

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

WINÍCIUS LATRÔNICO TÔRRES

**ESTUDOS SOBRE FORMAS DE SUPORTE DE FREQUÊNCIA DE
SISTEMAS EÓLICOS EM RECURSOS ENERGÉTICOS
DISTRIBUÍDOS**

FLORIANÓPOLIS, 2022.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

WINÍCIUS LATRÔNICO TÔRRES

**ESTUDOS SOBRE FORMAS DE SUPORTE DE FREQUÊNCIA DE
SISTEMAS EÓLICOS EM RECURSOS ENERGÉTICOS
DISTRIBUÍDOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.

Orientador:
Prof. Everthon T. Sica, D. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Latrônico Tôrres, Winícius
Estudos Sobre Formas de Suporte de Frequência de Sistemas Eólicas em Recursos Energéticos Distribuídos / Winícius Latrônico Tôrres; orientação de Everthon Taghori Sica. - Florianópolis, SC, 2022.
47 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.
Inclui Referências.

1. Recursos Energéticos Distribuídos. 2. Energia Eólica. 3. Instabilidade. I. Taghori Sica, Everthon. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Estudos Sobre Formas de Suporte de Frequência de Sistemas Eólicas em Recursos Energéticos Distribuídos.

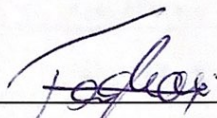
**ESTUDOS SOBRE FORMAS DE SUPORTE DE FREQUÊNCIA DE
SISTEMAS EÓLICOS EM RECURSOS ENERGÉTICOS
DISTRIBUÍDOS**

WINÍCIUS LATTRÔNICO TÔRRES

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 25 de Julho, 2022.

Banca Examinadora:



Prof. Everthon Taghori Sica, Dr. Eng



Prof. Anesio Felipe Zejtune, D. Eng.



Eng. Jonatan Reichert

RESUMO

O crescimento dos Recursos Energéticos Distribuídos fomentou preocupações sobre a operação desta forma de geração junto aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Esses recursos podem ser provenientes de fontes renováveis, como a energia eólica com a utilização de turbinas verticais. Entretanto, devido à variabilidade da fonte primária e às características não-despacháveis, a estabilidade do sistema pode ser prejudicada. O objeto de estudo deste trabalho é analisar o comportamento de aerogerador em ambientes de ventos baixos como os característicos em regiões do sistema de distribuição, sendo para tanto apresentado a modelagem de uma turbina Darrieus e as consequências elétricas e mecânicas de sua operação.

Palavras-chave: Recursos Energéticos Distribuídos, Energia Eólica, instabilidade.

ABSTRACT

The growth of Distributed Energy Resources has raised concerns about the operation of this form of generation along with the electric energy distribution systems. These resources can come from renewable sources, such as wind energy with the use of vertical turbines. However, due to primary source variability and non-dispatchable characteristics, system stability may be impaired. The object of study is to analyze the behavior of wind turbines in low wind environments such as those characteristic in regions of the distribution system, for which the modeling of a Darrieus turbine and the electrical and mechanical consequences of its operation are presented.

Keywords: Distributed Energy Resources, Wind Energy, instability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	Definição do Problema	7
1.2	Justificativa	7
1.3	Objetivos.....	8
1.3.1	Objetivo Geral	8
1.3.2	Objetivos Específicos	8
1.4	Metodologia de trabalho.....	8
1.5	Estrutura do trabalho.....	10
2.	ERRATA	11
	REFERÊNCIAS.....	12
	APÊNDICE A – Artigo completo	13
	APÊNDICE B – Comprovante de apresentação	23
	APÊNDICE C – Slides apresentados no congresso	27
	APÊNDICE D – Código e Simulação Utilizados.....	34
	APÊNDICE E – Perguntas e Respostas	42
	ANEXO A – Publicidade institucional de apresentação do congresso.....	44

1 INTRODUÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem o objetivo de consolidar os conhecimentos adquiridos durante o curso e desenvolver as competências e habilidades que constituem o perfil do egresso, sendo parte obrigatória da matriz curricular do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, do Instituto Federal de Ensino, Ciência e Tecnologia (IFSC), Câmpus Florianópolis.

As formas de TCC permitidas, conforme o Projeto Pedagógico do Curso (IFSC, 2018) e o Regulamento de TCC do Curso de Engenharia Elétrica do IFSC – Câmpus Florianópolis (IFSC, 2019) são as seguintes:

1. Apresentação de monografia;
2. Publicação e apresentação de artigo em evento nacional ou internacional pertinente e relevante à Engenharia Elétrica; ou
3. Publicação de artigo em periódico nacional ou internacional pertinente e relevante à Engenharia Elétrica.

Nesse sentido, este trabalho se enquadra na forma do item 2 - Publicação e apresentação de artigo em evento nacional ou internacional pertinente e relevante à Engenharia Elétrica.

Outrossim, ressalta-se o cumprimento dos requisitos obrigatórios descritos nos Regulamentos de TCC do IFSC Câmpus Florianópolis e do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, em especial, a saber:

- O acadêmico cursou e foi aprovado na unidade curricular de TCC-I no segundo semestre de 2019;
- O acadêmico em conjunto com seu orientador submeteu o artigo intitulado “Estudos Sobre Formas de Suporte de Frequência de Sistemas Eólicos em Recursos Energéticos Distribuídos” (Apêndice A) para o XXVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica;
- O aceite do artigo pelo congresso ocorreu no dia 01 de Julho de 2021, enquanto o acadêmico já havia finalizado TCC-I;

- O acadêmico apresentou o artigo no congresso no dia 18 de Maio de 2022 (Apêndice B) e o congresso é considerado pertinente e relevante à área de Engenharia Elétrica.

Portanto, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) atente a todos os requisitos exigidos nos regulamentos e diretrizes do IFSC – Câmpus Florianópolis e do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica para que possa ser realizada a defesa pública do trabalho.

1.1 Definição do Problema

Com a ascensão dos Recursos Energéticos Distribuídos (RED), tem-se uma crescente preocupação com a operação de sistemas energéticos, com preponderância de recursos energéticos primários renováveis. Dentre esses recursos renováveis a geração eólica possui uma contribuição importante na atual matriz energética brasileira considerada hidro-termo-eólica. A geração elioelétrica tem sua fonte primária com uma variabilidade intensa, acarretando uma preocupação com os impactos de variações bruscas na frequência do sistema, ou seja, o tempo de resposta e os impactos causados.

1.2 Justificativa

O crescimento dos Recursos Energéticos Distribuídos (RED) traz vantagens e desvantagens para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Algumas das desvantagens residem sobre o planejamento e a operação destes RED. “Na perspectiva do planejamento, a inserção dos RED implica em maior incerteza sobre a demanda de energia e a matriz de energia futura” (EPE, 2018).

Normalmente para a produção de energia elétrica, com a finalidade de controlar a frequência mantendo-se próximo a um valor de referência, utilizam reguladores de velocidade. Os geradores eólicos, inclusos nos REDs, tendem a impactar na regulação de frequência nos sistemas elétricos em que estão inseridos. Por possuir o vento como fonte energética primária, as variações dos parâmetros de geração (frequência, tensão, potência) podem ser abruptas, esta característica tende a prejudicar a estabilidade do sistema (ZHANG; MISHRA; SHAHIDEHPOUR, 2017).

Com o auxílio de estudos sobre os impactos e instabilidades de frequência em sistemas com RED, principalmente em sistemas com abundância em geração distribuídas, sobretudo constituídas de geradores eólicos, junto a rede de distribuição é possível prospectar soluções ou mecanismos de operação para amenizar possíveis consequências de uma alta densidade deste tipo de geração. Desse modo, este trabalho pretende contribuir, apresentando um modelo com simulação do comportamento de uma turbina Darrieu hipoteticamente instalada em uma rede de distribuição em zoneamento urbano. A simulação é implementada na plataforma *Simulink (Matlab)* por meio de aerogeradores acoplados no modelo da turbina Darrieu implementado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento eletromecânico de aerogeradores dotado de turbina Darrieu em Recursos Energéticos Distribuídos (RED).

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Simular configurações de aerogeradores voltados para a geração distribuída conectados diretamente a rede;
- b) Modelar e simular os esforços mecânicos sofridos por turbina Darrieu voltadas para a geração distribuída e verificar os impactos da turbina.

1.4 Metodologia de trabalho

O grande crescimento da geração distribuída, principalmente de aerogeradores, acarreta grandes preocupações e desafios na parte da regulação de frequência. Os aerogeradores que utilizam o vento como fonte primária, associados muitas vezes com novas tecnologias de produção e controle não-linear (inversores de frequência), e podem causar perturbações no sistema, como a perda de inercia. Métodos de suporte de frequência e regulação de tensão são capazes de amenizar essas

perturbações, quando muito severas. Logo um dos objetivos deste trabalho é apresentar esses efeitos em aerogeradores conectados em redes contendo REDs, através da modelagem e simulação.

A maioria das pesquisas se concentra na modificação do algoritmo de controle de turbina individual para analisar os recursos de controle de frequência primária das turbinas eólicas (AZIZ; THAN OO; STOJCEVSKI, 2018). A utilização de geradores de velocidade variável, conectados a rede através de inversores de frequência é grande. Pois, apesar desses não fornecerem nenhuma, ou mínima, resposta de inércia, a mesma pode ser obtida usando a técnica de controle baseada em inércia virtual sensível à frequência. O método é baseado em loops de controle suplementares focados em sensibilidade à frequência, como controle de inclinação e controles de inércia. As turbinas eólicas possuem uma quantidade significativa de energia cinética armazenada que pode ser imediatamente liberada em sua massa rotativa durante eventos de frequência (PRADHAN; BHENDE; SAMANTA, 2018).

Outros métodos de controle primário dos geradores elioeletricos são baseados no desempenho descarregado para aprimorar a resposta de frequência do gerador ou na implementação do controle de inclinação para estabilidade de frequência. O descarregamento através do controle de rotação acima da velocidade e controle de pitch, que não são comuns em aerogeradores voltados a geração distribuída. Ambos os métodos são baseados na ideia de atingir um ponto de trabalho não ótimo na curva torque-velocidade do rotor da turbina (AZIZ; THAN OO; STOJCEVSKI, 2018).

Por outro lado, existem controladores conservadores, manuais, não fornecendo uma resposta satisfatória no caso de um sistema não-linear considerável com parâmetros estocásticos. De outro lado, controladores robustos e dinâmicos envolvem estruturas de controle complexas que não são muito preferidas nas práticas industriais (AZIZ; THAN OO; STOJCEVSKI, 2018).

Outra variável que pode ser incluída no sistema de controle são mudanças repentinas na velocidade do vento, na forma de rajadas de vento e desaceleração. Isso suaviza as flutuações da energia eólica antes de entregar a energia elétrica na rede que, por sua vez, aprimorou a estabilidade da frequência no sistema de energia (PRASAD; PURWAR; KISHOR, 2019).

Além de todos os métodos de controle de frequência, deve-se considerar a turbina utilizada, sua capacidade instalada e a concentração de força em um único ponto, para poder definir se é necessária a utilização de algum outro método. Após análise dos modelos citados acima, é possível ser escolhido o que melhor se enquadra no problema, realizando com isso simulações com o aerogerador conectado à rede de distribuição e os cálculos sobre os esforços exercidos sobre a turbina através de uma modelagem com base em dados pré-estabelecidos.

A parte de modelagem é possível de ser realizada na plataforma *SIMULINK*, interna ao programa *MATLAB*. Para o modelo é utilizado como base alguns métodos técnicos encontrados durante a pesquisa exploratória.

1.5 Estrutura do trabalho

Na introdução, apresenta-se a fundamentação regulatória de enquadramento e os requisitos desta forma de TCC, assim como a definição do problema, a justificativa, os objetivos geral e específicos, a metodologia de trabalho e a errata referente ao artigo.

No Apêndice A é apresentado o artigo completo, sendo que os comprovantes da apresentação do artigo no congresso, tais como fotos e certificado de participação e apresentação, estão no Apêndice B. No Apêndice C têm-se os slides de apresentação do artigo no congresso. No Apêndice D têm-se o código utilizado para cálculos dos parâmetros e a simulação utilizada na plataforma *SIMULINK*. No Apêndice E têm-se as perguntas e respostas realizadas durante a apresentação do trabalho no XXVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica e por fim, no Anexo A tem-se a publicidade institucional de apresentação do congresso.

2. ERRATA

LATRÔNICO TÔRRES, W.; TAGHORI SICA, E. Estudos Sobre Formas de Suporte de Frequência de Sistemas Eólicos em Recursos Energéticos Distribuídos. **XXVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. 9 f. Maio 2022.

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
1	50	velocidade ventos	velocidade de ventos
2	100	A pá de aerogerador	A pá de um aerogerador
2	103	Suas vantagens principais	Suas principais vantagens
4	185	turbina Darrieu	turbina Darrieus
5	242	assim ao ocorrer	Assim, ao ocorrer
5	257	que é referente a 24h e discretizado de	a qual é referente a 24h e discretizada de
7	305	em há conversor	em que há conversor
7	307	uma variação maio; e	uma variação maior e

REFERÊNCIAS

AZIZ, A.; THAN OO, A. T.; STOJCEVSKI, A. Intelligent frequency regulation in the wind integrated control area. **Computers and Electrical Engineering**, v. 72, p. 324–347, 2018.

EPE. Recursos Energéticos Distribuídos 2050. **Nota Técnica PR 08/18**, Rio de Janeiro, Dezembro de 2018.

IFSC. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. **Projeto Pedagógico do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica**. Departamento Academico de Eletrotécnica, Câmpus Florianópolis. Florianópolis, 2018. Disponível em: www.ifsc.edu.br. 2022.

IFSC. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. **Regulamento de TCC do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica**. Departamento Academico de Eletrotécnica, Câmpus Florianópolis. Florianópolis, 2019. Disponível em: www.ifsc.edu.br. 2022.

PRADHAN, C.; BHENDE, C. N.; SAMANTA, A. K. Adaptive virtual inertia-based frequency regulation in wind power systems. **Renewable Energy**, v. 115, p. 558–574, 2018.

PRASAD, S.; PURWAR, S.; KISHOR, N. Non-linear sliding mode control for frequency regulation with variable-speed wind turbine systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 107, n. November 2018, p. 19–33, 2019.

ZHANG, S.; MISHRA, Y.; SHAHIDEHPOUR, M. Utilizing distributed energy resources to support frequency regulation services. **Applied Energy**, v. 206, n. May, p. 1484–1494, 2017.

APÊNDICE A – Artigo completo

GRUPO DE ESTUDO DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS - GRD

ESTUDOS SOBRE FORMAS DE SUPORTE DE FREQUÊNCIA DE SISTEMAS EÓLICOS EM RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS

WINÍCIUS LATRÔNICO TÔRRES;EVERTHON TAGHORI SICA
IFSC

RESUMO

O crescimento dos Recursos Energéticos Distribuídos fomentou preocupações sobre a operação desta forma de geração junto aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Esses recursos podem ser provenientes de fontes renováveis, como a energia eólica com a utilização de turbinas verticais. Entretanto, devido à variabilidade da fonte primária e às características não-despacháveis, a estabilidade do sistema pode ser prejudicada. O objeto de estudo deste artigo é analisar o comportamento de aerogerador em ambientes de ventos baixos como os característicos em regiões do sistema de distribuição, sendo para tanto apresentado a modelagem de uma turbina Darrieus e as consequências elétricas e mecânicas de sua operação

PALAVRAS-CHAVE

Recursos Energéticos Distribuídos, Energia Eólica, instabilidade.

1.0 - INTRODUÇÃO

O crescimento dos Recursos Energéticos Distribuídos (RED) promove novos desafios para o planejamento e a operação do sistema elétrico de potência. Os REDs são tecnologias de geração e armazenamento de energia elétrica, localizados dentro dos limites de uma determinada concessionária de distribuição, caracterizados usualmente por meio de fontes renováveis. Não obstante, os benefícios da diversificação da matriz energética, essas fontes quando não possuem a disponibilidade do recurso primário almejado podem causar alterações na injeção de potência e na frequência da rede elétrica. Dessa forma, a inserção em larga escala de REDs pode acarretar problemas na inércia do sistema elétrico de potência, em decorrência da intermitência ou da variabilidade da fonte energética primária.

A energia eólica é um recurso renovável aplicado sob diferentes arquiteturas em sistemas de aerogeradores, sendo que a máquina elétrica motriz pode ser assíncrona, assíncrona duplamente excitada ou síncrona e conectada diretamente na rede ou através de inversores/conversores de frequência. Em sistemas elétricos de potência com elevada densidade de geração eólica por arquiteturas com conversores/inversores existe uma grande preocupação com a consistência da inércia. A incapacidade de atenuar pequenas perturbações eletromecânicas, que têm reflexo na relação de tensão e frequência produzida por aerogeradores, tornou-se um desafio atual, pois os controladores possuem um tempo de resposta face as contingências ou intermitências, sendo que esta resposta nem sempre é realizada em um tempo satisfatório.

Nesse sentido, este artigo desenvolve um estudo sobre a inserção de aerogerador provido de um turbina Darrieus para baixas velocidades ventos. Este tipo de turbina tem uma utilização proeminente como RED em regiões urbanas e com possibilidade de conexão junto a rede de distribuição de energia elétrica. Para tanto, são apresentados a modelagem mecânica dessa turbina e a simulação do comportamento elétrico.

2.0 - RECURSOS ELIOELÉTRICOS DISTRIBUIDOS

2.1 - Recursos Energéticos Distribuídos

A matriz elétrica brasileira pode ser considerada um sistema hidro-térmico-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidroelétricas. Com o crescimento da demanda de energia elétrica pode-se idealizar um plano de expansão da matriz energética, priorizando as fontes renováveis advindas de REDs ou grandes parques geradores. O crescimento dos REDs será capaz de transformar profundamente os sistemas elétricos que atualmente são operados geralmente de forma centralizada, em sistemas mais distribuídos, alterando significativamente a complexidade.

Os REDs têm uma forte aderência com a Geração Distribuída (GD) que é uma opção de menor investimento para a geração, pois é caracterizada pela instalação de geradores de pequeno porte próximos aos centros de carga (1). Existem certas desvantagens na GD, como o aumento na complexidade de operação da rede, a dificuldade na cobrança pelo uso do sistema elétrico e a necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger suas redes (2). Os impactos da GD em uma rede de distribuição são proporcionais à sua penetração na matriz elétrica. Observa-se que mesmo penetrações de cerca de 5% podem, em condições de picos de geração em períodos de baixa carga, resultarem em problemas nas redes (1).

A opção por energia eólica, em sistemas distribuídos isolados, possibilita operar em modo independente, onde os pequenos aerogeradores fornecem energia em locais que não estão conectados à rede, seja por opção, geralmente econômica, ou necessidade como em regiões remotas que não são atendidas pela rede de distribuição de energia elétrica (3).

2.2 – Aproveitamento eólico em baixos ventos

O uso do vento como fonte para geração de energia elétrica, pode ser considerada uma fonte limpa e renovável, apresentando grande aceitação social. O aumento de geração eólica significa redução da emissão de gases do efeito estufa especialmente em locais de dominância por fontes energéticas primárias de origens fósseis.

O vento é a movimentação do ar provocada por desigualdades de pressão em diferentes regiões. As desigualdades de pressão são formadas pelo aquecimento diferenciado da atmosfera, criando forças que empurram massas de ar horizontalmente ou verticalmente, sendo a força horizontal a maior responsável pelo movimento. A energia presente no vento é a energia cinética do movimento do ar, contudo pode sofrer perturbações diante de obstáculos que atenuam a energia mecânica que incide sobre a turbina eólica em virtude da rugosidade e orografia do solo (4).

A extração da energia cinética do vento é realizada por turbinas projetadas para este fim, sendo classificadas em dois estilos: as de arraste e as de sustentação. Em que o vento incide sobre a pá com certa angulação, sendo forçado a mudar de direção, que pela segunda lei de Newton implica no surgimento de uma força de empuxo. Esta força de empuxo tem duas componentes, uma é a força de sustentação, que causa a sustentação aerodinâmica da pá. A outra componente é a força de arraste, que empurra a turbina de forma similar às turbinas de arraste. (4).

As turbinas eólicas podem ser construídas de duas maneiras, com eixo horizontal ou vertical. O eixo horizontal mantém as turbinas perpendiculares a direção do vento, capturando o máximo de energia, logo este estilo é mais utilizado em instalações de maior potência. As turbinas de eixo vertical não necessitam de mecanismos direcionais e tem a vantagem do gerador e da transmissão serem instalados no solo. Os principais exemplos deste tipo de turbina são as Darrieus e Savonius. As turbinas Darrieus são mais utilizadas do que as turbinas Savonius, pois “o rotor Darrieus se caracteriza pela sua elevada velocidade e eficiência” quando comparado a Savonius. A pá de aerogerador Darrieus é aproximadamente “duas vezes mais longa que a de um aerogerador de eixo horizontal com uma área varrida equivalente” (3).

Estes tipos de turbinas de eixo vertical têm grande atuação na geração distribuída. Suas vantagens principais são: tolerar bem a turbulência dos ventos e operar com ventos de qualquer direção. Estas características se tornam importantes, pois como atuarão em baixas alturas, entre 10 e 20m, há muita influência da rugosidade e dos obstáculos no seu entorno (3). Uma turbina real terá perdas aerodinâmicas na conversão de energia, implicando em redução do coeficiente de potência, que indica a porção de potência que foi realmente extraída do vento. Esse fator é alterado dependendo da velocidade do vento incidente nas pás da turbina. Com isso podemos escrever a equação que representa a potência de uma turbina (4):

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3$$

Em que:

P_t é a potência da turbina eólica [W];

C_p é o coeficiente de potência [adimensional];

ρ é a massa específica do ar [Kg/m³];

A é a área varrida pelo rotor da turbina [m²]; e

v é a velocidade do vento que incide na turbina eólica [m/s].

A potência extraída do vento pela turbina é transmitida ao eixo rotativo da mesma, acarretando geração de torque, equacionado por:

$$T_m = P_t / \omega_t$$

Em que:

T_m é o torque da turbina eólica [N.m/rad];

P_t é a potência da turbina eólica [W]; e
 ω_t é a velocidade angular da turbina [rad/s].

Outro parâmetro importante para turbinas eólicas é o *Tip Speed Ratio* (TSR), conhecido também por velocidade de ponta, este parâmetro é basicamente a razão da velocidade da turbina e a velocidade do vento, sendo assim adimensional, pode ser expresso conforme equação a seguir:

$$TSR = \omega_t R / v$$

Em que:

TSR é a velocidade de ponta da turbina [adimensional];

ω_t é a velocidade angular da turbina [rad/s];

R é o raio da turbina [m]; e

v é a velocidade do vento que incide na turbina eólica [m/s].

3.0 – MODELOS UTILIZADOS

A modelagem e a simulação do problema serão realizadas com base em uma Turbina Eólica Darrieus por meio do software *Matlab* e da ferramenta *Simulink*. Primeiramente, será efetuada a análise dos esforços mecânicos que a turbina sofre ao ficar exposta a sua fonte primária, após isso será realizada a simulação elétrica através de dois blocos nativos do *Simulink* que são capazes de mimetizar Turbinas Eólicas.

3.1 Turbina Eólica Darrieus

A turbina eólica Darrieus analisada tem o formato “H”, contendo 3 pás, com uma altura de 3 metros e diâmetro de 2,5 metros. O perfil da pá considerado será o NACA0018, conforme mostra Figura 1 - Pá da Turbina Darrieus.

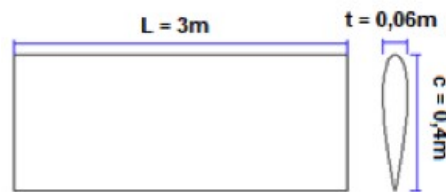


Figura 1 - Pá da Turbina Darrieus

Essas informações especificadas na Figura 1 servem para implementação dos esforços mecânicos sofridos pelas pás do aerogerador. Para a realização dos cálculos necessários para as simulações é necessário obter a curva de características da turbina, neste caso será utilizada a curva que relaciona o coeficiente de potência e a velocidade de ponta da turbina, conforme pode ser observada pela Figura 2. Os valores presentes nesta curva foram obtidos através de testes controlados em um túnel de vento.

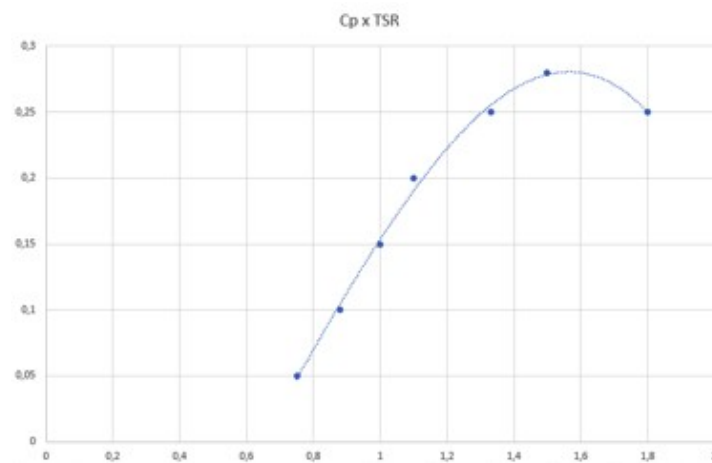


Figura 2 - Curva C_p versus TSR (5)

Analisando a Figura 2, pode-se usufruir dos valores de coeficiente de potência e com isso o TSR correspondente. Assim, por meio desses valores e da velocidade do vento é possível determinar a velocidade da turbina, conforme equação a seguir:

$$v_t = \text{TSR} \times v$$

Em que:

TSR é a velocidade de ponta da turbina [adimensional];

v_t é a velocidade da turbina [m/s]; e

v é a velocidade do vento que incide na turbina eólica [m/s].

Com a velocidade da turbina é possível calcular a força centrípeta exercida sobre pás da turbina, conforme equação a seguir:

$$F_{cf} = (\rho A L v_t^2)/R$$

Em que:

ρ é a densidade do material da pá [kg/m³];

A é a área do perfil da pá [m²];

L é a altura da pá [m];

R é o raio da turbina [m]; e

v_t é a velocidade da turbina [m/s].

Definida a força centrípeta incidente na pá da turbina, pode-se obter o carregamento total aplicado nela, conforme a equação a seguir:

$$w = \frac{F_{cf}}{L} = (\rho A v_t^2)/R$$

Em que:

F_{cf} é a força centrípeta exercida na pá [N]

ρ é a densidade do material da pá [kg/m³];

A é a área do perfil da pá [m²];

L é a altura da pá [m];

R é o raio da turbina [m]; e

v_t é a velocidade da turbina [m/s].

O diagrama de forças exercidas sobre uma pá da turbina Darrieu, Figura 3, indica os Pontos A e B que representam os locais de fixação da pá ao eixo da turbina, sendo estes sujeitos aos maiores esforços mecânicos. Por meio do diagrama é possível obter os momentos fletores e os efeitos cortantes que agem nos pontos A e B das pás, em função da velocidade do vento que incide na turbina.

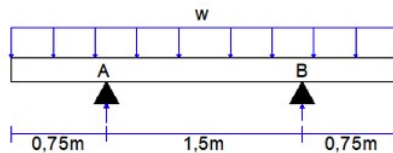


Figura 3 - Diagrama de Forças na pá da turbina

Deste modo, considerando, Figura 3, o somatório de forças e de momentos na pá é possível determinar o equacionamento para o momento fletor, conforme:

$$M = 9 \frac{\rho A v_t^2}{32 R}$$

Em que:

ρ é a densidade do material da pá [kg/m³];

A é a área do perfil da pá [m²];

R é o raio da turbina [m]; e

v_t é a velocidade da turbina [m/s].

Do mesmo modo, obtém-se o equacionamento para o efeito cortante, conforme:

$$V = 3 \frac{\rho A v_t^2}{4 R}$$

Em que:

ρ é a densidade do material da pá [kg/m³];

A é a área do perfil da pá [m²];

R é o raio da turbina [m]; e

v_t é a velocidade da turbina [m/s].

3.2 - Gerador Eólico Darrieus

A geração de energia através de geradores eólicos inseridos perto dos centros de cargas normalmente é realizado através de turbinas de eixo vertical, como a própria turbina Darrieus. Os geradores podem ser de indução, de indução duplamente excitado, entre outros. A simulação será realizada através do *Simulink* e terá como base estes dois tipos de geradores, sendo que serão implementadas individualmente.

A configuração simulada terá uma fonte emulando a tensão referente a rede em que o aerogerador está instalado, uma carga puramente resistiva com a potência proporcional a potência gerada do aerogerador. O dado de entrada fornecido ao aerogerador será um torque variante, calculado através de velocidades de vento reais durante o período de 24 horas, sendo que os valores utilizados foram discretizados por hora, e um C_p escolhido através da curva de características da turbina (0,2783).

O propósito é analisar a interferência do aerogerador na tensão da rede, averiguando a existência de alguma perturbação, por exemplo. Pela Figura 4, pode-se observar os modelos utilizados no *Simulink*.

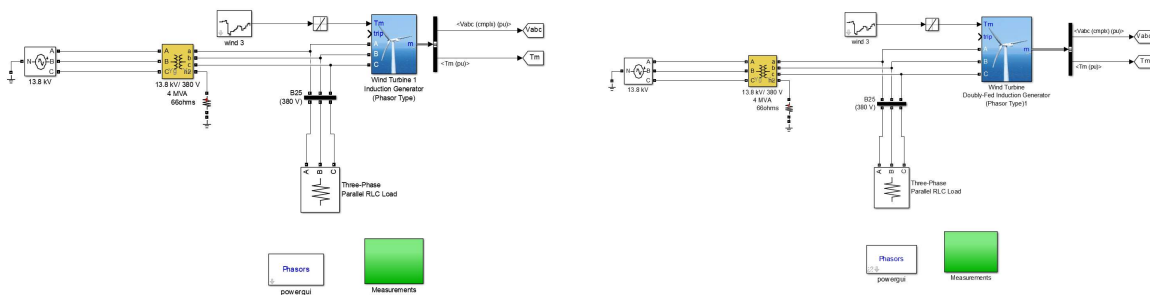


Figura 4 - Modelo para um (a) gerador de indução e para um (b) gerador de indução duplamente excitado

Ao observar a Figura 4, nota-se a utilização de uma fonte de 13,8kV, conectada ao aerogerador por um transformador trifásico de 13,8k/380V. A tensão de saída do aerogerador será de 380V e sua base de potência será de 3CV, pois trata-se de um aerogerador de pequeno porte. A carga resistiva ligada a rede será de 1kW. Em ambos os modelos esses valores permanecem.

3.3 – Suporte de Frequência

O aumento da inserção de geradores eólicos na rede de distribuição acarreta em grandes desafios para a regulação de frequência. A utilização de arquiteturas com inversores/conversores de frequência fornece uma tímida resposta à inércia, que pode ser obtida usando a técnica de controle baseada em inércia virtual sensível à frequência. Este método é baseado em *loops* de controle suplementares focados em sensibilidade à frequência, como controle de inclinação e controle de inércia, tais como os de energia cinética armazenada em sua massa rotativa durante eventos de frequência que pode ser imediatamente liberada (6). Outro método de controle é o primário, sendo baseado no desempenho descarregado para aprimorar a resposta de frequência do gerador ou na implementação do controle de inclinação para estabilidade de frequência. Ambos os métodos são pautados no princípio de manter a geração em um ponto de trabalho não-ótimo na curva torque-velocidade do rotor da turbina, assim ao ocorrer alguma infortúnio, o gerador terá uma margem para trabalhar evitando maiores perturbações (7).

Diante disso, observa-se que existem controladores conservadores que não fornecem uma resposta satisfatória no caso de um sistema não-linear considerando parâmetros estocásticos. Por outro lado, controladores robustos e dinâmicos envolvem estruturas de controle complexas que não são preferidas nas práticas industriais (7) em aerogeradores de pequeno porte.

O modelo tratado neste artigo não considera estes métodos de controle de frequência, pois trata-se de um único aerogerador conectado a uma carga juntamente com a rede de distribuição de energia elétrica. Com isso a frequência do aerogerador será definida pela própria rede elétrica e como este é de pequeno porte, projetado para a utilização em edificações para suprir pequenas cargas, não teria um impacto considerável na frequência da própria rede de energia elétrica.

4.0 - RESULTADOS

4.1 - Estudo Mecânico

Através de um *script* implementado no *Matlab* foi possível prever os esforços mecânicos nos pontos de apoio das pás da turbina em relação a velocidade do vento variável considerada, que é referente a 24h e discretizado de uma em uma hora. O material considerado para as pás é um compósito de fibras de vidro e matriz polimérica, com

uma densidade de $2,6 \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, sendo considerado um material leve e com boa resistência e a pá será oca com uma espessura de 3mm. Com o auxílio do programa *AutoCad* foi possível calcular a área do perfil da pá da turbina NACA0018, sendo correspondente a $0,00245\text{m}^2$.

O C_p considerado foi o de melhor rendimento, sendo aproximadamente 0,2783, sendo o TSR correspondente de 1,5. Com estas informações definidas é possível executar o *script* e analisar os resultados através dos gráficos gerados dos momentos fletores e dos efeitos cortantes atuantes nos pontos de apoio das pás da turbina, conforme apresentado na Figura 5 e na Figura 6.

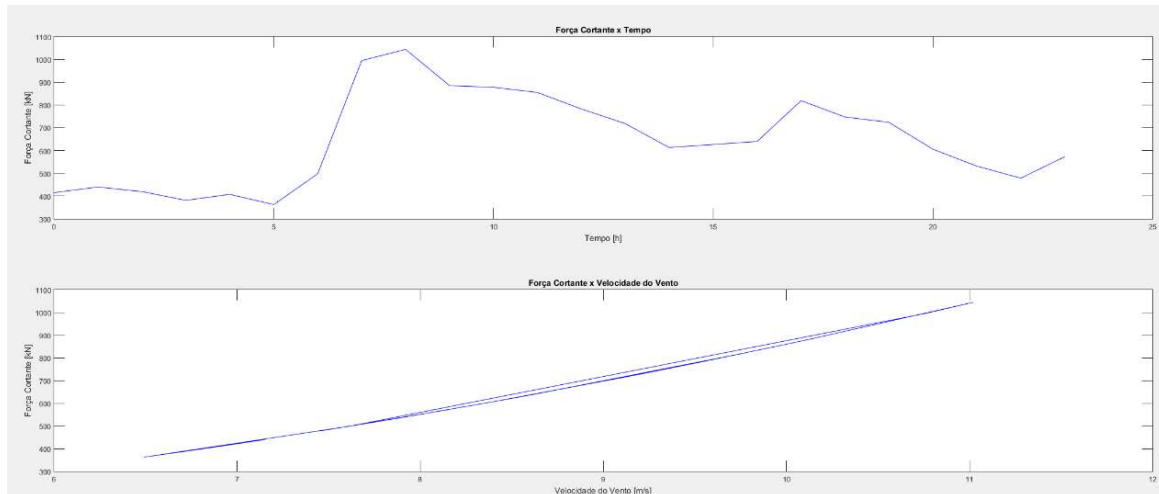


Figura 5 - Força Cortante

A Figura 5 apresenta o comportamento da força cortante frente ao tempo e a velocidade de vento que a turbina Darrieus está submetida.

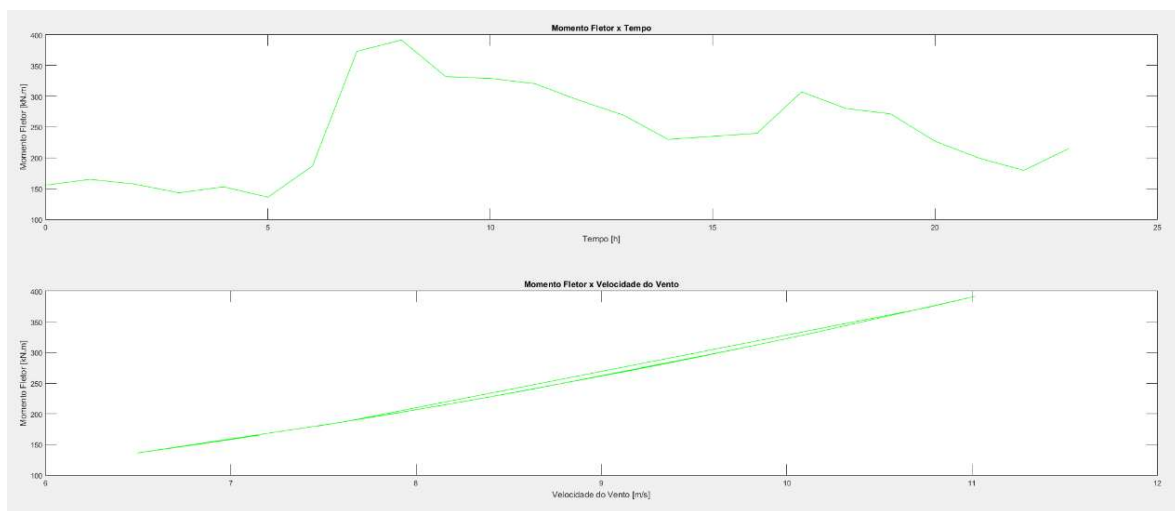


Figura 6 - Momento Fletor

Analisando a Figura 5 e a Figura 6, verifica-se que quanto maior a velocidade do vento maiores são os esforços exercidos nas pás da turbina, além de que, ao longo de um dia, a variação da velocidade do vento é consideravelmente aleatória, tornando esses esforços mecânicos desgastantes. Logo, os materiais e a estrutura utilizados devem conseguir suportar esses estresses.

4.2 - Estudo Elétrico

Após executar as simulações de ambos os modelos de arquiteturas de aerogeradores, Figura 4, considerando os mesmos parâmetros de C_p , de TSR e de velocidade do vento, obteve-se, conforme Figura 7, para o modelo com o gerador de indução, Figura 4-(a), o comportamento da tensão trifásica produzida e do torque mecânico na máquina elétrica.

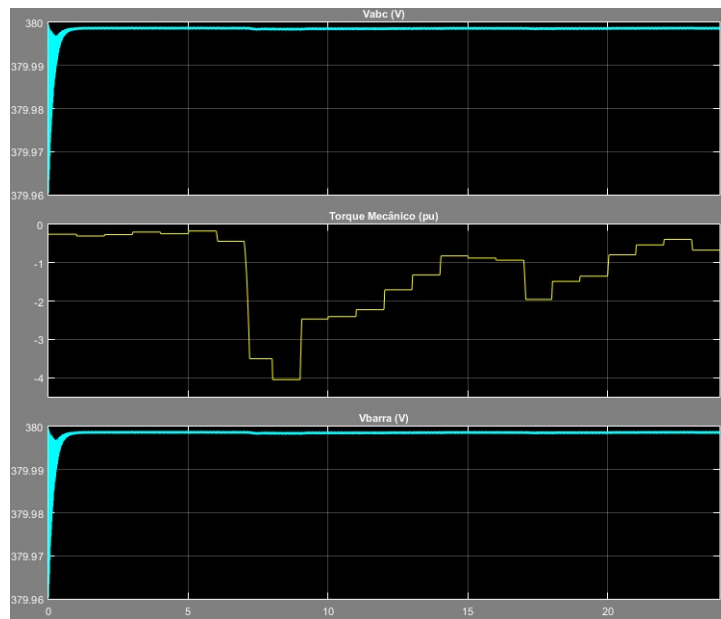


Figura 7 - Resultados para o gerador de indução

Analisando a Figura 7, verifica-se que praticamente não houve interferência do aerogerador na tensão fornecida pela rede, mas há uma perturbação transitória inicial e uma leve ondulação no módulo da mesma. A tensão nos terminais do aerogerador é idêntica a tensão nos terminais da carga. Em análise, a variação de torque aplicada na turbina em relação ao módulo de tensão de saída, não se verifica nenhuma correlação, neste pode-se atribuir ao fato de que como o gerador está conectado diretamente a rede, sem a utilização de conversores, a mesma está mantendo o módulo da tensão constante junto com a frequência e outros parâmetros.

Para o modelo com o gerador de indução duplamente excitado, Figura 4-(b), o comportamento da tensão trifásica produzida e do torque mecânico na máquina elétrica, são apresentados na Figura 8.

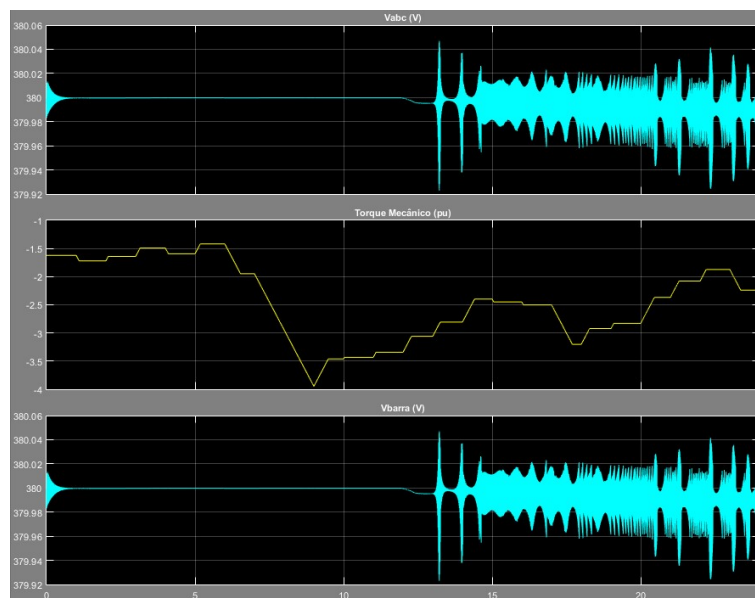


Figura 8 - Resultados gerador de indução duplamente excitado

Ao observar a Figura 8, nota-se resultados próximos com o gerador de indução, mas como este utiliza conversores CA/CC houve uma ondulação muito maior no módulo da tensão, ainda assim continua sendo uma variação de baixa escala. Verifica-se, também, que para este caso, em há conversor junto ao gerador, uma leve correlação entre a variação de torque e ondulações mais expressivas no módulo da tensão, a partir do ponto em que o torque teve uma variação maior; e as ondulações no módulo da tensão ficaram mais expressivas, também, mesmo continuando sendo de baixa escala. Este fenômeno pode estar relacionado em parte ao desacoplamento

do gerador a rede, devido ao conversor presente nesta arquitetura. Ainda assim, a própria rede mantém os parâmetros constantes.

5.0 - CONCLUSÃO

Com o aumento da inserção dos REDs, deve-se atentar para a operação destes sistemas, que são mais sensíveis a perturbações que sistemas de grande porte. Deve ser analisado o fato de que sistemas elétricos de potência, com inserção de REDs e com a elevada percentual de geração frente a capacidade instalada do sistema, necessitam de controle mais apurado, pois analisando os resultados das simulações, a primeira vista, observa-se que as distorções causadas não são de grande porte, mas ressalta-se que aerogeradores para REDs tem uma potência nominal reduzida, por este motivo uma única unidade presente em um sistema ligado diretamente a rede não trará muita interferência, somente oferecendo uma leve ondulação no módulo da tensão. Contudo, caso a inserção destes aerogeradores aumente ou estiverem concentradas em pontos de conexão muito próximos eletricamente, podem ocorrer distorções muito maiores, sendo assim, deve-se ter a preocupação maior com o controle desses sistemas quando a densidade destes aerogeradores for elevada.

A elevada variabilidade da fonte de energia primária dos aerogeradores causa mais impactos mecanicamente do que eletricamente, pois do ponto de vista elétrico há a própria rede de energia para atenuar grandes oscilações “arrastando” o aerogerador à manter a frequência constante, enquanto do ponto de vista mecânico há um maior esforço direto com essa variabilidade, podendo causar desgastes preocupantes com o tempo, logo a escolha dos materiais é de suma importância para estes aerogeradores. Outrossim, deve-se considerar que o material de fabricação das pás tem que ser leve para uma melhor geração, mas também tem que ser resistente para suportar a variabilidade da velocidade do vento.

6.0 REFERÊNCIAS

- (1) EPE. Recursos Energéticos Distribuídos. **Estudos de Longo Prazo**, Rio de Janeiro, Janeiro de 2019.
- (2) ANEEL. Micro e Minigeração Distribuída, Sistemade de Compensação de Energia Elétrica. **Cadernos Temáticos ANEEL**, Brasília, Maio de 2016.
- (3) TOLMASQUIM, Mauricio T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar e Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.
- (4) CUSTÓDIO, Ronnaldo Dos S. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Elétrabras, 2009.
- (5) BRAVO, R.; TULLIS, S.; ZIADA, S Performance Testing of a Small Vertical-Axis Wind Turbine. **Mechanical Engineering Department, McMaster University**, Janeiro de 2015.
- (6) PRADHAN, C.; BHENDE, C. N.; SAMANTA, A. K. Adaptive virtual inertia-based frequency regulation in wind power systems. **Renewable Energy**, v. 115, p. 558–574, 2018.
- (7) AZIZ, A.; THAN OO, A. T.; STOJCEVSKI, A. Intelligent frequency regulation in the wind integrated control area. **Computers and Electrical Engineering**, v. 72, p. 324–347, 2018.

DADOS BIOGRÁFICOS

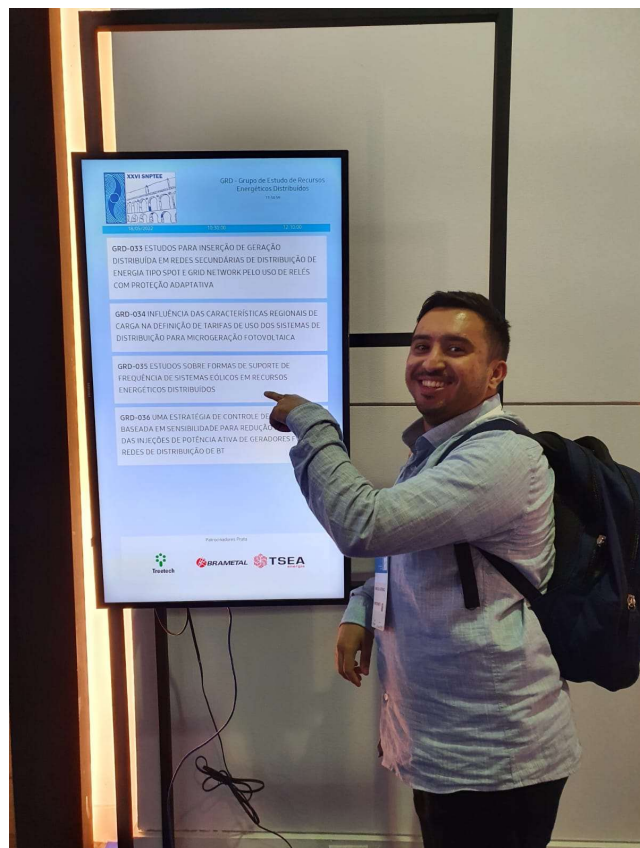


Formado em Engenharia Elétrica pelo IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina - Campus Florianópolis; Atualmente trabalhando como Técnico Junior na empresa Reivax S/A Automação e Controle; Com interesse em Recursos Energéticos Distribuídos.

(2) EVERTHON TAGHORI SICA

Graduado em Engenharia Industrial Elétrica pela UTFPR ; Doutor em Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, pela UFSC. Professor do Instituto Federal de Santa Catarina lecionando para os cursos de Engenharia Elétrica e Tecnologia de Sistemas de Energia. Coordenador do Laboratório de Planejamento Integrado de Recursos Energéticos e atuando em modelagem e simulação de sistemas de suporte à decisão multicritério e otimização multiobjetivos aplicados nas áreas de Recursos Energéticos Distribuídos, de Recurso Hidricos, de Confiabilidade de Sistemas, de Teoria Econômica aplicada do Setor Elétrico e de Economia e Regulação dos Recursos Naturais e do Meio Ambiente.

APÊNDICE B – Comprovante de apresentação



CERTIFICADO



Conferimos o presente certificado a
WINICIÚS LATRÔNICO TÔRES
pela participação no XXVI – Seminário Nacional de Produção
e Transmissão de Energia Elétrica
realizado no período de 15 a 18 de maio de 2022 na cidade do
Rio de Janeiro/RJ

Mario Fernando Ellis
Coordenador Geral

Saulo José Nascimento Cisneiros
Presidente do CIGRE-Brasil

Promoção



Coordenação



CERTIFICADO



Conferimos o presente certificado a
WINICIÚS LATRÔNICO TÔRES
pela participação como Apresentador de Informe Técnico do
XXVI – Seminário Nacional de Produção
e Transmissão de Energia Elétrica
realizado no período de 15 a 18 de maio de 2022 na cidade do
Rio de Janeiro/RJ

Mario Fernando Ellis
Coordenador Geral

Saulo José Nascimento Cisneiros
Presidente do CIGRE-Brasil

Promoção



Coordenação



CERTIFICADO



Conferimos o presente certificado a

WINÍCIUS LATRÔNICO TÔRRES

autor(a) principal do Informe Técnico

ESTUDOS SOBRE FORMAS DE SUPORTE DE FREQUÊNCIA DE SISTEMAS EÓLICOS EM RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS

apresentado no

GRUPO DE ESTUDO DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS - GRD

do XXVI SNPTee – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica realizado no período de 15 a 18 de maio de 2022 na cidade do Rio de Janeiro

Mario Fernando Ellis
Coordenador Geral

Saulo José Nascimento Cisneliros
Presidente do CIGRE-Brasil

Promoção



Coordenação



APÊNDICE C – Slides apresentados no congresso



15 a 18 de maio de 2022
Rio de Janeiro

ESTUDOS SOBRE FORMAS DE SUPORTE DE FREQUÊNCIA DE SISTEMAS EÓLICOS EM RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS

GRD- Geração Distribuída
Winícius Latrônico Tórres
Everthon Taghori Sica
Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC



**INSTITUTO
FEDERAL**
Santa Catarina
Número de Grade
GRD-035



Recursos Energéticos Distribuídos - REDs



- Os REDs são tecnologias de geração e armazenamento de energia elétrica, localizados dentro dos limites de uma determinada concessionária de distribuição;
 - São utilizados usualmente fontes renováveis, como aerogeradores;
- O crescimento da demanda de energia acarreta em um aumento das REDs, com isso um crescimento da Geração Distribuída;
 - Aumento na complexidade da Rede.

Grupo de Estudo – GRD – 357 / Winícius Latrônico Tórres

01/11

Energia Eólica



- O vento é a movimentação do ar provocada por desigualdades de pressão em diferentes regiões;
- A utilização do vento como fonte para geração de energia elétrica, vem aumentando graças ao pensamento de redução da emissão dos gases de efeito estufa;
- As turbinas projetadas para extrair a energia cinética do vento podem ser classificadas por suas características construtivas e maneiras de extração da energia;
 - Arraste ou Sustentação;
 - Eixo Horizontal ou Vertical.

Energia Extraída

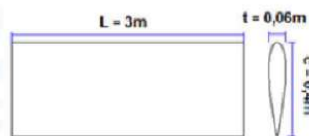


- Uma turbina real terá perdas aerodinâmicas na conversão de energia, implicando em redução do coeficiente de potência, que indica a porção de potência que foi realmente extraída do vento;
- A potência extraída do vento pela turbina é transmitida ao eixo rotativo da mesma, acarretando geração de torque;
- Outro parâmetro importante para turbinas eólicas é o Tip Speed Ratio (TSR), conhecido também por velocidade de ponta, este parâmetro é basicamente a razão da velocidade da turbina e a velocidade do vento.

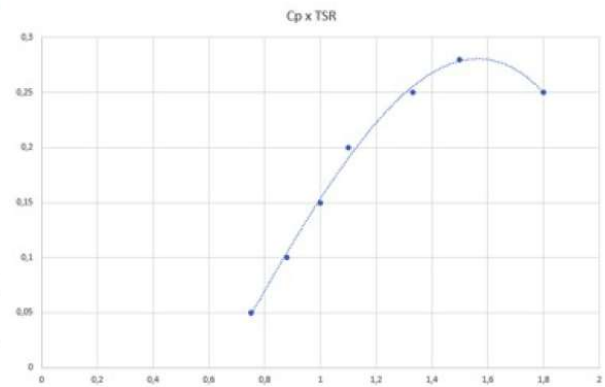
Turbina Eólica Darrieus



- A turbina eólica Darrieus analisada tem o formato "H", contendo 3 pás, com uma altura de 3 metros e diâmetro de 2,5 metros. O perfil da pá considerado será o NACA0018;



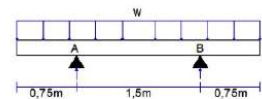
- Para a realização dos cálculos para as simulações foi necessário obter a curva de características da turbina, neste caso foi utilizada a curva que relaciona o coeficiente de potência e a velocidade de ponta da turbina.



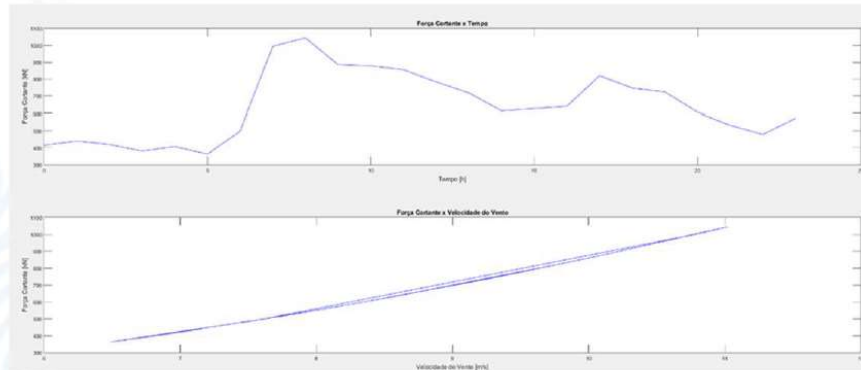
Análise Mecânica



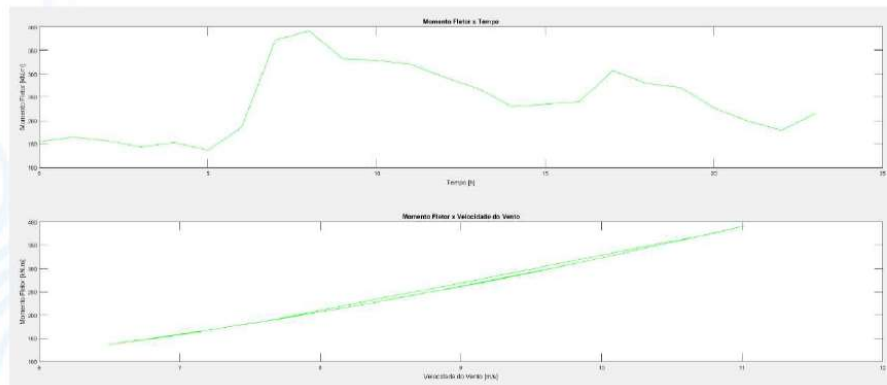
- Através das características construtivas da turbina e da curva de características foi possível o cálculo da força centrípeta exercida sobre as pás e com isso o carregamento total nelas;
- Tendo isto foi possível analisar os esforços mecânicos nos locais de fixação da pá no eixo da turbina. Os esforços analisados são:
 - Momento Fletor;
 - Força Cortante.
- Esses esforços serão analisado através de velocidades de vento reais durante o período de 24 horas, sendo que os valores utilizados foram discretizados por hora.



Força Cortante



Momento Fletor

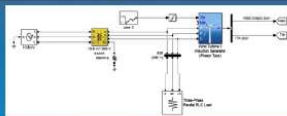


Suporte de Frequência



- O aumento da inserção de geradores eólicos na rede de distribuição acarreta em grandes desafios para a regulação de frequência;
- Alguns métodos podem ser utilizados;
 - Inércia virtual sensível à frequência;
 - Controle primário.
- O modelo tratado não considera estes métodos de controle de frequência, pois trata-se de um único aerogerador conectado a uma carga juntamente com a rede de distribuição de energia elétrica.

Grupo de Estudo – GRD – 357 / Winícius Latrônico Tôres



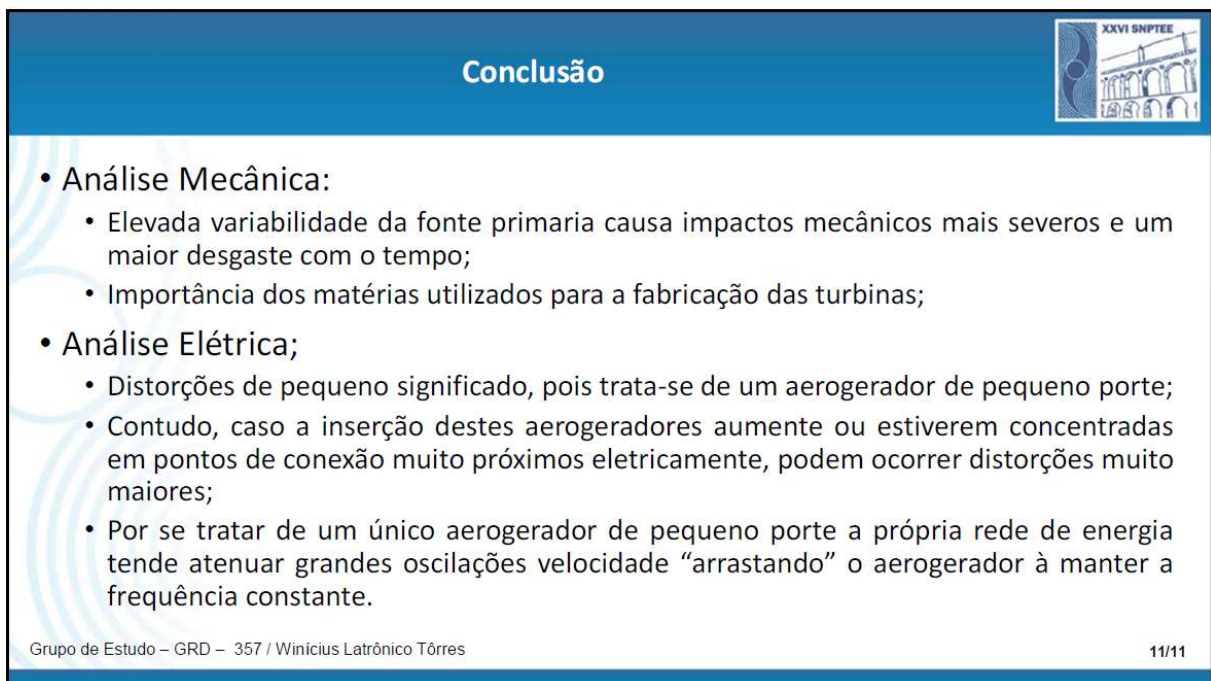
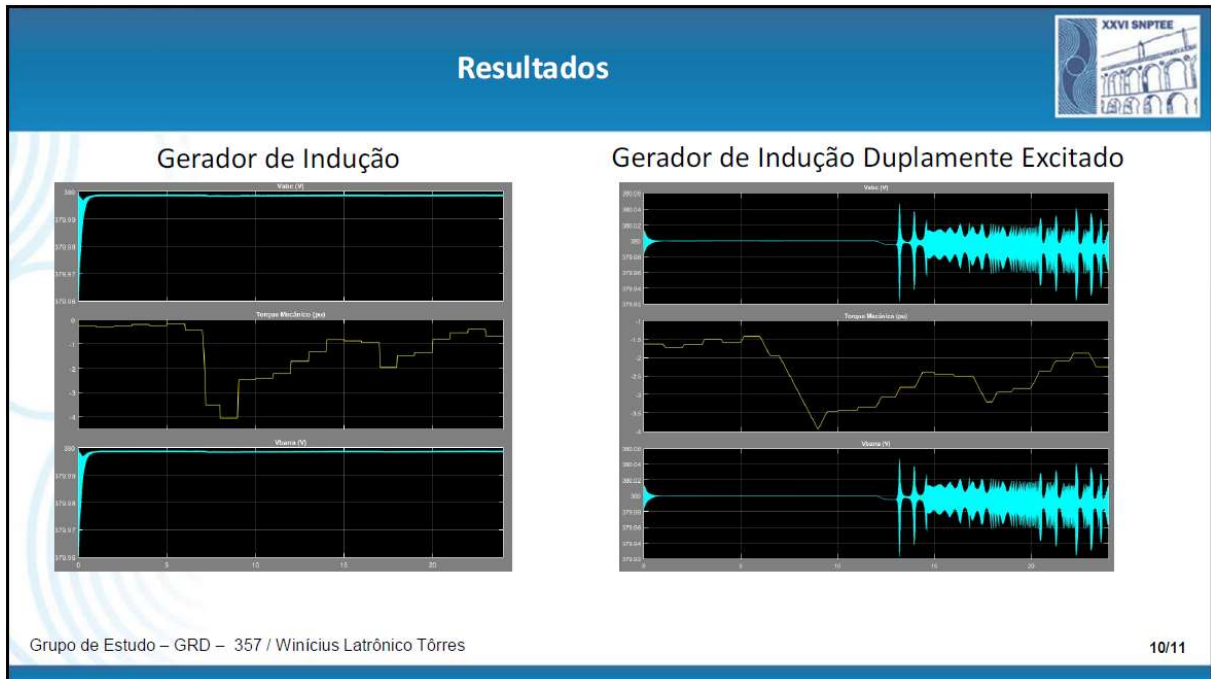
Análise Elétrica

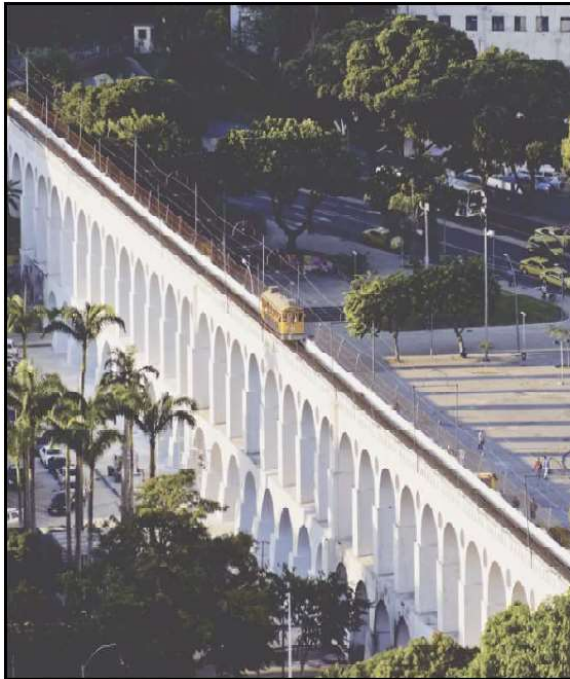


- A geração de energia através de geradores eólicos inseridos perto dos centros de cargas normalmente é realizado através de geradores de indução, de indução duplamente excitado, entre outros;
- A configuração simulada terá uma fonte emulando a tensão referente a rede em que o aerogerador está instalado, uma carga puramente resistiva com a potência proporcional a potência gerada do aerogerador;
- O dado de entrada fornecido ao aerogerador será um torque variante, calculado através de velocidades de vento reais durante o período de 24 horas, sendo que os valores utilizados foram discretizados por hora, e um C_p escolhido através da curva de características da turbina.

Grupo de Estudo – GRD – 357 / Winícius Latrônico Tôres

09/11





Winícius Latrônico Torres

winilatronico@gmail.com

Promoção



Coordenação



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



APÊNDICE D – Código e Simulação Utilizados

```
clear All
```

1 DADOS

```
%Dados da Turbina
D = 2.5;
%Diametro [m]R =
1.25; %Raio [m]
c = 0.4; %Corda do Perfil
NACA0018 [m]p = 0.06; %Largura do
Perfil [m]
L = 3; %Altura da pá

%Dados Conhecidos
Cp = 0.3; %Coeficiente de Potência [adimensional]
Vv = [6.945833 7.1522 6.98445 6.659567 6.88455 6.492683 7.610067
10.75603 11.01915 10.14563 10.1025 9.970267 9.538833 9.137017
8.44315
8.535017 8.62545 9.758933 9.3214 9.174433 8.3919 7.861217
7.461283
8.16045]; %Velocidade do vento [m/s]
Y = 1.5; %Velocidade de ponta [adimensional]
Tempo = [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22
23
24];
par = 1.16; %Densidade do ar
```

2 Calculo Velocidade Ângular da Turbina

```
%TSR - velocidade de ponta [adimensional] ou Coeficiente de
Potência[adimensional]
Cp = -(0.1906*(Y^3)) + 0.3882*(Y^2) + 0.1845*Y - 0.2286

%Velocidade da Turbina
[m/s]Vt = Y.*Vv

%Velocidade Ângular da Turbina
[rad/s]w = Vt./R

Cp =
0
.
2
7
8
3
```

Vt =

Columns 1 through 7

10.4187 10.7283 10.4767 9.9894 10.3268 9.7390 11.4151

Columns 8 through 14

16.1340 16.5287 15.2184 15.1537 14.9554 14.3082 13.7055

Columns 15 through 21

12.6647 12.8025 12.9382 14.6384 13.9821 13.7616 12.5879

Columns 22 through 24

11.7918 11.1919 12.2407

=w

Columns 1 through 7

8.3350 8.5826 8.3813 7.9915 8.2615 7.7912 9.1321

Columns 8 through 14

12.9072 13.2230 12.1748 12.1230 11.9643 11.4466 10.9644

Columns 15 through 21

10.1318 10.2420 10.3505 11.7107 11.1857 11.0093 10.0703

Columns 22 through 24

9.4335 8.9535 9.7925

3 Esforços mecânicos nas pás da Turbina

```
%Dados dos materiais utilizados na pá
%Composito com fibra de vidro e matr
poliméricap = 2600    %[kg/m³]
Ap = 0.00245    %Área do perfil da pá[m²]
```

```
%Cálculo do Momento Fletor
```

```
M = (9.*(Vt.^2).*p.*Ap)./(R.*32)
```

```
%Cálculo do Esforço Cortante
```

```
g = (3.*(Vt.^2).*p.*Ap)./(R.*4)
```

```
p = 2600
```

$A_p =$

0
.
0
0
2
4

$M =$

Columns 1 through 7

155.5798 164.9619 157.3146 143.0199 152.8465 135.9418 186.7590

Columns 8 through 14

373.0856 391.5621 331.9422 329.1260 320.5664 293.4235 269.2237

Columns 15 through 21

229.8865 234.9164 239.9209 307.1207 280.1991 271.4332 227.1041

Columns 22 through 24

199.2893 179.5277 214.7498

$g =$

1.0e+03 *

Columns 1 through 7

0.4149 0.4399 0.4195 0.3814 0.4076 0.3625
0.4980

Columns 8 through 14

0.9949 1.0442 0.8852 0.8777 0.8548 0.7825 0.7179

Columns 15 through 21

0.6130 0.6264 0.6398 0.8190 0.7472 0.7238 0.6056

Columns 22 through 24

0.5314 0.4787 0.5727

4 Torque da Turbina

```
%Potência da Turbina
```

```
Pt = ((Cp*par*((2*L*R)/3)).*(Vv.^3))./2
```

```
%Torque
```

```
T = -Pt./w
```

```
Tv = [Tempo;T]
```

```
ts = timeseries(T, Tempo)
```

```
Pt =
```

```
Columns 1 through 7
```

```
135.2363 147.6519 137.5045 119.1950 131.6882 110.4569 177.8630
```

```
Columns 8 through 14
```

```
502.1995 539.9636 421.4609 416.1087 399.9821 350.2724 307.8460
```

```
Columns 15 through 21
```

```
242.9035 250.9189 258.9796 375.0829 326.8614 311.6434 238.5070
```

```
Columns 22 through 24
```

```
196.0603 167.6335 219.3121
```

```
T =
```

```
Columns 1 through 7
```

```
-16.2251 -17.2036 -16.4060 -14.9153 -15.9401 -14.1771 -19.4767
```

```
Columns 8 through 14
```

```
-38.9084 -40.8352 -34.6176 -34.3239 -33.4312 -30.6006 -28.0768
```

```
Columns 15 through 21
```

```
-23.9744 -24.4990 -25.0209 -32.0290 -29.2214 -28.3072 -23.6842
```

```
Columns 22 through 24
```

```
-20.7835 -18.7226 -22.3958
```

$T_V =$

Columns 1 through 7

1.0000	2.0000	3.0000	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000
-16.2251	-17.2036	-16.4060	-14.9153	-15.9401	-14.1771	-19.4767

Columns 8 through 14

8.0000	9.0000	10.0000	11.0000	12.0000	13.0000	14.0000
-38.9084	-40.8352	-34.6176	-34.3239	-33.4312	-30.6006	-28.0768

Columns 15 through 21

15.0000	16.0000	17.0000	18.0000	19.0000	20.0000	21.0000
-23.9744	-24.4990	-25.0209	-32.0290	-29.2214	-28.3072	-23.6842

Columns 22 through 24

22.0000	23.0000	24.0000
-20.7835	-18.7226	-22.3958

timeseries

Common Properties:

Name:

'unnamed'

Time: [24x1
double]

TimeInfo:

tsdata.timemetadataData:

[1x1x24 double]

DataInfo:

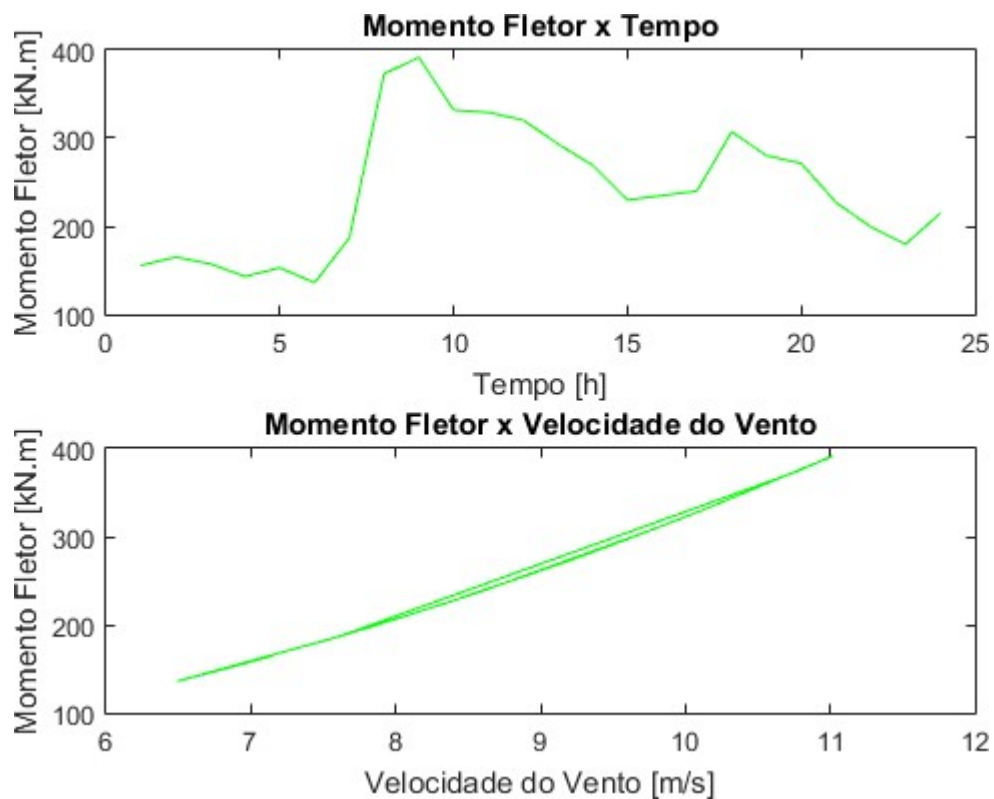
tsdata.datametadata

5 Gráficos 1

```
figure % new figure
ax1 = subplot(2,1,1); % top
subplot ax2 = subplot(2,1,2); %
bottom subplot

%Gráfico Momento Fletor
plot(ax1,Tempo,M,'g')
title(ax1,'Momento Fletor x
Tempo')ylabel(ax1,'Momento
Fletor [kN.m]')
xlabel(ax1,'Tempo [h]')

plot(ax2,Vv,M,'g')
title(ax2,'Momento Fletor x Velocidade do
Vento')ylabel(ax2,'Momento Fletor [kN.m]')
xlabel(ax2,'Velocidade do Vento [m/s]')
```



6 Gráficos 2

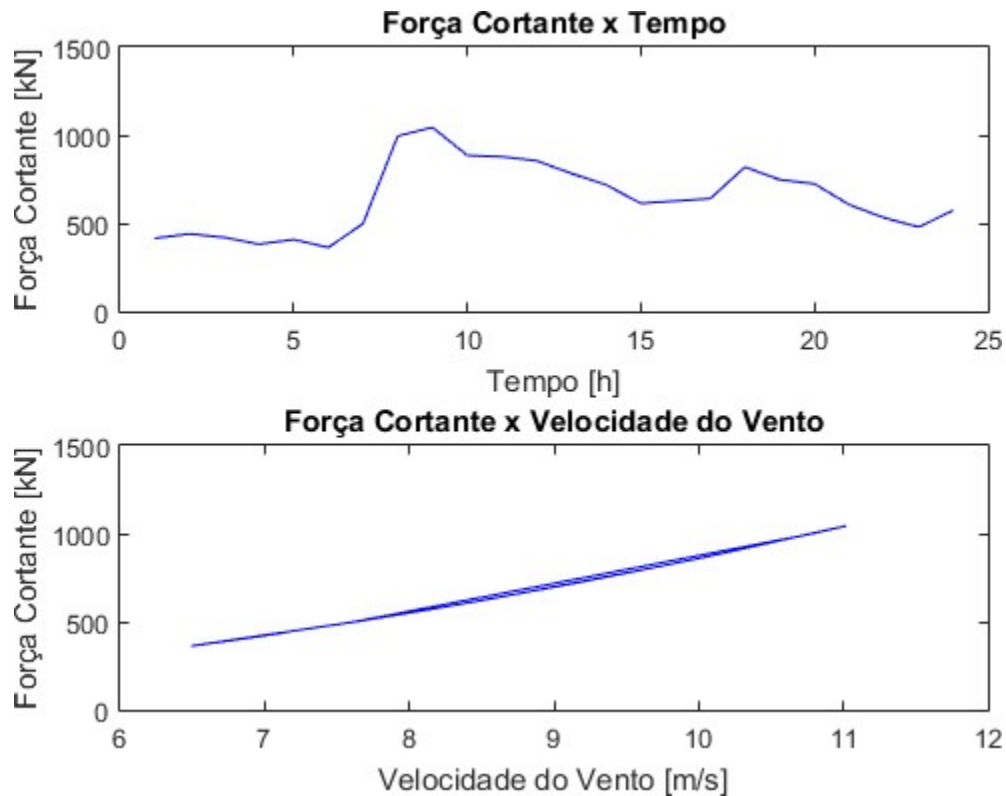
```

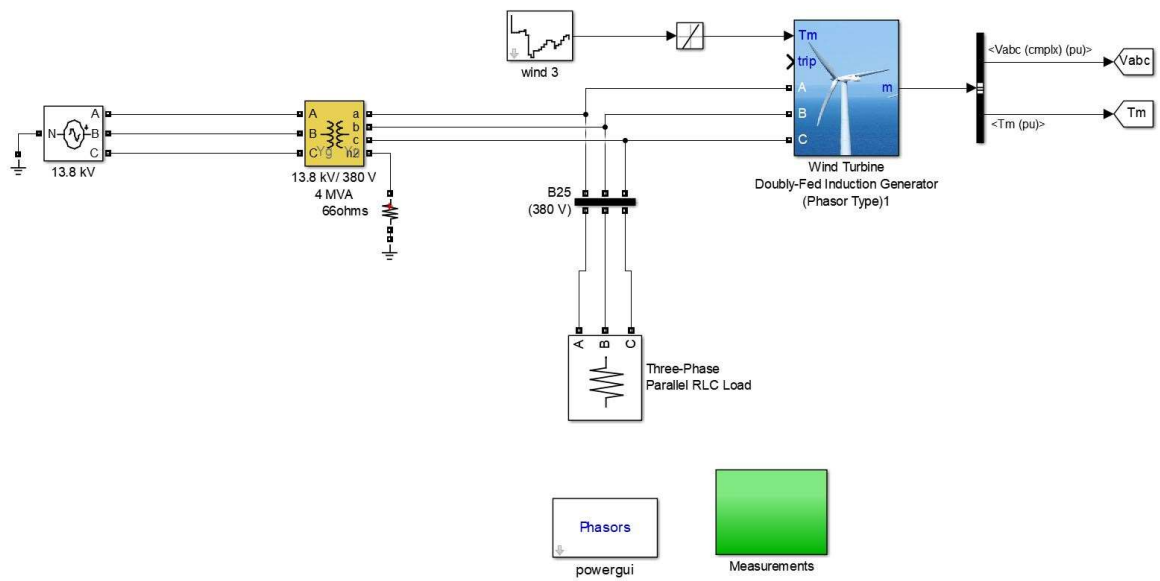
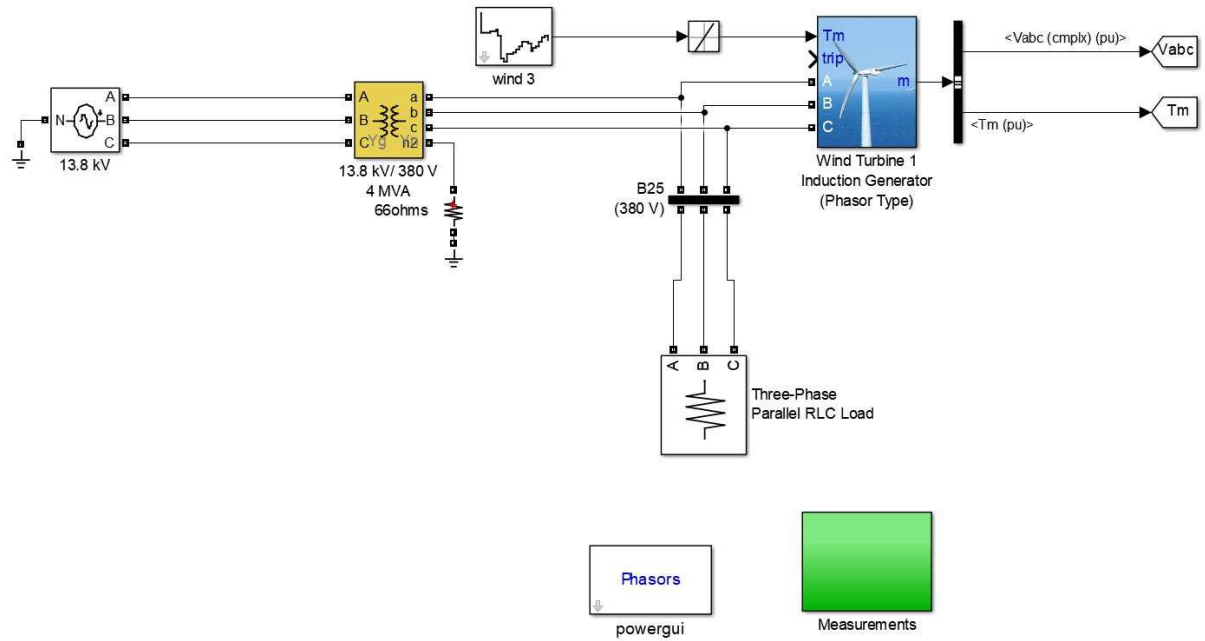
figure % new figure
ax1 = subplot(2,1,1); % top
subplot ax2 = subplot(2,1,2); %
bottom subplot

%Gráfico Força Cortante
plot(ax1,Tempo,g,'b')
title(ax1,'Força Cortante x
Tempo')ylabel(ax1,'Força
Cortante [kN]')
xlabel(ax1,'Tempo [h]')

plot(ax2,Vv,g,'b')
title(ax2,'Força Cortante x Velocidade do
Vento')ylabel(ax2,'Força Cortante [kN]')
xlabel(ax2,'Velocidade do Vento [m/s]')

```





APÊNDICE E – Perguntas e Respostas

1- O Operador Nacional do Sistema tem exigido a implantação de inercia sintética nos parques eólicos. Qual a opinião dos autores?

R: O sistema de suporte à inercia sintética exigido pelo ONS tem a finalidade de emular a inércia por meio da modulação transitória da potência, contribuindo com pelo menos 10% de sua potência nominal. O valor de 10%, acredita-se que, tem fundamento no percentual de injeção de potência por fonte primaria de elevada variabilidade em um sistema elétrico de potência a fim de manter a estabilidade. A exigência de um período mínimo de 5 segundos, quando em regime de subfrequência para desvios de frequência superiores a 0,2 Hz, trata-se de um procedimento necessário, entretanto ainda não é uma questão pacífica quantos valores e temporalidade dispostas.

2- Qual a influência da potência de curto circuito no ponto de conexão sobre a aplicação desta metodologia?

R: O trabalho objetivou apresentar as modelagens, sobretudo, mecânica e a elétrica, de forma restrita, com a finalidade de avaliar o comportamento de uma turbina Darrieus na situação hipotética de conexão direta no sistema de distribuição de energia elétrica. Apesar de não ser o mote, a potência de curto circuito será influenciada do mesmo modo que para pequenos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em unidades consumidoras conectadas à rede de distribuição.

3- Existe alguma experiência pratica da aplicação deste método?

R: As turbinas Darrieus foram umas das primeiras formas de aproveitamento da energia eólica, inicialmente aplicada para o bombeamento. Atualmente com os avanços técnicos e tecnológicos em engenharia dos materiais, as turbinas de eixo vertical estão retornando à aplicabilidade, sobretudo em virtude da promoção dos recursos energéticos distribuídos e da possibilidade de controle e monitoramento por dispositivos IoTs.

4- Qual a principal dificuldade encontrada? Buscou identificar mercado e fabricante nacional?

R: A principal dificuldade residiu na modelagem mecânica em si. A modelagem da turbina Darrieus, pautou-se em valores iniciais de perfil de pá (blade) NACA0018 de uso comercial.

5- Existe alguma experiência prática da aplicação deste método?

R: As turbinas Darrieus foram umas das primeiras formas de aproveitamento da energia eólica, inicialmente aplicada para o bombeamento. Atualmente com os avanços técnicos e tecnológicos em engenharia dos materiais, as turbinas de eixo vertical estão retornando à aplicabilidade, sobretudo em virtude da promoção dos recursos energéticos distribuídos e da possibilidade de controle e monitoramento por dispositivos IoTs.

ANEXO A – Publicidade institucional de apresentação do congresso

R E V I S T A

XXVI SNPTEE

SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA



15 A 18 DE MAIO DE 2022

JANEIRO 2021 / N. 1

RIO DE JANEIRO

**XXVI SNPTEE acontece
na Cidade Maravilhosa
pela quarta vez**

**PARCERIA PARA
ENDEREÇAR OS
DESAFIOS DO
SETOR ELÉTRICO**

PÁG. 4

**SOBRE
O LOCAL**

PÁG. 9

**GRUPOS
DE ESTUDO**

PÁG. 10