trafo
501	502	0	0,05	0	0
502	503	0,015	0,025	0,01	0
503	504	0	0,1	0	0
504	POI	0,02	0,25	0,05	0
504	POI	0,02	0,25	0,05	0

FONTE: O Autor (2019), adaptada de Sohn (2014)

A partir do diagrama unifilar, foi montado o modelo da conexão do parque eólico à rede elétrica no MATLAB/Simulink. Este modelo pode ser observado na figura 16.

FIGURA 16 - MODELO DO DIAGRAMA UNIFILAR NO SIMULINK



FONTE: O Autor (2019)

O aerogerador utilizado no modelo do diagrama unifilar, acima, é um bloco que representa um parque eólico com 6 aerogeradores – de 1,5 MW e com gerador de indução duplamente alimentado – que atinge 9 MW quando a velocidade do vento está acima de 12 m/s. A velocidade de rotação da turbina se mantém em 1,2 pu quando a velocidade do vento incidente na turbina se encontra em 12 m/s ou mais, fazendo com o aerogerador gere sua potência nominal de 9 MW. A tabela 3 mostra os dados do aerogerador utilizado nas simulações computacionais.

TABELA 3 – PARÂMETROS DO PARQUE EÓLICO

Potência (MW)	9
Tensão (Vrms)	690
Frequência (Hz)	60
Reatância do estator (pu)	0,00706
Indutância do estator (pu)	0,171
Reatância do rotor (pu)	0,005
Indutância do rotor (pu)	0,156
Indutância magnetizadora (pu)	2,9

FONTE: O Autor (2019)

O bloco *Wind Turbine Protection* é o bloco de proteção da turbina. Ele desacopla a turbina do sistema quando um de seus parâmetros é infringido (por exemplo, quando a velocidade de rotação da turbina passa da nominal, o que poderia causar danos mecânicos à turbina). O quadro 1 mostra os parâmetros que são considerados pelo sistema de proteção da turbina.

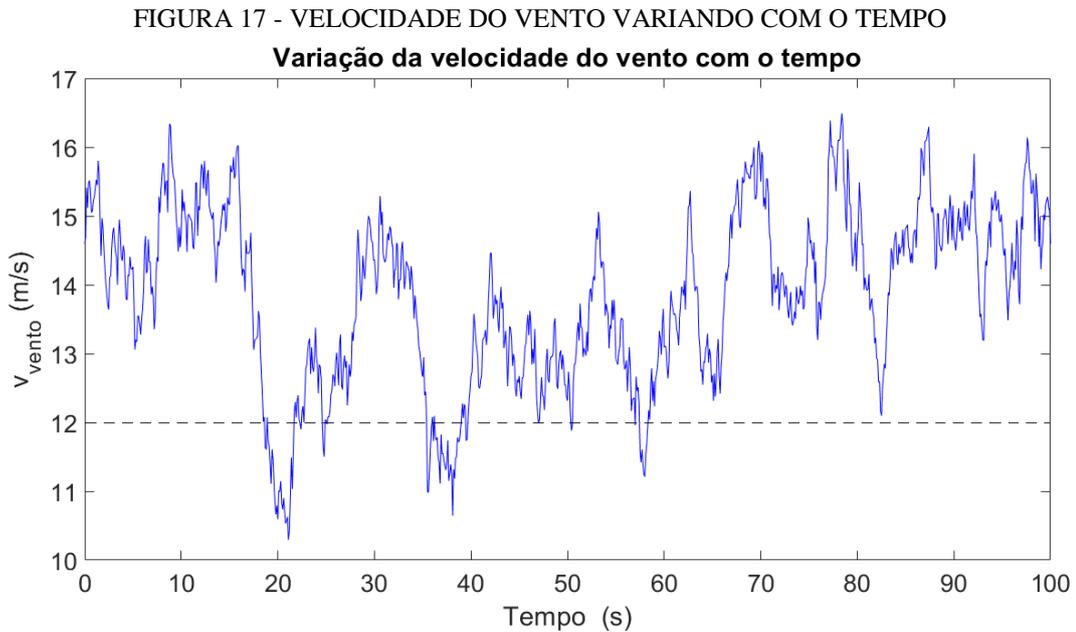
QUADRO 1 – PARÂMETROS DE PROTEÇÃO DA TURBINA

Parâmetros de proteção da turbina
Sobre corrente CA instantânea
Sobre corrente CA (sequencia positiva)
Desequilíbrio de corrente CA
Sob tensão CA (sequencia positiva)
Sobre tensão CA (sequencia positiva)
Desequilíbrio de tensão CA (sequencia negativa)
Desequilíbrio de tensão CA (sequencia zero)
Sobre tensão CC
Sob velocidade de rotação
Sobre velocidade de rotação

FONTE: O Autor (2019).

O bloco *wind* (conforme mostra figura 16) cria um sinal que simula a variação da velocidade do vento durante um período de tempo, que, no caso das simulações computacionais, é de 100 s. Na figura 17, encontra-se o gráfico da velocidade do vento utilizada nas simulações. A velocidade do vento sofre uma variação na faixa de 10 m/s até 17 m/s para que todas as possibilidades de controle sejam observadas (valores acima e abaixo da velocidade nominal

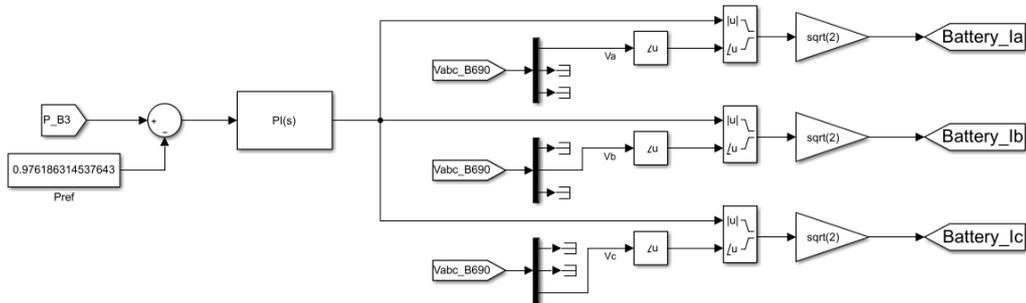
para a turbina). No gráfico também se encontra representada a velocidade do vento nominal para a turbina gerar sua potência nominal de 9 MW (12 m/s).



Após feitas as simulações sem o controle *pitch* e com o controle *pitch*, foi simulado o método de controle que utiliza equipamento de armazenamento de energia elétrica. Para simular o BESS, foi utilizado um controlador PI que faz o controle da potência gerada pela turbina e a mantém na potência nominal. O controlador recebe um sinal de potência comparada à referência. O sinal de saída do PI é o sinal de controle que irá ajustar a corrente de cada fase da saída do sistema de baterias, após a conversão de corrente contínua para alternada. Depois desses passos, o sinal é mandado para um sistema de baterias. O sistema de baterias foi representado de maneira simplificada por uma fonte de corrente controlada (que gera um sinal de corrente a partir do sinal de controle recebido), sendo que ela é controlada de modo a garantir a regulação de potência desejada. Os mecanismos de eletrônica de potência envolvidos (como os inversores e malhas de acionamento deles) não foram modelados. Através desse controle, foram tirados os dados para comparação. A figura 18 demonstra o sistema de controle da bateria, nela é possível observar que a potência entregue à rede pela turbina (P_{B3}) junto com a potência de referência (P_{ref}) são enviadas ao bloco de controle PI. Depois, o sinal de potência gerado pelo controlador é somado com as fases das tensões de linha do aerogerador (V_{abc_B690}) e multiplicados por $\sqrt{2}$ ($sqrt(2)$) para gerar os sinais de corrente ($Battery_Ia$, $Battery_Ib$ e $Battery_Ic$), que serão mandados para as baterias.

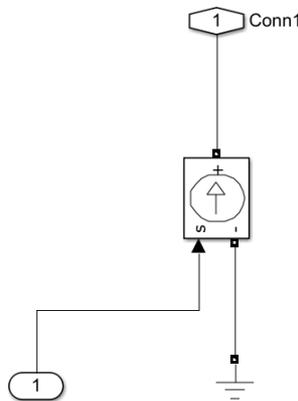
A figura 19 mostra o bloco da bateria que recebe o sinal de corrente do controlador (pela porta S do bloco), sendo que foi utilizado 1 bloco de bateria para cada fase, e a figura 20 mostra um diagrama de blocos explicitando o controle do sistema de baterias.

FIGURA 18 - SISTEMA DE CONTROLE DA BATERIA



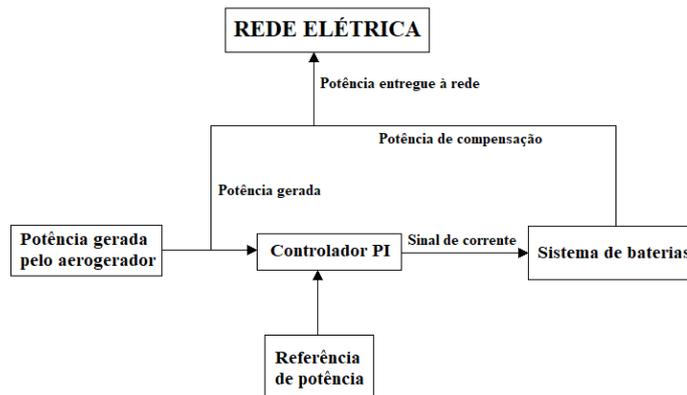
FONTE: O Autor (2019)

FIGURA 19 - BLOCO QUE REPRESENTA A BATERIA



FONTE: O Autor (2019)

FIGURA 20 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLE DAS BATERIAS



FONTE: O Autor (2019)

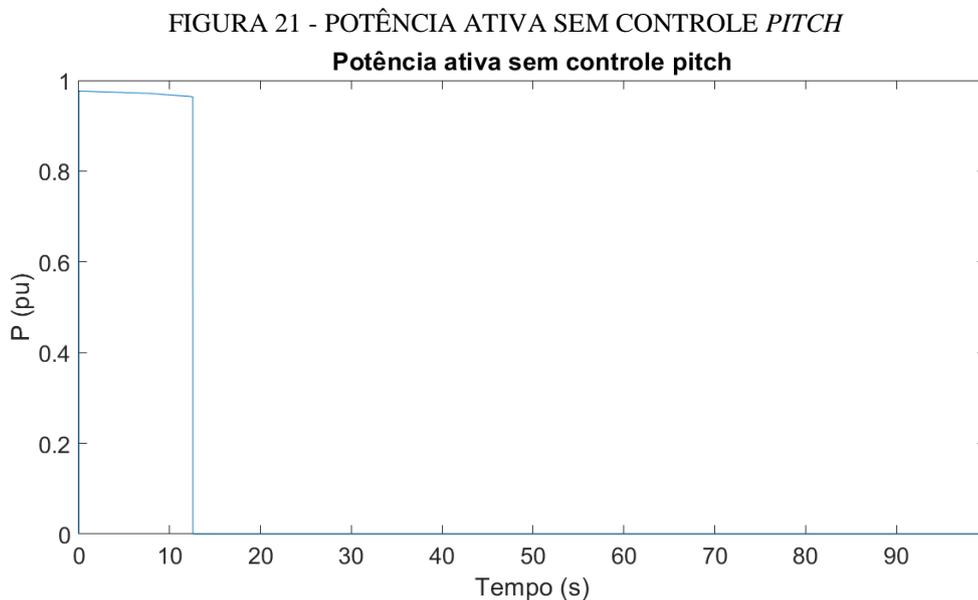
5 RESULTADOS E ANÁLISES

Nos itens a seguir, são relatadas as simulações computacionais e os resultados obtidos a partir delas. Esse capítulo foi separado para melhor compreensão das informações acerca das simulações e para que o acesso a essas informações seja facilitado.

Todas as simulações utilizaram o mesmo modelo de diagrama unifilar, o mesmo vento incidente e os mesmos blocos do *Simulink*.

5.1 SEM CONTROLE PITCH

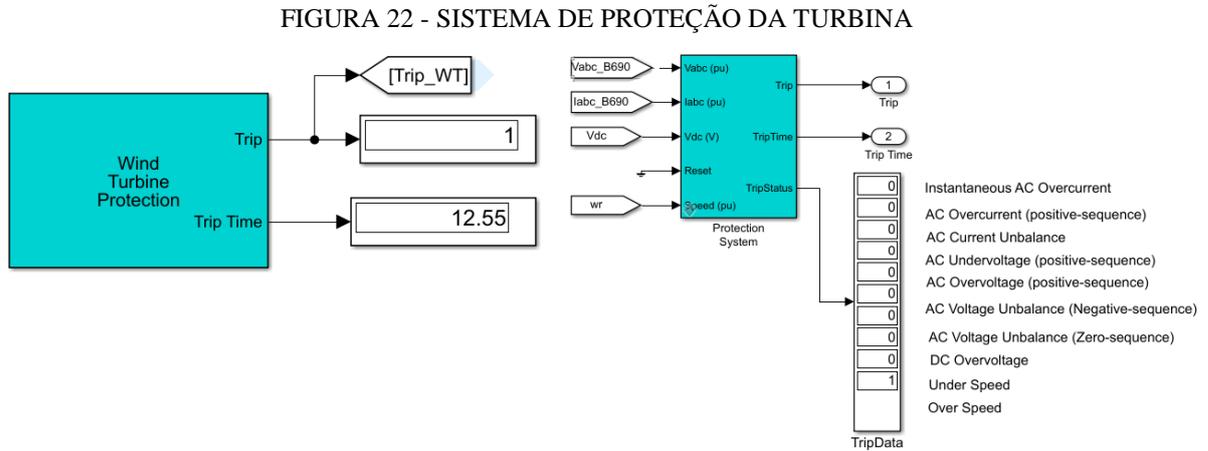
A primeira simulação realizada foi a da turbina eólica funcionando sem o controle *pitch* atuando sobre ela. A figura 21 mostra a potência ativa que o aerogerador produz para a velocidade do vento incidente sobre ela (figura 17).



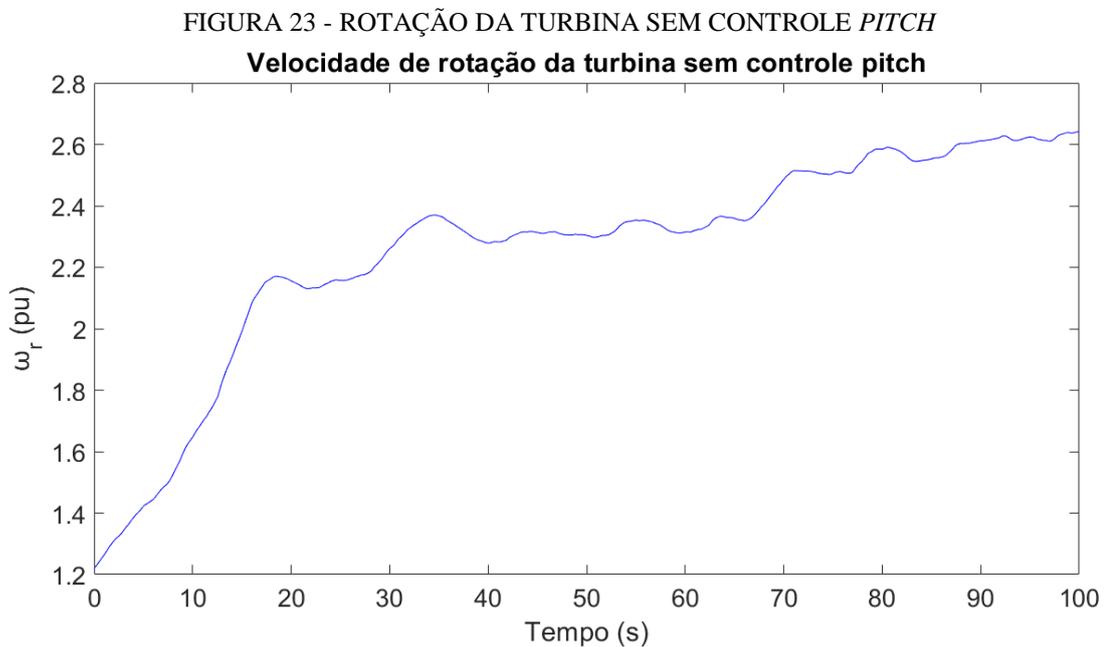
FONTE: O Autor (2019)

Nessa figura, é possível perceber que a potência ativa gerada pela turbina cai a zero em aproximadamente 12 s, o que mostra que a turbina foi desacoplada do sistema pelo seu sistema de proteção. A causa desse desacoplamento foi que a velocidade de rotação da turbina estava em um valor acima do valor nominal projetado para ela, ou seja, a turbina foi desconectada como uma forma de proteção contra danos mecânicos. As figuras 22 e 23 mostram o sistema de segurança da turbina (comprovando o desacoplamento em 12,55 s por velocidade de rotação acima da nominal) e também comprovam que a velocidade de rotação da

turbina estava acima dos 1,2 pu projetados para seu funcionamento pleno (em 12,55 s a velocidade de rotação da turbina ultrapassava os 1,5 pu).



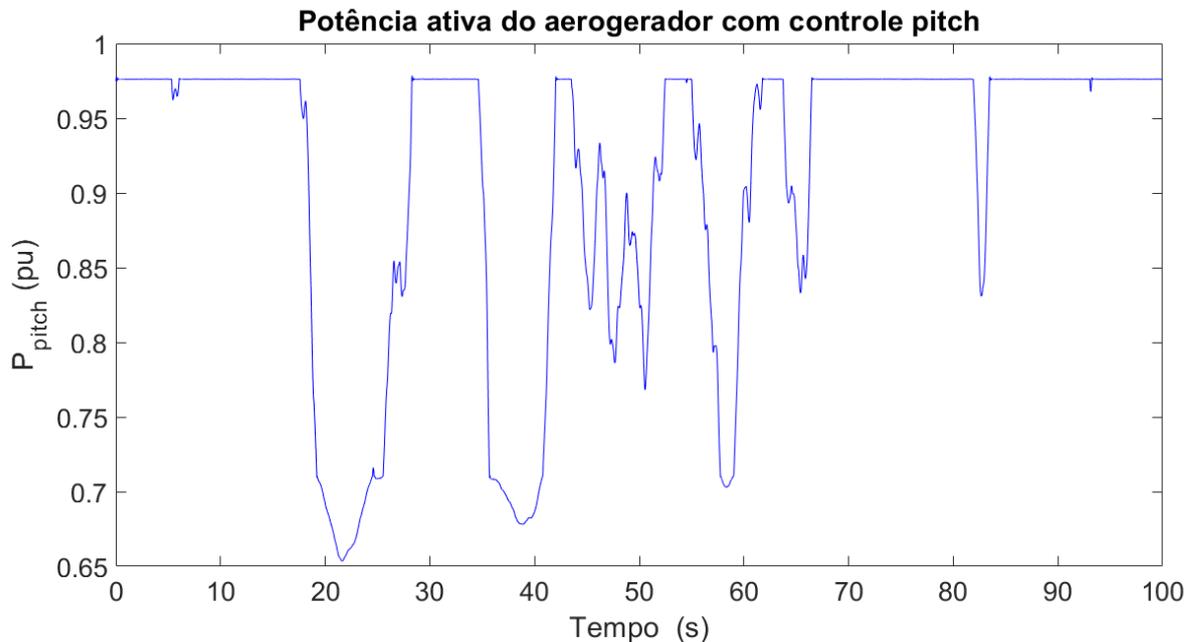
FONTE: O Autor (2019)



FONTE: O Autor (2019)

5.2 COM CONTROLE PITCH

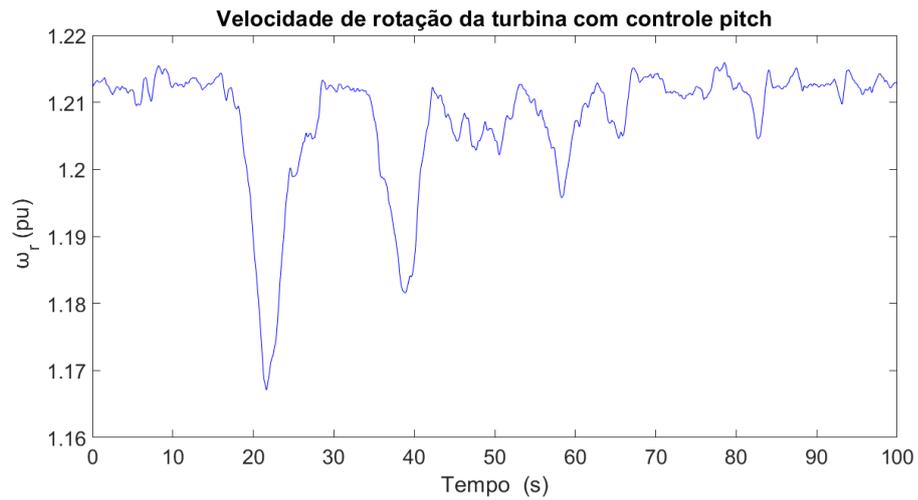
A segunda simulação foi do controle *pitch* atuando na turbina para o vento incidente (figura 17). A figura 24 mostra a potência ativa da turbina quando o controle *pitch* atua nela, como forma de controle da potência e da velocidade de rotação.

FIGURA 24 - POTÊNCIA ATIVA NA TURBINA COM CONTROLE *PITCH*

FONTE: O Autor (2019)

Nessa figura, é interessante observar que o controle *pitch* não consegue manter a potência de saída do aerogerador em seu valor nominal quando a velocidade do vento cai a valores muito abaixo de 12 m/s. Porém, o controle *pitch* serve como uma forma de proteção da turbina para quando os valores de velocidade do vento estão muito altos e variando constantemente. Esse controle mantém a velocidade de rotação da turbina perto dos seus valores nominais, para que ela não seja desacoplada do sistema elétrico, como mostra a figura 25. Tem-se, então, que o controle *pitch* é suficiente como forma de proteção da turbina para valores de velocidade do vento incidente que variam muito com o tempo, mas não é suficiente para compensar a potência gerada pelo aerogerador quando a velocidade do vento está menor ou muito próxima à nominal.

FIGURA 25 - VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DA TURBINA NO CONTROLE *PITCH*

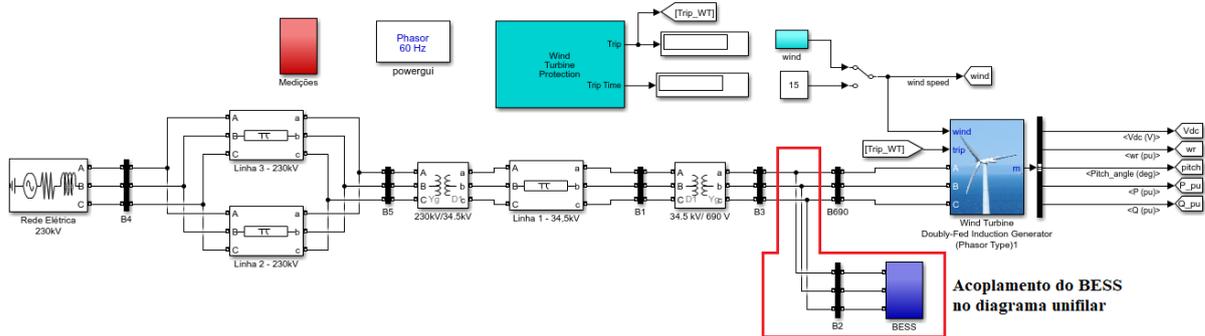


FONTE: O Autor (2019)

5.3 COM CONTROLE PITCH E BESS

A terceira simulação foi a do controle com armazenamento de energia (BESS), como demonstrado na figura 26. Nela, foi montado o modelo do sistema de baterias e simulado nas mesmas condições anteriores de vento (figura 17). A figura 27, abaixo, mostra a potência ativa entregue pelo gerador eólico acoplado de um sistema de controle BESS.

FIGURA 26 - DIAGRAMA UNIFILAR DA SIMULAÇÃO COM BESS



FONTE: O Autor (2019)

FIGURA 27 - POTÊNCIA ATIVA COM CONTROLE BESS



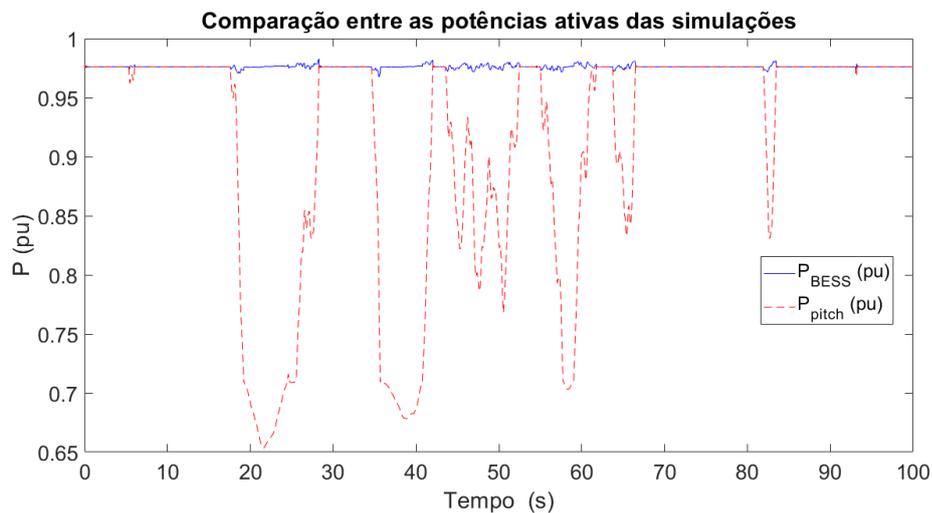
FONTE: O Autor (2019)

Nessa figura, pode-se perceber que a potência entregue para a rede elétrica varia muito pouco (aproximadamente 0,02 pu).

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE CONTROLE

Como comparação, a figura 28 mostra a potência de saída do aerogerador nas simulações computacionais com controle *pitch* e com controle BESS. A partir dessa figura, é perceptível que o controle com armazenamento de energia é suficiente para suavizar a potência gerada no sistema e é claramente visível a diferença entre as potências entregues durante estas simulações. Pode-se inferir que o controle BESS é superior entre os tipos simulados, apesar de não fazer o controle da velocidade de rotação da turbina.

FIGURA 28 - COMPARAÇÃO ENTRE AS POTÊNCIAS DAS SIMULAÇÕES

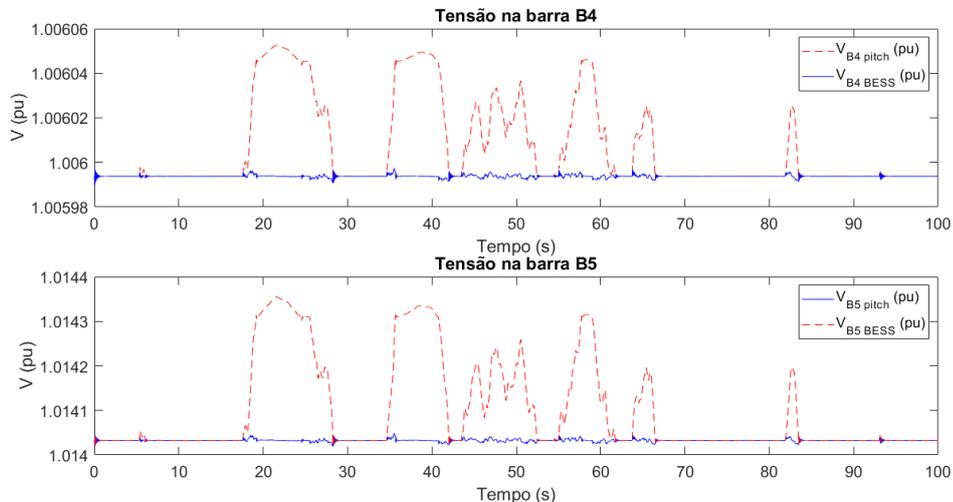


FONTE: O Autor (2019)

De acordo com a simulação envolvendo o BESS, foram necessários 3 MW para fazer a compensação da potência entregue ao sistema. Com os dados fornecidos por IRENA (2015), temos que o custo de 1 MW de armazenamento de energia elétrica através de baterias chumbo-ácido é de 1 milhão de dólares. Para o sistema simulado, tem-se o custo de \$3.000.000,00 ou aproximadamente R\$12.150.000,00, o que comprova o custo de aplicação dessa tecnologia como sendo bem alto, as vezes impossibilitando o projeto de ser efetuado.

A figura 29 mostra as tensões nas barras B4 e B5 (do modelo mostrado na figura 23), medidas durante as simulações computacionais do controle *pitch* e controle BESS. Nessas figuras, há uma melhoria na tensão entregue nas barras, com uma variação de tensão muito menor entre o controle *pitch* e o controle com armazenamento de energia.

FIGURA 29 - TENSÕES NAS BARRAS B4 E B5 (CONTROLE *PITCH*)



FONTE: O Autor (2019)

Ainda, como método comparativo, a tabela 4, abaixo, mostra a variação máxima entre as tensões de linha (nas barras B4 e B5) e a potência entregue ao sistema pelo aerogerador (potência na barra B3). Com a compensação do BESS, tem-se uma melhora significativa dos parâmetros de linha do sistema.

TABELA 4 - COMPARAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO MÁXIMA DAS TENSÕES DE BARRA

Controle	Varição da tensão na barra B4 (pu)	Varição da tensão na barra B5 (pu)	Varição da potência na barra B3 (pu)
<i>pitch</i>	6,2418E-05	3,3534E-04	0,3253
BESS	7,4216E-06	3,0519E-05	0,0154

FONTE: O Autor (2019)

6 CONCLUSÃO

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivos o estudo de diferentes estratégias de controle da potência de saída de aerogeradores, pelo fato dessa potência ser intermitente, e ainda simular alguns desses métodos como forma de comparação, a fim de destacar suas vantagens e desvantagens.

Na questão do estudo dos métodos de controle, foi percebido logo no começo que existem numerosas estratégias, cada uma com uma finalidade diferente no controle da potência entregue pela turbina. As estratégias sem o armazenamento de energia podem ser representadas pelo controle *pitch*, que atua na turbina de forma ativa e muda seus parâmetros geométricos para fazer o controle da potência e da velocidade de rotação da turbina. As estratégias de controle que utilizam armazenamento de energia são análogas no sentido que um sistema de controle, acoplado a um sistema de armazenamento de energia elétrica, comanda o equipamento para injetar ou armazenar energia do aerogerador e, assim, fazer a compensação de potência entregue à rede elétrica. O método BESS foi escolhido como representante desses métodos de controle por ser o mais utilizado na prática e o que possui mais estudos na área tecnológica.

As simulações realizadas no MATLAB trouxeram resultados muito satisfatórios para se fazer a comparação entre os diferentes tipos de controle. A primeira simulação (sem nenhum controle aplicado) mostra que a turbina necessita de mecanismos que regulem os valores dos parâmetros relacionados a ela (tensão, corrente, velocidade de rotação) para evitar que ela sofra danos mecânicos e ainda que a rede elétrica sofra com uma entrega de energia ruim. Para que a turbina fique dentro das normas exigidas por lei, ela precisa de um sistema de controle que atue de forma eficiente, além de um sistema de frenagem para evitar danos estruturais e até perda de vida de pessoas que estejam próximas ao aerogerador.

A segunda simulação (controle *pitch*) trouxe resultados esperados acerca dos métodos de controle sem armazenamento de energia. O controle *pitch* é uma forma de controle eficiente e confiável, porém, fora de seu campo de controle, não é suficiente para os problemas envolvidos na geração de energia elétrica através da força do vento. Esse controle faz uma regulação da velocidade de rotação da turbina quando a velocidade do vento está em seu valor nominal ou muito acima do nominal, ou seja, esse controle mantém – de forma eficiente – a velocidade de rotação da turbina em seu valor nominal, impedindo que ela sofra danos mecânicos. Já nos casos em que a velocidade do vento incidente nas pás do aerogerador é menor que o valor projetado para a turbina, o controle *pitch* não atua ou atua de forma precária. Nesses

casos, a potência entregue pelo gerador eólico é ruim e intermitente, o que pode fazer com que a turbina seja desconectada da rede elétrica.

A terceira e última simulação (controle *pitch* junto com BESS) mostra que um sistema de controle com armazenamento de energia é muito superior, na compensação de potência, que o controle sem armazenamento de energia. Os resultados dessa simulação exibem melhoras significativas na potência entregue pelo aerogerador, além de uma melhora nos parâmetros da rede, como tensão e corrente. Esse método de controle resolve os problemas que os métodos sem armazenamento de energia não conseguem resolver, porém impõe novos problemas, como é o caso do custo maior de manutenção e do sistema de geração. Cada banco de baterias agrega um custo muito grande ao sistema e, para o caso de parques eólicos muito grandes, esse preço pode inviabilizar o projeto todo. Além disso, o sistema de armazenamento de energia sozinho não é capaz de regular a velocidade de rotação da turbina, portanto necessita de um sistema de controle que faça também a frenagem das pás para evitar danos.

Em resumo, os aerogeradores necessitam de sistemas capazes de controlar seus parâmetros para que a energia entregue seja a de melhor qualidade possível. Dos casos estudados, destaca-se que um híbrido entre os sistemas com e sem armazenamento de energia se mostrava suficiente para fazer esse controle, com uma melhora significativa dos parâmetros de rede e da qualidade da energia entregue pela máquina. Esta área de pesquisa se comprova muito importante para a Engenharia Elétrica, em especial a geração a partir de fontes renováveis, e como estudos futuros recomenda-se aplicar outras formas de controle a outros tipos de geradores eólicos para abranger uma faixa maior do mercado de geração.

REFERÊNCIAS

DUTRA, R. Energia Eólica Princípios e Tecnologia. CRESESB. 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf>. Acesso em: 15 de maio de 2019.

SHEPHERD, D. G. “Historical Development of the Windmill”. In: Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, SPERA, S.A, (ed), 1 ed. 1994. New York, ASME Press, pp 1-46.

SEKTOROV, V. R., 1934, “The First Aerodynamic Three-Phase Electric Power Plant in Balaclava”, L’Elettrotecnica, 21(23-24), pp. 538-542; traduzido por Scientific Translation Service, NASA TT-F-14933, Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, pp. 13 apud SHEPHERD, 1994 Op. cit.

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: 14 de maio de 2019.

SILVA, S. R. et al. Análise da integração de usinas eólicas na rede elétrica. In: Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2003, Aracaju. p. 151-156.

Energia eólica chega à sétima posição no ranking mundial de geração abastecendo 10% do Brasil. ABEEólica. 2017. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/noticias/energia-eolica-chega-a-setima-posicao-no-ranking-mundial-de-geracao-abastecendo-10-do-brasil/>>. Acesso em: 23 de abril de 2019.

História da energia eólica e suas utilizações. PE DESENVOLVIMENTO. 2009. Disponível em: <<https://pedesenvolvimento.com/2009/07/15/historia-da-energia-eolica-e-suas-utilizacoes/>> Acesso em: 15 de maio de 2019.

Números ABEEólica. ABEEólica. 2019. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/02/N%C3%BAmeros-ABEE%C3%B3lica-02.2019.pdf>>. Acesso em: 23 de abril de 2019.

COELHO, P. Energia eólica e aerogeradores. 2013. Disponível em: <<https://www.engquimicasantosp.com.br/2013/12/energia-eolica-e-aerogeradores.html>>. Acesso em: 4 de junho de 2019.

STROSKI, P. N. Turbina Darrieus. 2019. Disponível em: <<http://www.electricalibrary.com/2019/03/12/turbinas-darrieus/>>. Acesso em: 4 de junho de 2019

Tipos de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica. CRESESB. 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=231>. Acesso em: 4 de junho de 2019.

RESENDE, C. Fontes de Energia Alternativa: Energia Eólica. Shareenergy. 2018. Disponível em: <<http://shareenergy.com.br/fontes-de-energia-alternativa-energia-eolica/>>. Acesso em: 23 de abril de 2019.

REIS, P. Como funciona um aerogerador. Portal Energia. 2016. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/funcionamento-de-um-aerogerador/>>. Acesso em: 15 de maio de 2019.

Sodium Sulfur (NaS) Batteries. Energy Storage Association – ESA. 2019. Disponível em: <<http://energystorage.org/energy-storage/technologies/sodium-sulfur-nas-batteries>>. Acesso em: 23 de maio de 2019.

International Renewable Energy Agency – IRENA. Case Study: Battery Storage. Disponível em: <https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_battery_storage_case_studies_2015.pdf>. Acesso em: 23 de maio de 2019.

LOPES, M. T. Inovação curricular no ensino superior. Revista e-curriculum, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 45-70, 2011. Disponível em: <<http://revistas.pucsp.br/index.php/curriculum/article/view/6852/4966>>. Acesso em: 8 set. 2017.

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.

MULJADI, E., et al. “Method of equivalencing for a large wind power plant with multiple turbine representation”. National Renewable Energy Laboratory, julho de 2008.

HOWLADER, Abdul Motin, et al. "A Review of Output Power Smoothing Methods for Wind Energy Conversion Systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26, outubro de 2013, p. 135–46.

QAIS, Mohammed H., et al. "Output Power Smoothing of Grid-Connected Permanent Magnet Synchronous Generator Driven Directly by Variable Speed Wind Turbine: a Review". *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no 3, 2017.

BEAUDIN, Marc, et al. "Energy Storage for Mitigating the Variability of Renewable Electricity Sources: An Updated Review". *Energy for Sustainable Development*, vol. 14, no 4, dezembro de 2010, p. 302–14.

BARTON, John P., INFIELD, David G. "Energy Storage and Its Use With Intermittent Renewable Energy". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no 2, junho de 2004, p. 441–48.

DÍAZ-GONZÁLEZ, Francisco, et al. "A Review of Energy Storage Technologies for Wind Power Applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no 4, maio de 2012, p. 2154–71.

PICKARD, William F; ABBOTT, Derek. "Addressing the Intermittency Challenge: Massive Energy Storage in a Sustainable Future [Scanning the Issue]". *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no 2, fevereiro de 2012, p. 317–21.

RAFIK, F; GUALOUS, H; GALLAY, R; CRAUSAZ, A; BERTHON, A. "Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling". *Journal of Power Sources*, vol. 165, 2007, p. 928–34.

NIELSEN, Knut E; MOLINAS, Marta. "Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) in power systems with renewable energy sources". (:unav), julho de 2010.

KINJO, T. et al. "Terminal-Voltage and Output-Power Regulation of Wind-Turbine Generator by Series and Parallel Compensation Using SMES". *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 153, no 3, 2006, p. 276.

BOUKETTAYA, Ghada, et al. "A Comparative Study of Three Different Sensorless Vector Control Strategies for a Flywheel Energy Storage System". *Energy*, vol. 35, no 1, janeiro de 2010, p. 132–39.

SUVIRE, G. O; MERCADO P. E. “DSTATCOM with Flywheel Energy Storage System for Wind Energy Applications: Control Design and Simulation”. *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no 3, março de 2010, p. 345–53.

BURTON, T; JENKINS, N; SHARPE, D; BOSSANYI, E. *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons, Ltd, 2ed. 2011.

SILVA, C. M. A Influência de Controladores FACTS na Estabilidade de Ângulo a Pequenas Perturbações de Sistemas Elétricos de Potência. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SILVA, A. L. Aplicação dos dispositivos FACTS na qualidade de Energia Elétrica. Anuário 2004, Faculdade Politécnica de Jundiaí, São Paulo, p. 177-185, 2004.

SANTOS, C. H. R. R. Influência do STATCOM na Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Engenharia Elétrica da UNIFEI, Itajubá.

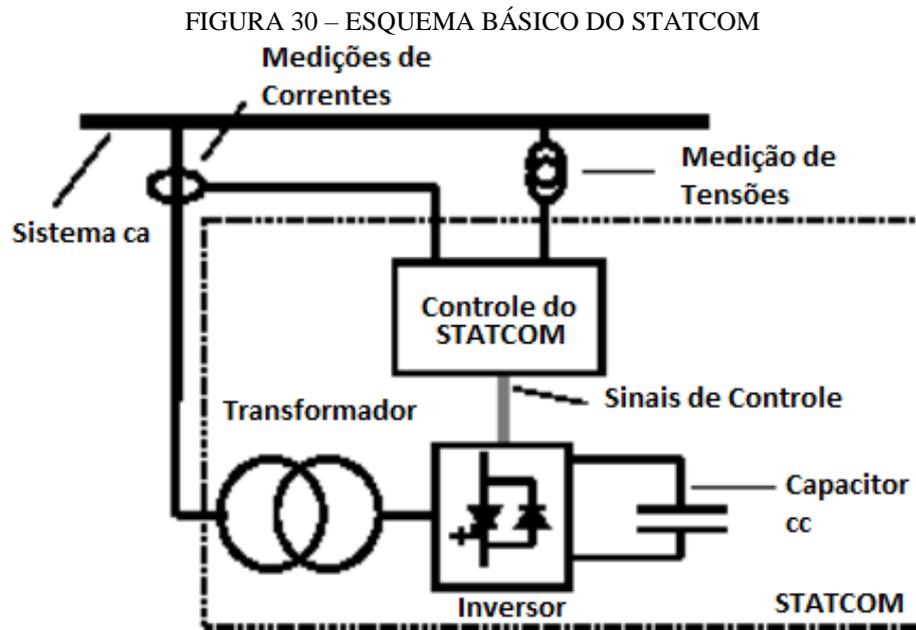
SCHAUDER, C; MEHTA, H. “Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators”. *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, vol. 140, nº 4, 1993, p. 299. *Crossref*, doi:10.1049/ip-c.1993.0044.

SHEN, C; YANG, Z; ATCITTY, S; CROW, M. “Control of STATCOM with energy storage device”. *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)*, vol. 4, IEEE, 2000, p. 2722–28. *Crossref*, doi:10.1109/PESW.2000.847313.

APÊNDICE 1 – STATCOM

O dispositivo STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) se enquadra nos conceitos de sistemas FACTS, é um equipamento de eletrônica de potência avançado que realiza a compensação de potência reativa. Os FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) controlam o fluxo de potência e as restrições de potência e transmissão relacionados à estabilidade. Seu objetivo é manter estável fluxos de ângulo de fase de carga, corrente ou tensão, impedância e fluxo de potência nos sistemas CA (Silva, 2005).

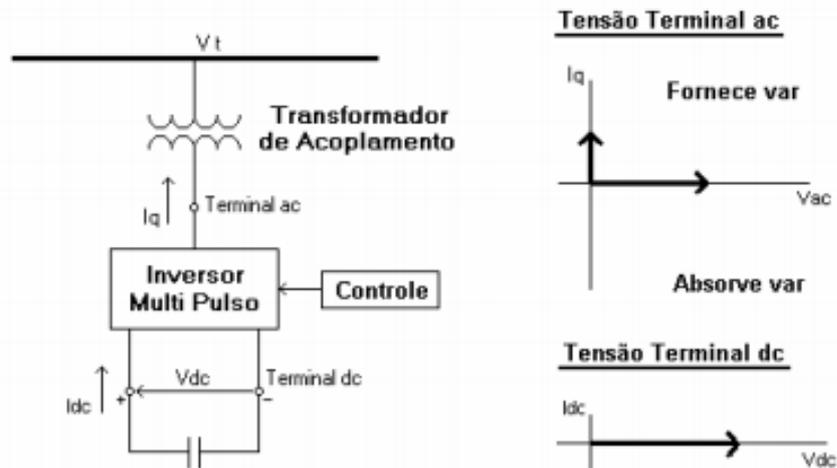
O STATCOM é formado, basicamente, por fontes de tensão CC, redução de harmônicos, inversores, sistema de controle, transformador de acoplamento e capacitor CC, conforme figura 30.



FONTE: Silva (2004), adaptada.

O princípio de funcionamento do STATCOM se baseia na tensão do capacitor CC em relação ao efeito da tensão de campo. No caso de um aumento da tensão do capacitor CC, o compensador fica sobexcitado e gera potência reativa; caso contrário, o compensador se encontra sobexcitado e absorve potência reativa do sistema. O próprio inversor presente no STATCOM é capaz de manter o nível de tensão nominal do capacitor e – para reposição de perdas dos elementos semicondutores – efetua o controle no ponto de conexão ao SEP, trazendo melhorias na estabilidade transitória e aumento na margem de estabilidade (Santos, 2003). O modelo para realizar tal controle está mostrado na figura 31.

FIGURA 31 - MODELO ESQUEMÁTICO STATCOM E MODOS DE OPERAÇÃO



FONTES: Santos (2013), adaptada.

A modelagem matemática de um STATCOM pode ser observada em Schauder, Mehta (1993), nesse modelo o compensador está programado para fazer o controle somente da potência reativa e da tensão da rede elétrica a qual ele foi acoplado. Em Shen et al. (2000), o autor faz uma modelagem do compensador síncrono para fazer o controle também da potência ativa da rede, podendo, assim, ser utilizado para controlar um banco de baterias para fazer a compensação da potência gerada por aerogeradores.