



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL  
DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA**

**INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL  
(IEDS)**

**CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS**

**ESTEVÃO VALDIR SEMEDO ALMEIDA VARELA**

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA COM O DFIG  
CONECTADO À REDE ELÉTRICA DIANTE DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO**

ACARAPE

2023

**ESTEVÃO VALDIR SEMEDO ALMEIDA VARELA**

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA COM O DFIG  
CONECTADO À REDE ELÉTRICA DIANTE DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO**

Trabalho de conclusão de curso desenvolvido na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

**Orientador:** Prof. Dr. Vandilberto- Pereira Pinto

ACARAPE

2023

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Varela, Estevão Valdir Semedo Almeida.

V293a

Análise de um sistema de geração eólica com o DFIG conectado à rede elétrica diante de afundamento de tensão / Estevão Valdir Semedo Almeida Varela. - Redenção, 2023.  
77fl: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2023.

Orientador: Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Vandilberto Pereira Pinto.

1. Energia elétrica. 2. Qualidade de energia. 3. Afundamento de tensão. I. Pinto, Vandilberto Pereira. II. Título.

CE/UF/BSCA

CDD 621.042

---

# ESTEVIÃO VALDIR SEMEDO ALMEIDA VARELA

## ANÁLISE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA COM O DFIG CONECTADO À REDE ELÉTRICA DIANTE DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Trabalho de conclusão de curso desenvolvido na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

### BANCA EXAMINADORA

*Vandilberto Pereira Pinto*

**PROF. DR. Vandilberto Pereira Pinto (ORIENTADOR)**

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Documento assinado digitalmente



LIGIA MARIA CARVALHO SOUSA

Data: 02/02/2023 18:14:10-0300

Verifique em <https://verificador.itl.br>

**Prof. Dra. Lígia Maria Carvalho**

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

*Francisco Olímpio Moura Carneiro*

Francisco Olímpio Moura Carneiro

Prof. Dr. Francisco Olímpio Moura Carneiro

Instituto de Engenharias e Desenvolvimento

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Sustentável - SIAPE 1148904

Dedico este trabalho a minha Mãe  
Maria Inês Gomes Semedo, o meu  
Pai Sam José Bok e a minha família

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e por me permitir chegar aqui, os meus ancestrais e os meus pais que sempre me ampararam na educação e ensinamentos que hoje serviu de suporte na minha vida acadêmica e social.

Agradeço ao Rui Jorge Gomes Semedo e Luís Alberto Gomes Semedo pelos ensinamentos que me deram e por serem meus segundos pais, sempre prestando toda ajuda possível.

Ao meu irmão mais novo Everton Semedo Bok.

Agradeço a minha namorada Sumai Umaro Sani que sempre esteve comigo em tudo que foi necessário, me dando força, consolo, alegria, motivação e amor. Você é a melhor companheira que alguém pode ter. Te amo!

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto pela ótima orientação, dedicação, atenção, sabedoria e principalmente pela oportunidade de desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus amigos e amigas dentro e fora da Universidade.

Agradeço aos amigos Basualdo Irineu dos Reis Gomes, Inelder Roberto Lima, Tivaldo Emanuel João Bico Banca, e Nicolas Viegas pelo apoio e força que vocês me deram ao longo do meu percurso acadêmico.

Ao Estado Brasileiro pela cooperação bilateral com o Estado da Guiné-Bissau.

A Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) pela oportunidade de ser discente dessa magnífica Universidade.

## RESUMO

A história da energia não é algo novo para o homem, desde o princípio da humanidade os seres humanos possuem recursos energéticos ao seu redor, mas, a dificuldade de transformar esses recursos em energia elétrica era um problema sem solução tendo em conta a falta do desenvolvimento da sociedade na época. Durante todo o percurso do desenvolvimento da utilização da energia elétrica, o não renovável predomina-se como o mais utilizado, os problemas ambientais causados pelo uso da energia não renovável proporcionou-se as pesquisas e despertar do uso da energia elétrica a partir das fontes renováveis com o propósito da diminuição do dióxido de carbono, efeito estufa entre outros. O uso da energia elétrica no mundo está crescendo de uma forma exponencial, porém, de modo que a demanda está crescendo os problemas de distúrbio elétrico estão amplificando. Para garantir uma boa qualidade de energia elétrica o Sistema Elétrico de Potência (SEP) precisa ter um funcionamento adequado, sem falhas, garantindo uma boa qualidade de energia aos seus consumidores. Existem vários tipos de distúrbios nos sistemas elétricos, o foco do referido trabalho será em afundamentos de tensão. Com isso será realizada uma análise de um sistema eólico conectado à rede elétrica diante de afundamentos de tensão. Os resultados foram obtidos utilizando software MATLAB, foram realizadas simulações em vários cenários: Afundamento de tensão de 15% e 50% com o vento constante e afundamento de tensão de 15% e 50% com o vento de grau variando de 15 m/s a 17 m/s.

**Palavras-chave:** Energia elétrica; Qualidade de energia; Afundamento de tensão.

## **ABSTRACT**

The history of energy is not something new to man, since the beginning of humanity human beings have energy resources around them, but the difficulty of transforming these resources into electricity was a problem without a solution given the lack of development of society at the time. The environmental problems caused by the use of non-renewable energy provided the research and awakening of the use of electricity from renewable sources for the purpose of reducing carbon dioxide, greenhouse effect, among others. The use of electricity in the world is growing exponentially, but as the demand is increasing the problems of electrical disturbances are amplifying. To ensure good power quality the Electric Power System (PES) needs to function properly, without failures, guaranteeing good power quality to its consumers. There are several types of disturbances in electrical systems, the focus of this work will be on voltage sags. With this, an analysis of a wind power system connected to the grid in the face of voltage sags will be performed. The results were obtained using MATLAB software, simulations were performed in several scenarios: 15% and 50% voltage sags with constant wind and 15% and 50% voltage sags with step wind varying from 15 m/s to 17 m/s.

**Keywords:** Electricity; Power quality; Voltage sags;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: A primeira turbina eólica automática com diâmetro do rotor de 17m e 144 pás de madeira.....	20
Figura 2.1: O rotor de eixo horizontal .....	25
Figura 2.2: O nacele com gerador convencional e vários componentes no interior .....	26
Figura 2.3: Forças de sustentação e de arrasto como resultado da ação do vento.....	27
Figura 2.4: Valores para aproximação das curvas do coeficiente de potência. 28	
Figura 2.5: Denominações dos distúrbios segundo a norma americana e suas faixas de magnitude e duração .....	31
Figura 2.6: A curva de suportabilidade. de aerogeradores a afundamentos de tensão.....	33
Figura 3.1:Gerador de indução duplamente alimentado.....	33
Figura 3.2: Funcionamento da velocidade sub-síncrona e super-síncrona no sistema .....	35
Figura 3.3: Diagrama de blocos do controle do ângulo de passo.....	38
Figura 3.5:Diagrama de Blocos da Estratégia de Controle para a Rede .....	40
Figura 3.6: Representação do diagrama de blocos para o gerador.....	41
Figura 4.1: Sistema DFIG e seus componentes. ....	42
Figura 4.2:Corrente trifásico no barramento 25 do sistema com afundamento de tensão de 15% .....	43
Figura 4.3: Corrente trifásico no barramento 575 do sistema com afundamento de tensão de 15%.....	43
Figura 4.4; Tensão trifásico no barramento 25 do sistema com afundamento de tensão de 15% .....	44
Figura 4.5: Tensão trifásico no barramento 575 do sistema com afundamento de tensão de 15% .....	45
Figura 4.6:Tensão no barramento com afundamento de tensão de 15% .....	45
Figura 4.7: Potência ativa do sistema com afundamento de tensão de 15%....	46
Figura 4.8: Potência reativa do sistema com afundamento de tensão de 15%.47	
Figura 4.9:Velocidade do gerador do sistema com afundamento de tensão de 15% .....	48

Figura 4.10: Corrente trifásico no barramento 25 do sistema com afundamento de tensão de 50%.....	49
Figura 4.11: Corrente trifásico no barramento 575 do sistema com afundamento de tensão de 50%.....	50
Figura 4.12: Tensão trifásico no barramento 575 do sistema com afundamento de tensão de 50%.....	51
Figura 4.13: Tensão trifásico no barramento 575 do sistema com afundamento de tensão de 50%.....	51
Figura 4.14: Tensão de corrente contínua do sistema com afundamento de tensão de 50% .....	52
Figura 4.15: Potência ativa do sistema com 50% de afundamento de tensão.	53
Figura 4.16: Potência reativa do sistema com 50% de afundamento de tensão. ....	54
Figura 4.17: Velocidade do gerador do sistema com afundamento de tensão de 15% .....	55
Figura 4.18: Corrente trifásico no barramento 25 do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 15%.....	57
Figura 4.19: Corrente trifásico no barramento 575 do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 15%.....	57
Figura 4.20: Tensão trifásico no barramento 25 do sistema com o vento variável com afundamento de tensão de 15% .....	58
Figura 4.21: Tensão trifásico no barramento 575 do sistema com o vento variável com afundamento de tensão 15%.....	59
Figura 4.22: Tensão de corrente contínua do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 15% .....	60
Figura 4.23: Potência ativa do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 15%.....	61
Figura 4.24: Potência reativa do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 15%.....	62
Figura 4.25: Velocidade do gerador do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 15%.....	63
Figura 4.26: Corrente trifásico no barramento 25 do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 50%.....	65

Figura 4.27: Corrente trifásico no barramento 575 do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão 50%.....	66
Figura 4.28: Tensão trifásico no barramento 25 do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 50%.....	67
Figura 4.29: Tensão trifásico no barramento 575 do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 50%.....	67
Figura 4.30: Tensão de corrente contínua do sistema com vento variável com afundamento de tensão de 50%.....	68
Figura 4.31: Potência ativa do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 50%.....	69
Figura 4.32: Potência reativa do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 50%.....	70
Figura 4.33: Velocidade do gerador do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 50%.....	71

## LISTA DE SIGLAS

AT - Afundamento de tensão

B25 - Barramento 25

B575 - Barramento 575

CLR - Conversor do lado do rotor

CLR'- Conversor do lado da rede

DFIG - Gerador de indução duplamente alimentado (Double-Fed Induction Generator)

DTC - Controle direto do torque

FIG. - Figura

IEEE - Instituto de engenheiros eletrônicos e eletricitistas (Institute of Electrical and Electronics Engineering).

MIT - Motor de indução trifásico

MPPT - Rastreamento de ponto de potência máxima (maximum power point tracking)

PI - Proporcional e integral

RMS - Raiz quadrada média

RPM - Rotação por minuto

SEP - Sistema elétrica de potência

FEC - Fluxo de energia cinética

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: A definição de distúrbios no sistema de potência .....	30
Tabela 4.1: Tabela dos resultados do sistema com o vento constante (15m/s) e com afundamento de tensão de 15% .....	48
Tabela 4.2: Tabela dos resultados do sistema com o vento constante (15m/s) e com afundamento de tensão de 50% .....	55
Tabela 4.3: Tabela dos resultados do sistema com o vento variável de 15m/s à 17 m/s, com afundamento de tensão de 15% .....	63
Tabela 4.4: Tabela dos resultados do sistema com o vento variável de 15m/s à 17 m/s, com afundamento de tensão de 50% .....	71

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $I_{dqr}$  - Corrente de rotor nos eixos d e q;
- $I_{dqs}$  - Corrente de estator nos eixos d e q;
- $I_{dr}$  - Corrente de rotor no eixo d;
- $I_{ds}$  - Corrente de estator no eixo d;
- $i_n$  - Corrente do filtro
- $I_{qr}$  - Corrente de rotor no eixo q;
- $I_{qs}$  - Corrente de estator no eixo q;
- $i_s$  - Corrente no estator
- $L_f$  - Indutância do filtro
- d- Direto
- q- Quadratura
- $P_n$  - Potência ativa do rotor
- $P_r$  - Potência ativa no rotor do DFIG (W);
- $P_s$  - Potência ativa no estator do DFIG (W);
- $Q_n$  - Potência reativa do rotor
- $R_f$  - Resistencia inerente do filtro
- $R_s$  - Resistencia de estator
- $T_c$  - Conjugado de carga
- $T_e$  - Torque eletromagnético desenvolvido pela máquina;
- $V_1$  – Velocidade da massa de ar [m/s];
- $V_{dqr}$  - Tensões de rotor nos eixos d e q;
- $V_{dqs}$  - Tensões de estator nos eixos d e q;
- $V_{dr}$  - Tensão de rotor no eixo d;
- $V_{ds}$  - Tensão de estator no eixo d;
- $V_g$  - Tensao na rede
- $V_n$  - Tensao inter-harmonica de ordem n
- $V_{qr}$  - Tensão de rotor no eixo q;
- $V_{qs}$  - Tensão de estator no eixo q;
- $V_s$  - Modulo da tensao no estator
- $w_r$  - Velocidade angular do rotor (rad/s)
- $w_s$  - Velocidade eletrica da rede (rad/s)

$\lambda_{dr}$  - Fluxo concatenado de rotor no eixo d;

$\lambda_{ds}$  - Fluxo concatenado de estator no eixo d;

$\lambda_{qr}$  - Fluxo concatenado de rotor no eixo q;

$\lambda_{qs}$  - Fluxo concatenado de estator no eixo q;

$\lambda_{qs}$  - Fluxo concatenado de estator no eixo d;

$\lambda_s$  - Enlace de fluxo do estator

$\lambda_s$ " - Vetor de enlace de fluxo do estator

$\rho_{ar}$  - Densidade do ar [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

A - área da pá [ $\text{m}^2$ ]

Ca - coeficiente de arrasto [adimensional]

Cp - Coeficiente de potência

Cs - coeficiente de sustentação [adimensional]

d - Diâmetro do cilindro de ar [m].

Fa - força de arraste aerodinâmico [N]

Fs - força de sustentação [N]

$I_{abc}$  (B25) - Corrente trifásico no barramento 25

$I_{abc}$  (B575) - Corrente trifásico no barramento 25

j - Momento de inércia do conjunto turbina e gerador;

$L_m$  - Indutância de magnetização do gerador;

$L_r$  - Indutância própria de qualquer bobina do rotor;

$L_s$  - Indutância própria do estator;

P - Quantidade de polos da máquina;

$P_a$  - Potência ativa

$P_{disp}$  - Potência eólica disponível [W];

$P_g$  - Potência total gerada e entregue para a rede;

$P_m$  - Potência mecânica entregue ao gerador;

$P_r'$  - Potência entregue pelo rotor;

$P_s'$  - Potência entregue pelo estator;

$Q_a$  - Potência reativa

$Q_s$  - Potência reativa do estator (VAR);

$r$  - Raio do rotor da turbina eólica (m);

$s$  - Escorregamento do rotor;

$t$  - Tempo [s];

$V_{abc}$  (B25) - Tensão trifásico no barramento 25

$V_{abc}$  (B575) - Tensão trifásico no barramento 575

$V_{dc}$  - Tensão de corrente contínua

$v_{ref}$  - velocidade de referência, a velocidade medida na altura de referência (m/s);

$V_v$  - velocidade do vento a uma altura  $z$  sobre o nível do solo (m/s);

$V_w$  - Velocidade média do vento (m/s);

$W_c$  - Energia Cinética [J];

$W_r$  - Velocidade do gerador

$W_t$  - Velocidade angular da turbina (rad/s);

$z$  - Altura sobre o nível na qual se está determinando a velocidade  $v$  (m);

$z_o$  - Comprimento da rugosidade no local;

$z_{ref}$  - Altura de referência, altura no qual é medida a velocidade de referência (m/s);

$\beta$  - Ângulo de passo da turbina

$\theta_r$  - Ângulo do rotor;

$\lambda$  - Razão de velocidade de ponta de pá

$\rho$  - massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>]

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	Objetivo geral	21
1.2	Objetivos específicos	21
1.3	Motivação	21
1.4	Organização do trabalho	21
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS DA ENERGIA EÓLICA E QUALIDADE DE ENERGIA</b>	<b>22</b>
2.1	O vento	22
2.2	Turbinas eólicas	24
2.2.1	Rotor com pás	24
2.2.2	Nacele	25
2.2.3	A torre	26
2.3	Potência de uma turbina eólica	26
2.4	Qualidade de energia	29
2.4.1	Afundamentos de tensão	30
2.4.2	Normas sobre o afundamento de tensão	31
2.4.3	Valores característicos do afundamento de tensão	32
2.4.4	A curva de suportabilidade	32
<b>3</b>	<b>O GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO</b>	<b>33</b>
3.1	Funcionamento do gerador dfig	33
3.2	Modelagem da máquina de indução duplamente alimentada	35
3.3	Controle do DFIG	37
3.3.1	Controle do ângulo de pitch	37
3.3.2	Controle do conversor do lado da rede (CLR')	38
3.3.3	Controle do conversor do lado do rotor (CLR)	40
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO E RESULTADOS</b>	<b>41</b>
4.1	Descrição do sistema	42
4.2	Simulação e resultados para o vento constante de 15 m/s e o vento variável “degrau” variando de 15 m/s a 17 m/s	42
4.2.1	Afundamento de tensão de 15% e o vento constante de 15 m/s	42
4.2.2	Afundamento de tensão de 50% e o vento constante de 15 m/s	49
4.2.3	Afundamento de tensão de 15% e o vento variável “degrau” (variando de 15 m/s a 17 m/s)	56
4.2.4	Afundamento de tensão de 50% e o vento variável “degrau” (variando de 15 m/s a 17 m/s)	64

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>72</b>
5.1	Trabalhos futuros .....	73
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

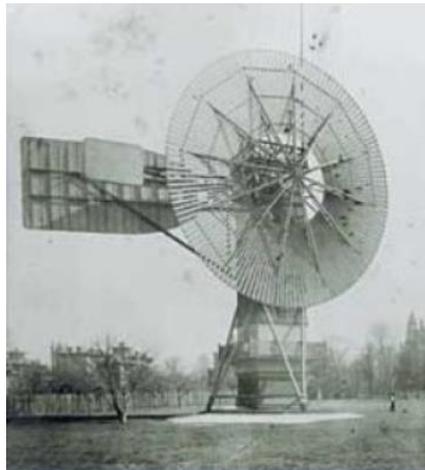
A história da energia não é algo novo para o homem, desde o princípio da humanidade os seres humanos possuem recursos energético ao seu redor, mas, a dificuldade de transformar esses recursos em energia elétrica era um problema sem solução tendo em conta a falta do desenvolvimento da sociedade na época.

De acordo com HINRICHS, R.A., KLEINBACH, M., DOS REIS, L., 2014 apontaram que a energia é um dos principais constituintes da sociedade desde a pré-história até a idade moderna, ela é necessária para se criar bens com base em recursos naturais e para fornecer muitos dos serviços com os quais temos nos beneficiados, ao referir-se a tal assunto, VIDAL, A.P.,2009, afirmou que a importância da energia é incontestável para a civilização humana e realçou que é de conhecimento de todos os seres humanos que as evoluções econômicas e sociais ocorreram a partir da descoberta de novas fontes energéticas.

Conforme CLÍMACO F., 2009 *APUD* PINTO, B.M.D.R.,2016, afirmou que o primeiro registo histórico da utilização da energia eólica está datado por volta de 200 a.C. na Pérsia, na altura utilizavam os moinhos de vento para bombeamento de água e moagem de grãos através de cata-ventos, ainda o PINTO (2016) reforçou que existe a possibilidade de que na China, por volta de 2000 a.C. e no Império Babilónico, por volta de 1700 a.C., já se utilizavam moinhos de vento para irrigação, essa revolução teve enorme repercussão no passado, tem projeção nos dias atuais e terá difusão para gerações vindouros.

Segundo RÜNCOS, F., CARLSON, R., ET ALL., 2015, relataram que, pela primeira vez no inverno do ano 1887-1888 o norte americano Charles F. Brush colocou em operação a primeira turbina eólica automática com diâmetro do rotor de 17m e 144 pás de rotor em madeira de cedro para gerar energia elétrica conforme mostra a fig. 1.1., nessa mesma linha do raciocínio, o SHEPHERD,1994 *APUD* DUTRA, M. R., 2008 acrescentou que essa turbina eólica tratava-se de um cata-vento que fornecia 12 kW em corrente contínua para carregamento de baterias as quais eram destinadas, sobretudo, para o fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes.

Figura 1.1: A primeira turbina eólica automática com diâmetro do rotor de 17m e 144 pás de madeira.



Fonte: (RÜNCOS, CARLSON, ET ALL., 2015)

A energia renovável começou a despertar atenção nos países da potência mundial a partir da década de 1970 até nos meados da década de 1980, após a primeira grande crise do petróleo, conseqüentemente diversos países, inclusive o Brasil, se preocuparam em desenvolver pesquisas na utilização da energia renovável como uma fonte alternativa de energia elétrica RÜNCOS, F., CARLSON, R., ET ALL., 2015. Houve muita evolução durante essa década com intuito de ter a fonte renovável como suporte da energia elétrica da pós crise, porém até 1980 foram construídos aerogeradores com pequenos valores de potência estes aerogeradores tinham o inconveniente de não poderem funcionar com ventos de baixa velocidade R. MELÍCIO 2010 APUD PINTO, B.M.D.R.,2016,

Atualmente a preocupação acerca do meio ambiente, a poluição gerada por combustíveis fósseis, a preocupação com a segurança global e, principalmente, com as mudanças climáticas, faz com que diversos países invistam na pesquisa e implementação da energia renovável para mitigar os problemas do meio ambiente (ROCHA, M. A.,2018).

A energia eólica é uma fonte energética consolidada no Brasil, na última década, o Brasil apresentou um grande desenvolvimento na indústria eólica, proporcionou-se um comportamento exponencial de crescimento do total de capacidade instalada a nível nacional, tornando-se um mercado extremamente competitivo com o emprego, até o ano de 2016 foram empregados a mais de 160 mil pessoas e na matriz energética brasileira participou de 7% da capacidade

nacional instalada (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2017 APUD ROCHA, M. A.,2018).

### **1.1 Objetivo geral**

- Analisar o comportamento de um sistema de geração eólica conectado à rede diante de afundamentos de tensão.

### **1.2 Objetivos específicos**

Para obtenção da resposta do nosso objetivo geral, foi analisado os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o comportamento de  $P_a$ ,  $Q_a$ ,  $V_{abc}$  (B25),  $V_{abc}$  (B575),  $V_{dc}$ ,  $W_r$ ,  $I_{abc}$  (B25) e  $I_{abc}$  (B575) com afundamento de tensão de 15% e 50%, com o vento constante de 15m/s;
- Analisar o comportamento de  $P_a$ ,  $Q_a$ ,  $V_{abc}$  (B25),  $V_{abc}$  (B575),  $V_{dc}$ ,  $W_r$ ,  $I_{abc}$  (B25) e  $I_{abc}$  (B575) com afundamento de tensão de 15% e 50% com o vento degrau variando de 15m/s a 17m/s;

### **1.3 Motivação**

Entendo que o sistema elétrico de potência está sujeito a vários fenômenos, internos e externos a ele, que reduzem a qualidade da energia elétrica que chega aos usuários.

Pretendo resolver o problema de instabilidade no funcionamento do sistema eólico conectado à rede elétrica causado pelo afundamento de tensão. O parque eólico gera 9 MW de potência ativa e é composto por 6 aerogeradores de 1,5 MW conectados a um sistema de distribuição de 25 kV, exporta energia para uma rede de 120 kV através de um alimentador de 30 km e 25 kV.

### **1.4 Organização do trabalho**

No capítulo dois, foram abordado o conceito de fundamento de energia eólica e qualidade de energia.

No capítulo três, apresenta-se o gerador de indução duplamente alimentado, princípio de funcionamento do DFIG, modo de operação, controle do DFIG e modelagem do sistema DFIG.

No capítulo quatro, descreve-se o sistema em estudo, simulação feita para obtenção dos resultados baseando nos objetivos específicos e comentário sobre resultados obtidos a partir da simulação.

No capítulo cinco, aborda-se as conclusões e trabalhos futuros.

## **2 FUNDAMENTOS DA ENERGIA EÓLICA E QUALIDADE DE ENERGIA**

### **2.1 O vento**

Para transformar a energia eólica em energia elétrica é imprescindível o vento, não podemos ter a energia eólica sem conhecer os recursos da geração, a projeção de qualquer parque eólico precisa da disponibilidade energética suficiente no local destinado à instalação do sistema eólico, conforme o REIS, 2011 APUD RIBEIRO, L.B.,2017, o vento é uma massa de ar em movimento, e essa movimentação é gerada devido a dois principais motivos, entre eles podemos mencionar o aquecimento diferenciado das camadas de ar pelo Sol e através dos movimentos da Terra.

De acordo com DUTRA, R., 2008 os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera, ainda o DUTRA realçou que a não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da terra, por outro lado GUERRA, T. K., 2015 sustentou a sua teoria dizendo que a terra recebe energia ininterruptamente do sol, conseqüentemente essa energia aquece a atmosfera e o solo de forma distinta, havendo conseqüentemente pontos mais quentes que outros.

Conforme DUTRA, a velocidade do vento pode variar significativamente em curtas distâncias, para instalação dos parques eólicos em qualquer área apropriada, é relevante avaliar o local no qual se deseja fazer instalação do parque eólico levando em consideração todos os parâmetros regionais que influenciam nas condições do vento, isto vem ao encontro de SILVA, N. F., 2015 APUD BREITENBACH, G., 2017 que concluiu que “o perfil do vento se modifica de acordo com o distanciamento do nível do solo” e apontou que quanto mais se afasta o vento do solo, maior será sua velocidade, por fim o ATLAS EÓLICO DO BRASIL, 1988 APUD CRESESB, 2014, P. 17 APUD BREITENBACH, G., 2016 PAG. 24 concluiu que o vento também é influenciado pelas características

topográficas e rugosidade do terreno, podendo ocorrer aceleração e desaceleração numa mesma região, a sua postura sustentou que a altura como mostra a equação 2.1 é outro fator importantíssimo que deve-se levar em consideração porque determina como o vento irá se comportar ao longo do tempo.

Equação da velocidade do vento a uma altura  $z$  sobre o nível do solo.

$$V_v = V_{ref} * \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_{ref}/z_0)} \quad (2.1)$$

Segundo CUSTODIO, L.P.,2021 a turbulência nos ventos causa dissipação da energia cinética em energia térmica, por meio de consecutivas rajadas de vento, essa linha do pensamento combinou com o raciocínio do GUERRA, T. K., 2015 no qual reforçou que na prática, a energia disponível para uma turbina eólica é calculada com base na energia cinética ( $W_c$ ) de uma porção de ar se deslocando com velocidade constante ( $v_1$ ) em direção as pás dessa turbina ao longo de um tempo ( $\Delta t$ ) como é ilustrada na equação 2.2. Existem regras padronizadas sobre as velocidades do vento adequado para geração eólica, este aspecto é comentado pelo GRUBB; MEYER, 1993 APUD RAMOS, F. G., SEIDLER, N., 2011 onde realçou que, normalmente para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que a sua densidade seja maior ou igual a  $500 \text{ W/m}^2$ , a uma altura de 50 m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s.

Fluxo de energia cinética.

$$P_{disp} = \frac{\Delta W_c}{\Delta t} = \frac{1}{2} * \rho_{ar} * V_1^3 * \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2.2)$$

Apesar das influencias que o vento sofre ao longo do seu percurso na terra, RAMOS, F. G., & SEIDLER, N., 2011 notaram que a quantidade de energia disponível no vento pode-se variar de acordo com as estações do ano e as horas do dia e reforçou que a topografia e a rugosidade do solo também têm grande influência na distribuição de frequência de ocorrência dos ventos e de sua velocidade em um local.

## **2.2 Turbinas eólicas**

Conforme NETO, F. DE A. T., 2010, a turbina eólica é uma máquina que tem como função de concentrar a parte da potência cinética do vento através de um rotor eólico, transformando em potência mecânica de eixo e por fim o gerador transforma em potência elétrica, nessa mesma linha do raciocínio os autores DA PURIFICAÇÃO, L.S.; FONTE, R. B. D., 2012, argumentam que uma turbina eólica é composta por três componentes principais que são: o rotor com as pás, o nacele e a torre.

### **2.2.1 Rotor com pás**

Segundo RODRIGUES, P.B., 2011 o rotor é o responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação, isto vem ao encontro dos autores DOS SANTOS, A. A., ET ALL 2006, que concluíram que o rotor é o componente mais característico de um sistema eólico, ainda consideraram que por este motivo, a configuração do rotor influenciará diretamente no rendimento global do sistema, conforme o RIBEIRO (2017, PAG.13) as turbinas eólicas modernas podem ser classificadas quanto à orientação do rotor em relação ao solo, essencialmente o rotor eólico pode ser classificado em dois grandes grupos que são: rotores de eixo horizontal e rotores de eixo vertical.

#### **2.2.1.1 Rotores de eixo horizontal**

Geralmente, os rotores de eixo horizontal são os mais comuns e grande parte da experiência mundial está voltada para a sua utilização, os eixos são movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (*lift*) e forças de arrasto (*drag*) DOS SANTOS, A. A., ET ALL 2006. A figura 2.1 ilustra uma turbina de eixo horizontal.

De acordo com JÚNIOR, F.D.M., 2009 os rotores de eixo horizontal é o mais trivial, desde a utilização até em comercialização mundial tendo em conta os seus desempenhos na geração eólica, RODRIGUES (2011, PAG.18), por seu lado afirmou que esta determinação necessita de uma estrutura que permita o posicionamento do eixo do rotor em relação a direção do vento, para a melhor evolução global, sobretudo onde tem muita mudança na direção dos ventos.

As pás do rotor têm como função de capturar a energia do vento e a convertem em energia rotacional no eixo conforme DA PURIFICAÇÃO, L.S.; FONTE, R. B. D., 2012, o NETO, (PAG. 30, 2012), concluiu-se que apesar de vários tipos de modelos de pás, a mais comum é do tipo três pás.

Figura 2.1: O rotor de eixo horizontal.

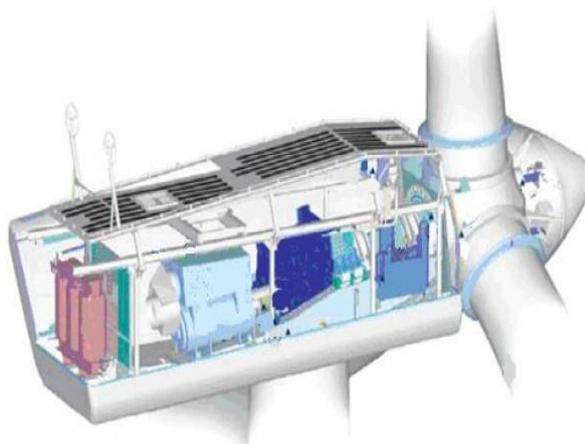


Fonte: DUTRA, 2008

### **2.2.2 Nacele**

Relativamente ao componente nacele, o DA PURIFICAÇÃO, L.S.; FONTE, R. B. D., 2012 definiu-se nacele como a carcaça, que abriga a caixa de engrenagens, o gerador, a unidade de controle eletrônico, o controlador e os freios, o NETO (PAG.32, 2010) por sua vez compactuou-se com essa ideia e realçou que o gerador, a caixa de engrenagem, todo o sistema de controle, entre outros ficam localizados no nacele que é uma caixa que é sustentada pela torre, a figura 2.2 ilustra uma nacele com o gerador.

Figura 2.2: O nacele com gerador convencional e vários componentes no interior.



Fonte: NETO, 2010

### **2.2.3 A torre**

De acordo com HANSEN, 2016 APUD CASER, E. S.; PAIVA, G. DA M., 2016 considerou que, a torre é o responsável para sustentação da nacela e as pás do rotor ou seja a nacela e as pás do rotor são suportadas pela torre, este aspecto também é comentado por FONTE E DA PURIFICAÇÃO (PAG. 35 , 2010), na qual considerou-se a torre como responsável de amparar o rotor e a nacela, além de erguer todo o conjunto a uma altura onde as pás possam girar com segurança e distantes do solo, o NETO, F. DE A. T., 2010 concluiu-se que a torre é o componente responsável pela sustentação do rotor a uma altura para que haja o seu bom funcionamento, portanto está sujeito a vários tipos de esforços.

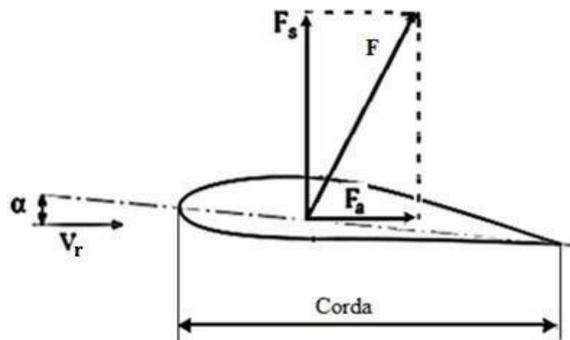
## **2.3 Potência de uma turbina eólica**

De acordo com (Lopez, R.A., 2013), os ventos incidem sobre as pás de uma turbina eólica, provoca o aparecimento de uma força de arraste, que agira perpendicularmente à superfície da pá empurrando-a.

Segundo a FADIGAS, E.A.F.A., 2011, definiu a força de arraste como a força experimentada por um objeto, imerso em um fluxo de ar, e que está alinhada com a direção do fluxo de ar, é calculada conforme equação 2.3.

Além da força de arraste, existe uma outra força que participa nesse processo que é a força de sustentação, conforme HANSEN, 2008 APUD QUINTAS, B.J., 2016 a força de sustentação é responsável pela produção de um torque positivo aplicado ao eixo de rotação, resultando em potência mecânica que, posteriormente, é convertida em potência elétrica por meio de um gerador elétrico.

Figura 2.3: Forças de sustentação e de arraste como resultado da ação do vento.



FONTE: ADAPTADO DE (BURTON,2007 APUD QUINTAS,2016)

Equação de Força de arraste.

$$F_a = \frac{1}{2} * \rho * C_a * A * v^2 \quad (2.3)$$

Equação de força de sustentação.

$$F_s = \frac{1}{2} * \rho * C_s * A * v^2 \quad (2.4)$$

Segundo (HEIER, 1998 APUD VIEIRA, J.P.A. ET AL ,2007) a potência mecânica é calculada pela seguinte expressão:

Equação da potência mecânica.

$$P_{mec} = \frac{1}{2} * \rho * C_p(\lambda, \beta) * \pi r^2 * V_w^3 \quad (2.5)$$

Para o VIEIRA, ET AL (2007), considerou que a obtenção de  $C_p$  em uma determinada velocidade de vento, o rotor da turbina deve ser controlado, girando a uma velocidade angular que resulte na razão entre a velocidade da ponta da pá e a velocidade do vento, conforme o IVANQUI J., 2014 enalteceu que o *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ), é um parâmetro de controle de condição e é representada pela seguinte equação 2.6:

$$\lambda = \frac{r \cdot \omega}{V_w} \quad (2.6)$$

Segundo o IVANQUI (2014), o coeficiente de potência  $C_p(\lambda, \beta)$  indica o rendimento com que a turbina eólica transforma energia cinética contida nos ventos em energia cinética de rotação, porém, o HEIER, 1998 APUD IVANQUI 2014, concluiu que a partir do modelo sugerido por Heier, o coeficiente de potência é dado pelas equações 2.7 e 2.8:

A equação o coeficiente de potência em função de  $(\lambda, \beta)$ .

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 * \left( \frac{C_2}{\lambda^i} - C_3 * \beta - C_4 \right) * e^{\frac{C_5}{\lambda^i}} + C_6 * \lambda \quad (2.7)$$

A equação o coeficiente de potência em função de  $(\lambda, \beta)$

$$\lambda^{i-1} = \frac{1}{\lambda + 0,08 * \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (2.8)$$

De acordo com o (ROCHA, M. A., 2018), para a determinação dos conjuntos de valores das constantes de  $C_1$  à  $C_n$ , dois modelos são propostos, o primeiro deles é mostrado em (HEIER, 2006) e o segundo em (SLOOTWEG, 2003). As variáveis  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  e  $C_6$  são encontrados na figura em baixo:

Figura 2.4: Valores para aproximação das curvas do coeficiente de potência.

Modelos	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$
Heier	0,5	116	0,4	0	0	5	21	0,0068	0,08	0,035
Slootweg	0,73	151	0,58	0,002	2,14	13,2	18,4	0	-0,02	-0,03

Fonte: ROCHA (2018)

## 2.4 Qualidade de energia

Segundo (PADILLA, J.V.,2008), o conceito de boa qualidade de energia está intimamente ligado ao funcionamento adequado e sem falhas das cargas elétricas existentes em um sistema elétrico, consoante (BIGON, L. C.,2007), os sistemas elétricos estão sujeitos à interrupções provocadas por “causas naturais” bem como pela falta de manutenção preventiva, conseqüentemente causam deficiência na qualidade de energia fornecida pela concessionária, a mesma ideia é exposta por (E SILVA, I.M.,2012), onde reforçou que um sistema elétrico com qualidade é aquele que possui a tensão com a sua amplitude e forma de onda bem confinante executável de um parâmetro ideal e adequado, sem alterações em amplitude, frequência ou fase, PADILLA (2008), concluiu que as tensões e as correntes resultantes no sistema devem apresentar formas de onda o mais próximo possível da curva senoidal com frequência de 60 Hz.

Conforme (AFONSO, J.L.; MARTINS J.S.,2004), considerou que entre os problemas de qualidade de energia elétrica, a interrupção do fornecimento é, indiscutivelmente, o mais fatal, uma vez que prejudica todos os equipamentos ligados à rede elétrica, no entanto, segundo (IVANQUI J.,2014) os problemas de qualidade de energia ocorrem, devido a vários tipos de distúrbios elétricos existentes.

Para manter uma boa qualidade de energia, a principal preocupação é de que não houvesse interrupções no fornecimento da energia, porém, as tensões e frequência devem ser mantidas dentro de determinados limites considerados aceitáveis dependendo da norma local (AFONSO, J.L.; MARTINS J.S.,2004).

Os problemas de qualidade de energia são definidos como qualquer perturbação ou distúrbio ocorridos nos níveis de tensão, corrente ou variações de frequência na energia fornecida (HADDAD, 2004 APUD ALMEIDA, D.DE F. U.,2017), de acordo com (LOPEZ, R. A.,2013) afirmou que os distúrbios elétricos são eventos que podem ser medidos ou registrados por instrumentos utilizados para monitorar sistemas elétricos (voltímetros de precisão que podem medir magnitudes e polaridades de voltagens instantâneas). Os distúrbios elétricos são responsáveis pela má qualidade de energia verificado em qualquer sistema elétrico, existe vários tipos de distúrbios entre os quais podemos elencar alguns na tabela abaixo:

Tabela 2.1: A definição de distúrbios no sistema de potência.

Distúrbio	Definição
Interrupção	Intensidade da tensão é zero.
Subtensão	Intensidade da tensão é abaixo do seu valor nominal.
Afundamento de tensão	A redução no valor eficaz de tensão é na faixa de 0,1 a 0,9 pu para uma duração maior do que 10 ms, porém inferior a 1 s.
Elevação de tensão	O incremento no valor eficaz de tensão é na faixa de 1,1 a 1,8 pu para uma duração maior do que 10 ms, porém inferior a 1 s.
Oscilação (flicker)	Efeito visual da variação na frequência da tensão de um sistema.
Tensão ou corrente desbalanceada	Variação na intensidade da tensão ou corrente em qualquer uma ou duas das três fases.
Transientes	Aumento repentino no sinal
Harmônicas	Formas de ondas não senoidais

FONTE: IVANQUI (2014)

Neste trabalho será abordado a qualidade de energia envolvendo o distúrbio de afundamento de tensão no sistema eólico conectado à rede elétrica.

#### **2.4.1 Afundamentos de tensão**

O afundamento de tensão é um evento de curta duração em que o valor eficaz da tensão é superior ou igual a 0,10 p.u. e inferior a 0,90 p.u. em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado durante o intervalo de tempo de um ciclo (16,67 ms) a um minuto (ALVES, M.F.; COSTA, J. G.D., 2003).

Conforme (BOLLEN, 2000 APUD IVANQUI J.,2014), sustentou que afundamentos de tensão são reduções de curta duração de seu valor eficaz causados por: curto-circuito, sobrecarga ou partida de grandes motores, consoante o (AFONSO, J.L.; MARTINS J.S.,2004), o afundamento de tensão (*voltage sags*) também conhecido por subtensão momentânea ou cava de tensão pode ser provocada, por um curto-circuito momentâneo num outro

alimentador do mesmo sistema elétrico, que é eliminado após alguns milissegundos pela abertura do disjuntor do ramal em curto.

Baseando em todos os análises de afundamento de tensão, (ALMEIDA, D.DE F. U.,2017), concluiu que os eventos de afundamentos de tensão ocorrem quando a tensão reduz abaixo do seu limite máximo e termina quando retorna ao seu valor normal de regime.

#### 2.4.2 Normas sobre o afundamento de tensão

Por meio da norma americana IEEE Std. 1159 (1995) que trata da monitoração dos fenômenos de qualidade de energia, define afundamento de tensão como sendo a redução do valor RMS da tensão para um valor entre: 0,1 e 0,9 pu, durante o período compreendido entre: 0,5 e 30 ciclos (IEEE. . . , 1995 APUD IVANQUI, J.,2014), o (LOPEZ, R. A.,2013), afirmou que na norma, os tempos de duração de afundamentos de tensão estão classificados em três categorias: instantâneo, momentâneo e temporário (de acordo com a figura a seguir):

Figura 2.5: Denominações dos distúrbios segundo a norma americana e suas faixas de magnitude e duração.

Classificação	Denominação	Duração do Evento	Amplitude do Evento
Variações de Curta Duração (Short duration variations)	Afundamento Instantâneo (Instantaneous sag)	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
	Elevação Instantânea (Instantaneous swell)	0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
	Interrupção Momentânea (Momentary Interruption)	0,5 ciclo– 3 segundos	< 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo (Momentary sag)	30 ciclos – 3 segundos	0,1 – 0,9 pu
	Elevação Momentânea (Momentary swell)	30 ciclos – 3 segundos	1,1 – 1,4 pu
	Interrupção Temporária (Temporary Interruption)	3 segundos – 1 minuto	< 0,1 pu
	Afundamento Temporário (Temporary sag)	3 segundos – 1 minuto	0,1 – 0,9 pu
Variações de Longa Duração (Long duration variations)	Elevação Temporária (Temporary swell)	3 segundos – 1 minuto	1,1 – 1,2 pu
	Interrupção Sustentada (Interruption sustained)	> 1 minuto	0,0 pu
	Subtensão (Undervoltage)	> 1 minuto	0,1 – 0,9 pu
	Sobretensão (Overvoltage)	> 1 minuto	1,1 – 1,2 pu

FONTE: DECKMANN, S.M.; POMILIO, J. A. ,2017

Para (LOPEZ, R. A.,2013), a magnitude do afundamento de tensão é expressa como uma porcentagem do valor nominal. A expressão “um

*fundamento de tensão para 80% do nominal” em um sistema de 120 V RMS refere-se a uma redução para 96 V RMS, conclui-se que o fundamento de tensão é transitório (ocorrência momentânea) e apresenta excursão do sinal de tensão num período mais curto do que a sobretensão e a subtensão.*

### **2.4.3 Valores característicos do afundamento de tensão**

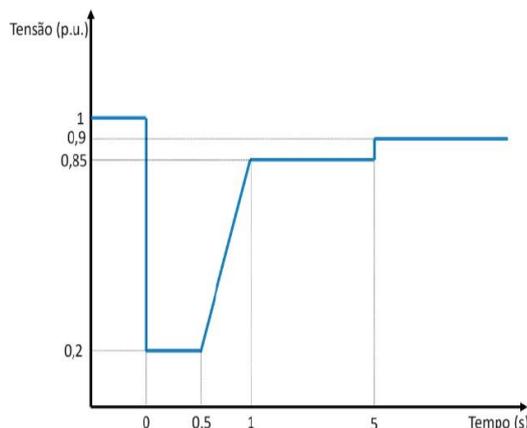
Consoante o (IVANQUI, J.,2014), salientou que os afundamentos de tensão são concebidos no sistema elétrico através da partida de motores de grande porte, energização de transformadores e ocorrência de curtos-circuitos na rede elétrica, ainda o IVANQUI aprofundou que entre os problemas causados por afundamentos de tensão, pode-se destacar por exemplo, os produzidos em cargas industriais sensíveis, como os equipamentos que possuem dispositivos microprocessado.

### **2.4.4 A curva de suportabilidade**

De acordo com (MATOS, F.F.V.,2012) Uma das primeiras formulações de requisitos relacionados a suportabilidade frente a afundamento de tensão para aerogeradores foi estabelecida na Alemanha, em 2003, pela companhia E.On, para o (ABDALA, P. J. P., 2019), afirmou que nos códigos de rede atuais, se faz necessário que o aerogerador continue conectado à rede mesmo durante um afundamento de tensão, entretanto a fig. 2.7 mostra a curva de suportabilidade de aerogeradores para o código brasileiro.

Com o grande crescimento dos parques eólicos em todo o mundo, estudos estão sendo feitos visando à integração de aerogeradores com a rede elétrica em termos de oscilações do vento e o comportamento destes aerogeradores frente a afundamentos de tensão na rede elétrica (VICENZI, A. L. G., 2013).

Figura 2.6: A curva de suportabilidade. de aerogeradores a afundamentos de tensão.

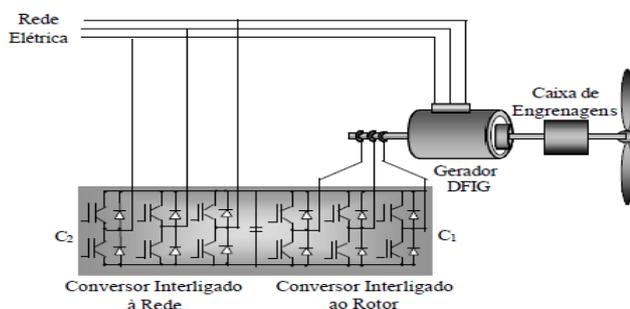


Fonte: ONS, 2009 APUD ABDALA, 2019

### 3 O GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO

O gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) possui o estator conectado diretamente à rede elétrica e o circuito do rotor é alimentado por meio de dois conversores de potência conectados na configuração *back-to-back* conforme está ilustrado na fig. 3.1 (ROCHA, M. A.,2018).

Figura 3.1:Gerador de indução duplamente alimentado.



FORNTE:(ROSA; BOLSON; MORAES, 2013)

#### 3.1 Funcionamento do gerador dfig

No gerador *DFIG* o rotor e o estator são responsáveis da geração da energia elétrica, o estator está diretamente conectado à rede por meio do transformador, enquanto o rotor é conectado à rede por meio de conversores CA/CC, em configuração *back-to-back*, ou seja, permitem fluxo de potência bidirecional (MEDEIROS, A. S. D., 2020).

De acordo com (ZAMPERIN J. L. B., 2011) a potência ativa nos terminais do rotor depende do escorregamento e da potência ativa nos terminais do estator, porém o gerador *DFIG* entrega a potência ativa à rede em duas regiões de velocidade (sub-síncrona e super-síncrona) que são proporcionadas pelo rotor e o estator.

Conforme (SODRÉ, E., CAVALCANTI, J., ET ALL, 2005), as relações entre as potências mecânicas, do rotor e do estator, desprezando-se as perdas são calculadas através das equações 3.1, 3.2 e 3.3:

Equação de potência entregue pelo rotor.

$$P_{r'} = -s P_{s'} \quad (3.1)$$

Equação de potência mecânica entregue ao gerador.

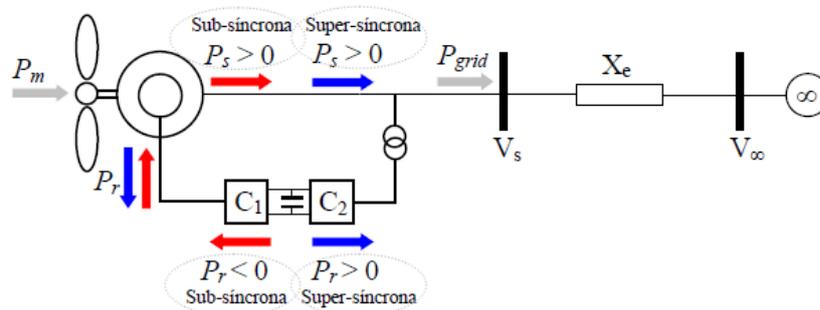
$$P_m = (1 - s) P_{s'} \quad (3.2)$$

Equação de potência total gerada e entregue para a rede.

$$P_g = P_{r'} + P_{s'} \quad (3.3)$$

O funcionamento do *DFIG* é ilustrado na figura 3.2. Segundo ZAMPERIN J. L. B., 2011 a velocidade sub-síncrona é quando a velocidade do rotor da máquina é menor que a velocidade síncrona da rede, o escorregamento é positivo ( $s > 0$ ), o fluxo da potência será da rede para o rotor ( $P_{rotor} < 0$ ) nesse caso o rotor da *DFIG* está absorvendo a potência da rede, ainda considerou a velocidade super-síncrona quando a velocidade do rotor é maior que a velocidade síncrona da rede, o escorregamento é negativo ( $s < 0$ ), a potência será fornecida à rede simultaneamente pelo rotor através dos conversores e pelo estator.

Figura 3.2: Funcionamento da velocidade sub-síncrona e super-síncrona no sistema.



Fonte: ZAMPERIN (2011)

### 3.2 Modelagem da máquina de indução duplamente alimentada

De acordo com (KRAUSE, 2002 APUD AVILA, M.R.V., 2014), o modelo da máquina de indução de dupla alimentação é dado pelo modelo da quinta ordem demonstrado em termos das derivadas do fluxo magnéticos de estator e o rotor nos sistemas de coordenadas  $dq$  e no referencial síncrono em  $pu$  com quaisquer variáveis do rotor referenciadas ao circuito do estator.

Conforme (Silva, R. F., 2012), a dinâmica de velocidade do eixo do gerador é obtida da diferença dos torques mecânicos e eletromagnéticos no eixo do gerador, esta dinâmica é determinada pela 1ª lei de Newton do movimento rotacional.

Segundo (AVILA, M.R.V., 2014) a tensão e corrente do estator e rotor no sistema de coordenadas  $dq$  são definidas pelas equações abaixo, a dedução feita para chegar nessa equação é comentada pela (TAVARES, C. L., 2013), na qual afirmou que através da matriz de transformação de referencial  $abc$  para referencial  $\alpha\beta$  permite reescrever as equações diferenciais da máquina de indução, conforme (EL-SHARKAWI, 2016 APUD DE MEDEIROS A. S.D., 2020), reforçou que o estudo do desempenho dinâmico transitório das grandezas elétricas do DFIG é realizado, habitualmente, em um referencial síncrono a partir da transformada de Park, conveniente à maior naturalidade matemática quando comparado às equações diferenciais do protótipo trifásico resultando nas equações 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7.

Equação de tensão do estator (pu)

$$V_{dqS} = V_{ds} + jV_{qs} \quad (3.4)$$

Equação de tensão do rotor (pu)

$$V_{dqr} = V_{dr} + jV_{qr} \quad (3.5)$$

Equação de corrente do estator (pu)

$$I_{dqS} = I_{ds} + jI_{qs} \quad (3.6)$$

Equação de corrente do rotor (pu)

$$I_{dqr} = I_{dr} + jI_{qr} \quad (3.7)$$

De acordo com AVILA (PAGINA 29, 2014) concluiu que o conjunto de equações diferenciais (como mostra a equação 3.11,3.12,3.13 e 3.14), representa o modelo dinâmico da quinta ordem da máquina assíncrona, em função de fluxos magnéticos de estator e do rotor e da velocidade de rotação do rotor.

Conforme TAVARES (PAGINA 32, 2013), concluiu que as equações de fluxo de estator e de rotor são determinadas de seguinte forma:

Equação de fluxo de estator de eixo direto.

$$\lambda_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \quad (3.8)$$

Equação de fluxo de estator de eixo em quadratura.

$$\lambda_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \quad (3.9)$$

Equação de fluxo de rotor de eixo direto.

$$\lambda_{dr} = L_m I_{ds} + L_r I_{dr} \quad (3.10)$$

Equação de fluxo de rotor de eixo em quadratura

$$\lambda_{qr} = L_m I_{qs} + L_r I_{qr} \quad (3.11)$$

De acordo com TAVARES (2013), apresentou a equação do torque eletromagnético da máquina de indução de seguinte maneira:

Equação do torque eletromagnético.

$$T_e = \frac{3PL_m}{4L_r} * (\lambda_{dr} I_{qs} - \lambda_{qr} I_{ds}) \quad (3.12)$$

As equações mecânicas da máquina de indução e da velocidade angular do rotor permanecem inalteradas (TAVARES, C. L., 2013).

Equação mecânica da máquina de indução.

$$T_e - T_c = j * \frac{2}{p} * \frac{d}{dt} * w_r \quad (3.13)$$

Velocidade angular do rotor.

$$\frac{d}{dt} * \theta_r = w_r \quad (3.14)$$

Vários autores fundamentaram sobre a modelagem do sistema da geração da energia eólica, porém, segundo (ABAD ET AL., 2011 APUD ROCHA, M. A., 2018), salientou que as potências ativas e reativas do estator e do rotor podem ser definidas pelas equações 3.15, 3.16, 3.17, 3.18.:

Equação de potência ativa do estator.

$$P_s = \frac{3}{2} * (V_{ds} * i_{ds} + V_{qs} * i_{qs}) \quad (3.15)$$

Equação de potência reativa do estator.

$$Q_s = \frac{3}{2} * (V_{qs} * i_{ds} + V_{ds} * i_{qs}) \quad (3.16)$$

Equação de potência ativa do rotor.

$$P_r = \frac{3}{2} * (V_{dr} * i_{dr} + V_{qr} * i_{qr}) \quad (3.17)$$

Equação de potência reativa do rotor.

$$Q_r = \frac{3}{2} * (V_{qr} * i_{dr} + V_{dr} * i_{qr}) \quad (3.18)$$

Os detalhes da resolução das equações acima estão nos artigos citados em cada equacionamento.

### 3.3 Controle do DFIG

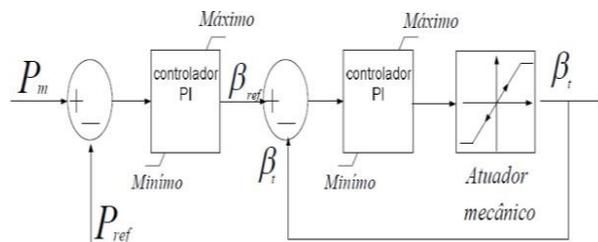
Conforme (RUEDA, O.S. ET ALL, 2019), apontou que o controle está composto por três componentes, que operam de forma separada: Controle do conversor do lado do gerador, controle do conversor do lado da rede e controle do ângulo de pitch.

#### 3.3.1 Controle do ângulo de pitch

Segundo (VOLTOLINI, H., 2007) o controle do ângulo de pitch é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do controlador do sistema, por outro lado o (ROCHA, M. A., 2018) reforçou que, sempre que a potência nominal do sistema eólico for superada, devido à ampliação das velocidades do vento, as pás do rotor serão giradas em torno de seu eixo longitudinal, alterando o ângulo de passo para estender o ângulo de ataque do fluxo de ar, entretanto, cabe citar o trabalho de (RUEDA, O.S. ET ALL, 2019) onde apontou que o controlador do ângulo de pitch tem como o objetivo de limitar a potência extraída pelo aerogerador dentro dos limites do sistema no caso de velocidades do vento superiores à nominal.

A figura 3.3 ilustra o controle atuando de modo a garantir que, se a potência gerada superar a potência de referência (que geralmente corresponde ao valor nominal do parque), o ângulo  $\beta$  aumente, de modo que a potência absorvida do vento diminua até que a potência gerada fique limitada ao valor demandado.

Figura 3.3: Diagrama de blocos do controle do ângulo de passo.



FONTE: SILVA (2012)

### 3.3.2 Controle do conversor do lado da rede (CLR')

Segundo (KIM ET AL., 2010; 2012 APUD IVANQUI, J., 2014), destacou que o principal objetivo do controle do conversor do lado da rede é manter a tensão no elo CC constante, conforme (TAVARES, C. L., 2013), para o conversor do lado da rede (CLR'), são atribuídas as seguintes funções: controlar a potência ativa que flui entre a rede e o conversor do lado da rede, de modo a controlar a tensão do barramento CC, e controlar a potência reativa injetada na rede pelo CLR'.

De acordo com (LIU, S. Y., 2011) realçou que através da transformada de Clark e Park, pode-se expressar as potencias ativa e reativa do gerador e pode-se escrever as potencias ativa e reativa controladas pelo CLR', referentes ao rotor da máquina. Resumidamente as equações da transformada são descritas a seguir, o detalhe da equação está na referência do autor Liu.

Equação de potência ativa, levando em consideração os eixos dq.

$$P_n = \frac{3}{2} (V_{gd}i_{nd} + V_{gq}i_{nq}) = \frac{3}{2} (V_g i_{nd}) \quad (3.19)$$

Equação de potência reativa, levando em consideração os eixos dq.

$$Q_n = \frac{3}{2} (V_{gq}i_{nd} - V_{gd}i_{nq}) = - \frac{3}{2} (V_g i_{nq}) \quad (3.20)$$

As tensões na rede e na saída do conversor, através do filtro indutivo pode ser escrita pela equação 3.21:

$$V_g = R_f i_n + L_f \frac{di_n}{dt} + V_n \quad (3.21)$$

Segundo (GRANZA, M. H., 2014) para encontrar as equações matemáticas dos conversores do lado da rede, é importante utilizar os conceitos de eixos de referência (eixo direto e eixo de quadratura “d e q”), utilizando os referidos eixos o nosso sistema permite estabelecer as equações de tensão em variáveis dq do lado da rede, a mesma linha do raciocínio é comentado pelo (Liu, 2011 p.31), realçou que se aplicar as transformadas de Clark e Park a equação 3.21 pode ser reescrito em dois termos, um para o eixo direto e outro para o eixo de quadratura “d e q” como mostra as equações 3.22 e 3.23:

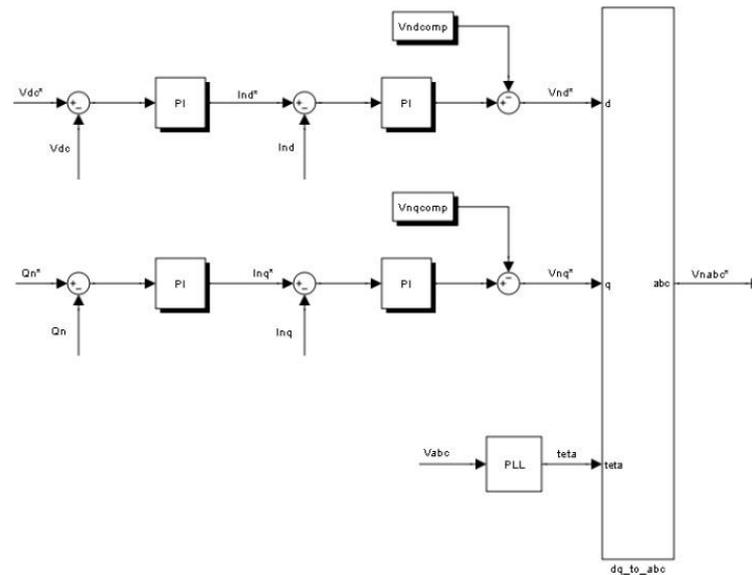
Equação de tensão do eixo d.

$$V_{nd} = -R_f i_{nd} - L_f \frac{di_{nd}}{dt} + V_{gd} + \omega_s L_f i_{nq} \quad (3.22)$$

Equação de tensão do eixo q.

$$V_{nq} = -R_f i_{nq} - L_f \frac{di_{nq}}{dt} + V_{gq} + \omega_s L_f i_{nd} \quad (3.23)$$

Figura 3.4: Diagrama de Blocos da Estratégia de Controle para a Rede.



Fonte: LIU (2011)

### 3.3.3 Controle do conversor do lado do rotor (CLR)

Segundo (ROCHA, A. C. A., 2017) apontou que, o conversor do lado do rotor (CLR) é responsável por controlar a produção deste torque e também o nível de potência reativa extraída do gerador conectado à turbina eólica, isto vem ao encontro de (KIM ET AL., 2010 E 2012 APUD IVANQUI, J., 2014) que realçou a relevância que o conversor do lado do rotor tem para o sistema eólico, no entanto, destacou que o principal objetivo do controle deste conversor é manter a tensão no elo CC constante.

Vale notar a contribuição de (TAVARES, C. L., 2013) no que diz respeito ao referido assunto, enfatizou que, para o conversor do lado do rotor, são concedidas as seguintes funções: controlar a velocidade da máquina, para garantir a operação no ponto de máxima potência (MPPT), e a potência reativa que flui do estator do gerador para a rede

Conforme (LIU, S. Y., 2011), o controle do CLR é realizado a partir das correntes de rotor, com as grandezas da máquina referidas ao rotor, orientadas na direção do vetor enlace de fluxo de estator, para a realização de controle é utilizada a transformada de Clark.

Equação da tensão do estator da máquina, orientada de acordo com o fluxo de estator:

$$V_s = R_s i_s + \frac{d}{dt} \lambda_s + j\omega_s \lambda_s \quad (3.24)$$

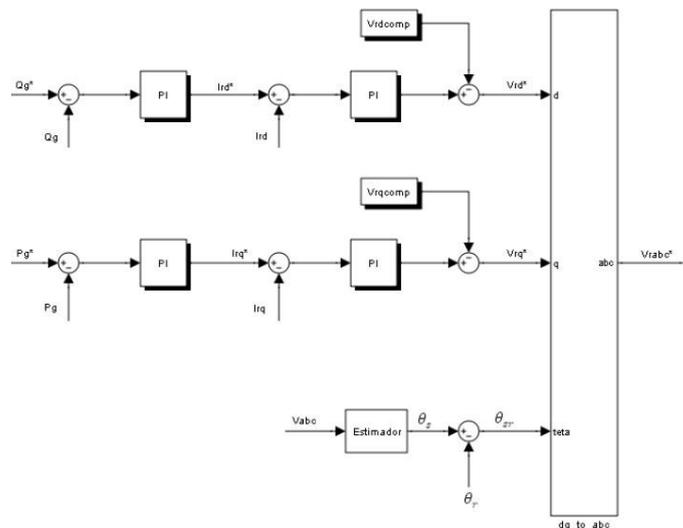
A equação 3.24 pode ser separada nos componentes d e q, os detalhes da equação se encontra no trabalho do LIU, S. Y., 2011.

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \lambda_{sd} \quad (3.25)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \lambda_{sq} \quad (3.26)$$

Segundo TAVARES, para facilitar o desenvolvimento das estratégias de controle para o conversor do lado do rotor, geralmente são utilizadas técnicas de controle vetorial, a mesma postura é defendida pelo (EL-HELW ET AL., 2008 APUD SANTANA, M. P., ET AL., 2012), na sua posição afirmou que existem duas formas mais usuais de se fazer o controle vetorial, a primeira é chamada de controle indireto, com a tensão de saída sendo controlada pelo fluxo do estator e a segunda é chamada de controle direto, onde a tensão é controlada pela própria tensão de saída do estator.

Figura 3.5: Representação do diagrama de blocos para o gerador.



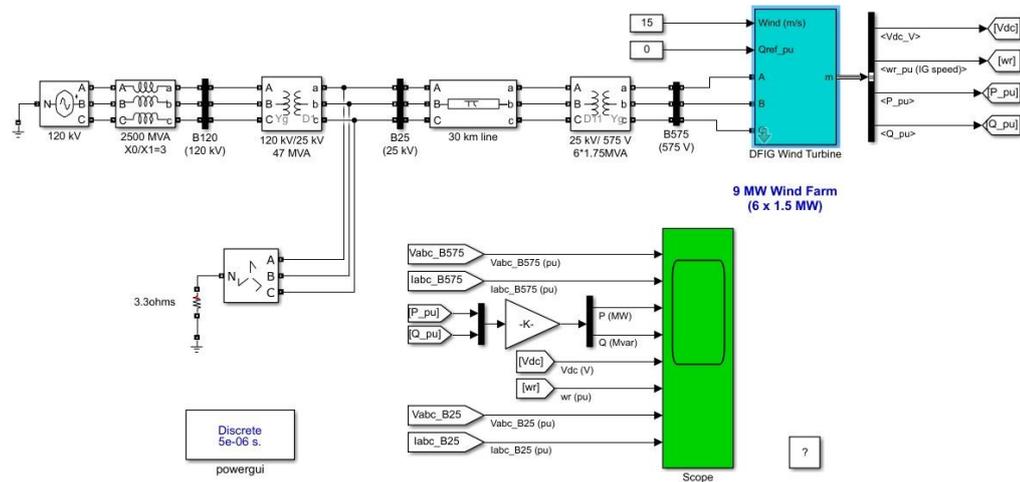
Fonte: LIU (2011)

## 4 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

## 4.1 Descrição do sistema

O Sistema usado nesse trabalho é composto por um gerador assíncrono *DFIG*, turbina eólica, conversores, controladores, linha de transmissão e transformadores.

Figura 4.1: Sistema DFIG e seus componentes.



Fonte: MATLAB

## 4.2 Simulação e resultados para o vento constante de 15 m/s e o vento variável “degrau” variando de 15 m/s a 17 m/s.

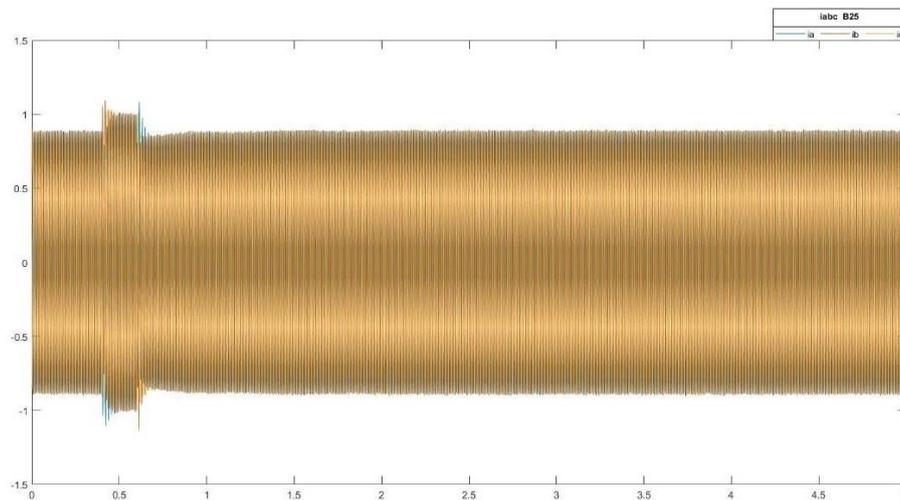
### 4.2.1 Afundamento de tensão de 15% e o vento constante de 15 m/s

As figuras 4.2 e 4.3 ilustram o comportamento da corrente trifásico no barramento B25 e no barramento B575, os referidos ações foi analisado em 5 segundos. As correntes entre as fases fornecida pelo sistema é de 0.8 pu, no gráfico constatemos o valor de corrente constante de 0.84 pu nos instantes 0s a 0.399s.

Conforme a parametrização do sistema, entre o tempo 0,4s a 0,6s haverá afundamento de tensão, porém, a partir desse instante o comportamento da corrente mudou completamente, essa mudança é causada pelo afundamento de tensão de 15% da tensão. O comportamento da corrente nos instantes 0,4s a 0,6s sofreu alteração, conseqüentemente a corrente aumentou de 0.84 pu para os valores simétricos de 1 pu, 1.01 pu, 1.05 pu até 1.1 pu, os comportamentos verificados é para ambas figuras. De acordo com o gráfico da figura 4.2 e 4.3, o desempenho do sistema fornece a corrente puramente senoidal com defasagem

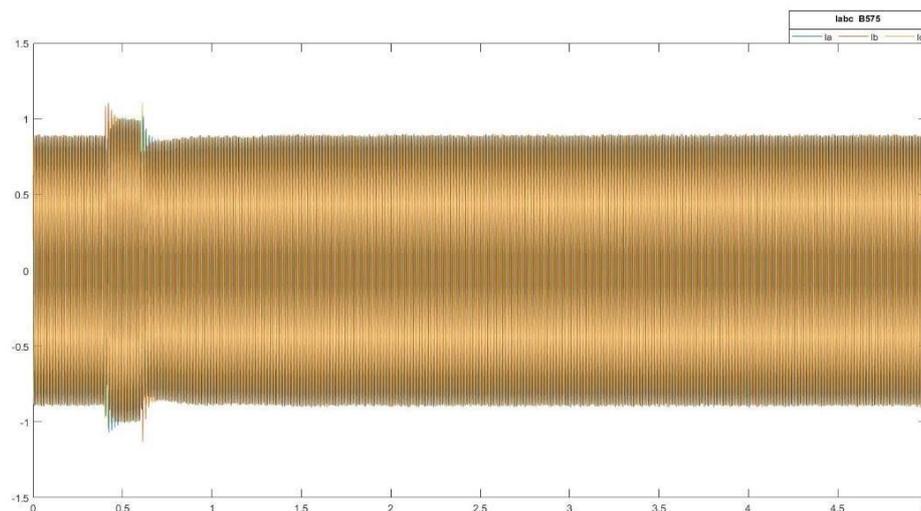
de  $120^\circ$  e o amplitude de 0.84 pu exceto os instantes 0,4s a 0,6s onde a amplitude máxima do valor é 1.1 pu. Após o afundamento de tensão de 15% o sistema se estabilizou no instante 1.50s para o B25 e 2s para o B575.

Figura 4.2: Corrente trifásico no barramento 25 do sistema com afundamento de tensão de 15%.



Fonte: Próprio autor (2022)

Figura 4.3: Corrente trifásico no barramento 575 do sistema com afundamento de tensão de 15%.

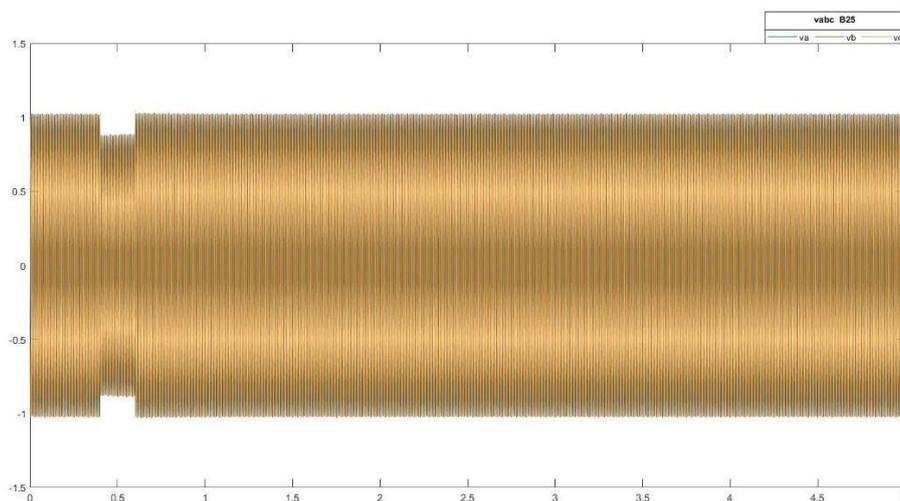


Fonte: Próprio autor (2022)

As figuras 4.4 e 4.5 ilustram o comportamento da tensão trifásico no barramento B25 e no barramento B575.

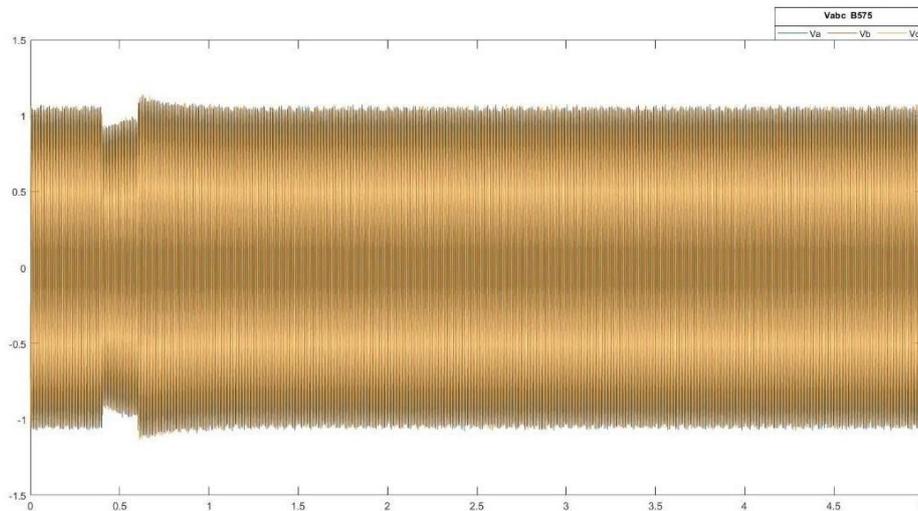
Conforme a parametrização do sistema, a partir do instante 0,4s a 0,6s o comportamento da tensão mudou e essa mudança é causada pelo afundamento de tensão de 15% da tensão fornecida pelo sistema. O comportamento da tensão nos instantes 0,4s a 0,6s alterou, nesses instantes a tensão diminuiu de 1 pu para 0.8 pu, os comportamentos verificados é para ambas figuras. De acordo com o gráfico da figura 4.4 e 4.5, o desempenho do sistema fornece a tensão puramente senoidal com defasagem de  $120^\circ$  e o amplitude de 1 pu exceto os instantes 0,4s a 0,6 onde a amplitude máxima do valor é de 0.8 pu. Após o afundamento de tensão de 15% o sistema estabilizou bem rápido no B25 logo no instante 0,61s, para o barramento 575 o sistema levou tempo maior para se estabilizar, isso aconteceu porque a tensão no B575 é bem maior em relação ao B25 de modo que a estabilidade da tensão demorou e levou um tempo maior da oscilação, o valor simétrico da tensão em todas as fases subiu até 1.2 pu depois de alcançar esse valor os números da tensão em cada fase começou a diminuir, procurando-se a estabilidade do sistema, mas, o sistema se estabilizou só no instante 1,5s.

Figura 4.4; Tensão trifásico no barramento 25 do sistema com afundamento de tensão de 15%.



Fonte: Próprio autor (2022)

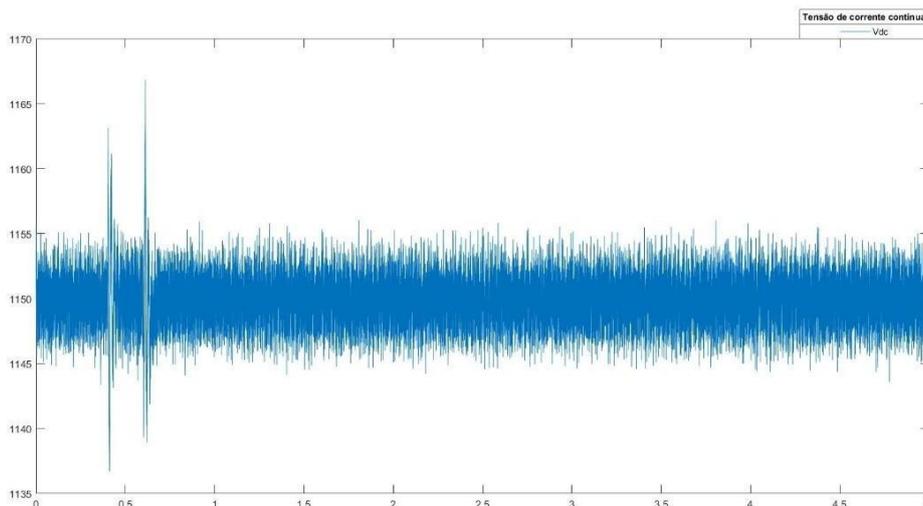
Figura 4.5: Tensão trifásico no barramento 575 do sistema com afundamento de tensão de 15%.



Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 4.6 ilustra a tensão no barramento CC no instante 0,4s a 0,6s a tensão da corrente contínua oscilou no intervalo dos valores abaixo de 1166,64 V e acima de 1136,63 V, isso aconteceu por causa do afundamento de tensão de 15% verificado naquele instante. Após os instantes 0,4s a 0,6s o sistema estabilizou e voltou a funcionar normal com os valores do começo.

Figura 4.6: Tensão no barramento com afundamento de tensão de 15%.

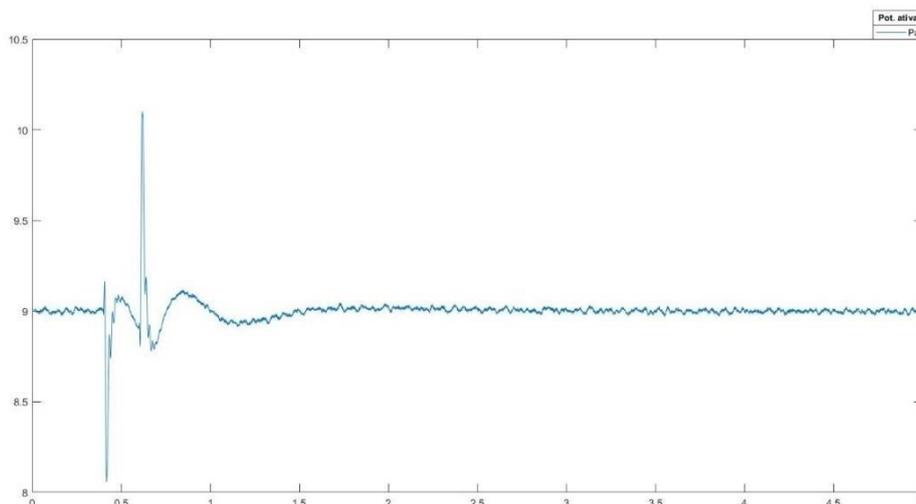


Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 4.7 ilustra o comportamento da potência ativa de 9 MW fornecido pelo sistema, conforme a figura existe oscilação da potência ativa entre os valores de 9.033 MW a 8.962 MW nos instantes 0s a 0,399s, a partir dos instantes 0,4s a 0,6s houve oscilação com  $P_a$  com valores bem grande na qual atingiu pico máximo de 10.1 MW e pico mínimo de 8.1 MW, a oscilação foi verificado no instante em que ocorreu afundamento de tensão de 15% da tensão fornecida pelo sistema. Após a esse instante a potência ativa continua oscilando e levou mais de 8s para estabilizar, para melhorar o tempo da estabilidade regulamos os ganhos do regulador da velocidade ( $K_p$  e  $K_i$ ) que tinham os valores 3 e 0.6, foram colocados novos valores para os ganhos que são 15 e 3.6, os novos valores do ganho proporcional e ganho integral facilitam bastante em obter a estabilidade do sistema em 3s.

A ação é analisada em 5 segundos, portanto o fornecimento da potência ativa pela nossa turbina eólica é considerado bom, apesar do afundamento de tensão verificado no sistema a potência ativa estabilizou-se e voltou no valor da referência (9MW) para alimentação da nossa linha de transmissão.

Figura 4.7: Potência ativa do sistema com afundamento de tensão de 15%.

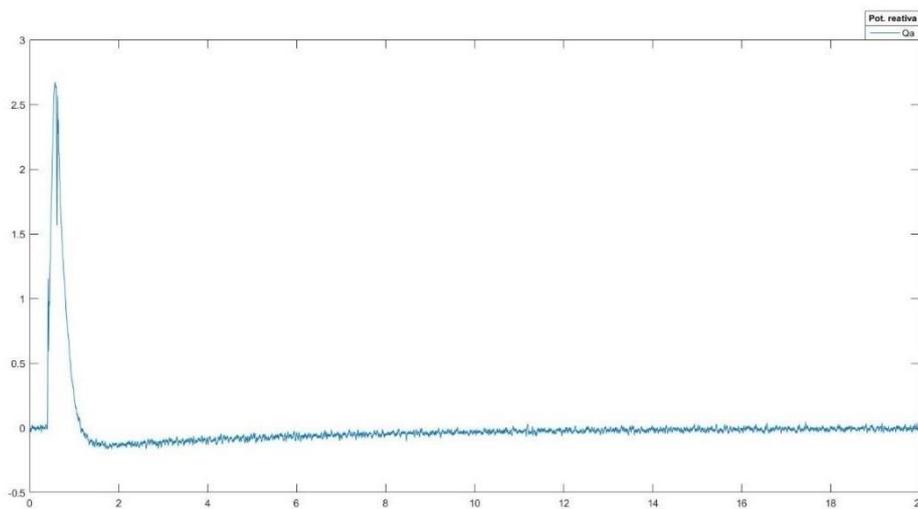


Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 4.8 ilustra o comportamento da potência reativa de 0.059 VAR a -0,041 VAR nos instantes 0s a 0,399s, após esses instantes, ocorreu o afundamento de tensão nos tempos 0,4s a 0,6s conforme parametrização do

sistema. No momento em que ocorreu o afundamento de tensão houve oscilação da potência reativa, porém ganhou um valor alto de 2.7 VAR, a ação é analisada em 5 segundos, após o tempo do afundamento o sistema ganhou um valor bem baixo de -1.5 VAR, esse valor começou a subir lentamente até no tempo 18.9s. Entretanto no tempo 19s o gráfico voltou a estabilidade de 0.059 VAR a -0,041 VAR conforme a parametrização do sistema.

Figura 4.8: Potência reativa do sistema com afundamento de tensão de 15%.



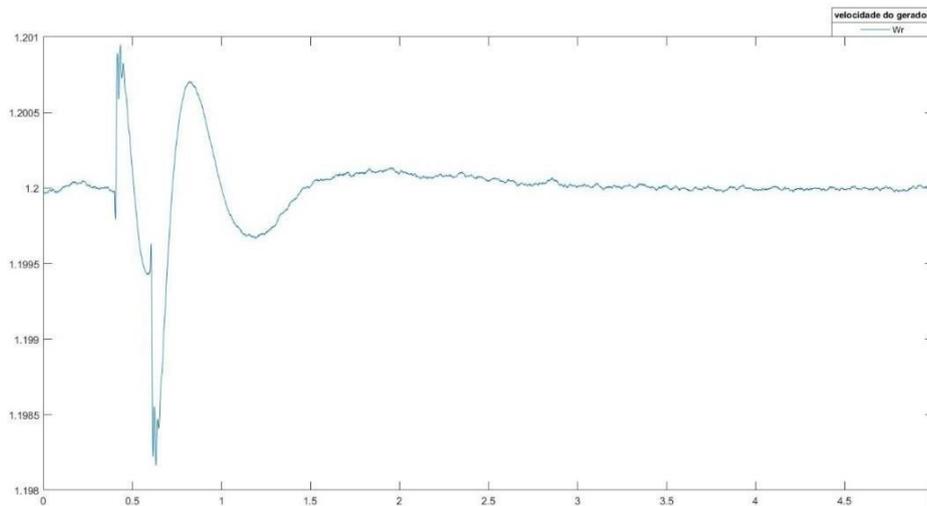
Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 4.9. o gerador começou a funcionar com a velocidade de 1.19993 pu e aumentou até no ponto da velocidade 1.200066 pu nos instantes 0s a 0.399s, nos instantes 0,4s a 0,6s houve distorção do comportamento mostrado no gráfico , essa distorção é causado pelo afundamento de tensão ocorrido nesse instante, no momento de afundamento de tensão a velocidade do gerador subiu para 1.2009 pu e baixou para 1.1982 pu. Após esse processo de afundamento de tensão o comportamento da velocidade do gerador continua a oscilar ganhando os valores no intervalo de 1.2007 pu a 1.1993 pu até nos instante 10s.

A velocidade do gerador ganhou a estabilidade no instante 4s depois da regulação dos ganhos do regulador da velocidade ( $K_p$  e  $K_i$ ) que tinham os valores 3 e 0.6, foram colocados novos valores para os ganhos que são 15 e 3.6. Conforme os dados do trem de acionamento para uma turbina eólica do nosso

o sistema foi parametrizado a velocidade nominal de 1.2 pu para cada gerador, o gráfico 4.9 nos mostrou exatamente o valor parametrizado nos primeiros 0s e 0,399s depois mostrou-se o valor da referência no tempo 4s, após o ajuste nos ganhos o gráfico passou a ser analisado em 5s.

Figura 4.9: Velocidade do gerador do sistema com afundamento de tensão de 15%.



Fonte: Próprio autor (2022)

Tabela 4.1: Tabela dos resultados do sistema com o vento constante (15m/s) e com afundamento de tensão de 15%.

Descrição	$I_{abc}$ (pu)		$V_{abc}$ (pu)		P(MW)	Q(VAR)	$V_{dc}$	$W_r$ (pu)
	B575	B25	B575	B25				
Valor real do sistema	0.8	0.8	1	1	9	0	/	1.2pu
Tempo de análise	5s	5s	5s	5s	5s	20s	5s	5s
Antes de A.T. (0s – 0.39s)	0.84	0.84	1.15	1.1	9.033	0.059	1156.2	1.200066
					à 8.962	à -0.041	à 1143.7	à 1.19993
A.T. (0.4s a 0.6s)	1 à	1 à	0.8	0.8	10.1	2.7	1166.64	1.2009
	1.05	1.05			à 8.1	À -1.5	à 1136.63	à 1.1982

Estabilidade	2s	1.5s	1.5s	0.61s	3s	19s	0.61s	4s
--------------	----	------	------	-------	----	-----	-------	----

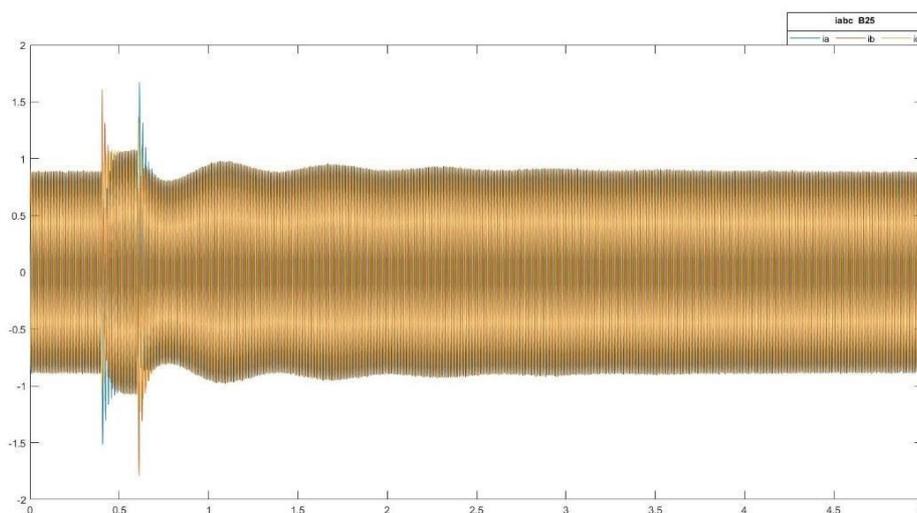
As figuras 4.10 e 4.11 ilustram o comportamento da corrente trifásico no barramento B25 e no barramento B575.

#### 4.2.2 Afundamento de tensão de 50% e o vento constante de 15 m/s

Conforme a parametrização do sistema, a partir do instante 0,4s a 0,6s o comportamento da corrente mudou e essa mudança é causada pelo afundamento de tensão de 50% da tensão fornecida pelo sistema. O comportamento da corrente nos instantes 0,4s a 0,6s sofreu alteração e dá pra ver claramente que a corrente deixou de ser 0.84 pu e ganhou novos valores no intervalo entre 1.7 pu a -1.8 pu no B25 e 1.65 pu a -1.8 pu no B575.

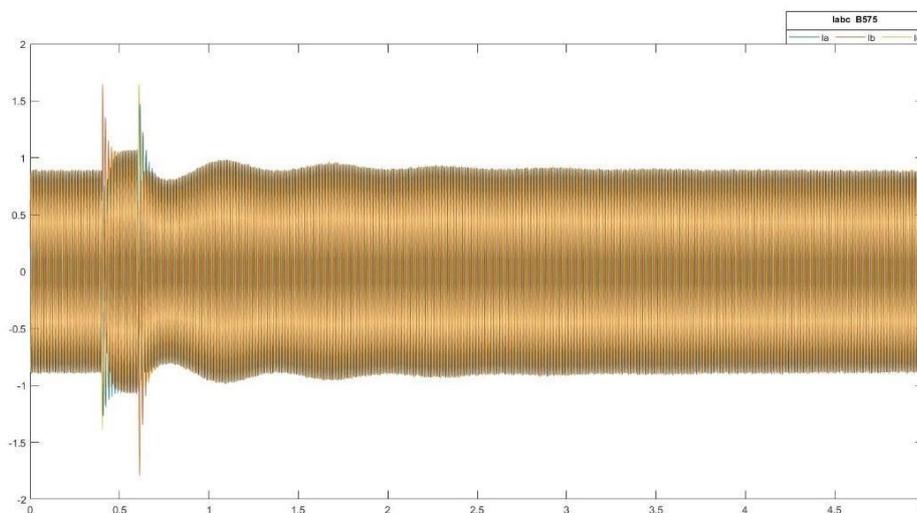
De acordo com o gráfico da figura 4.10 e 4.11, o desempenho do sistema fornece a corrente puramente senoidal com defasagem de  $120^\circ$  e o amplitude de 0.84 pu exceto os instantes 0,4s a 0,6s onde a amplitude ganhou novos valores. Após o afundamento de tensão de 50% o sistema não estabilizou, permaneceu na forma de onda com oscilação não estável até nos instantes 3,30s, a corrente nos barramentos 25 e 575 só estabilizou no instante 3,31s.

Figura 4.10: Corrente trifásico no barramento 25 do sistema com afundamento de tensão de 50%.



Fonte: Próprio autor (2022)

Figura 4.11: Corrente trifásico no barramento 575 do sistema com afundamento de tensão de 50%.



Fonte: Próprio autor (2022)

As figuras 4.12 e 4.13 ilustram o comportamento da tensão trifásico no barramento 25 e no barramento 575, os referidos ações foi analisado em 5 segundos. As tensões entre as fases fornecida pelo sistema no B575 e B25 é de 1 pu, mas no gráfico constatemos o valor de amplitude simétrico de tensão no B575 de 1.15 pu e no B25 averiguemos 1.1 pu, ambas nos instantes 0s a 0,399s.

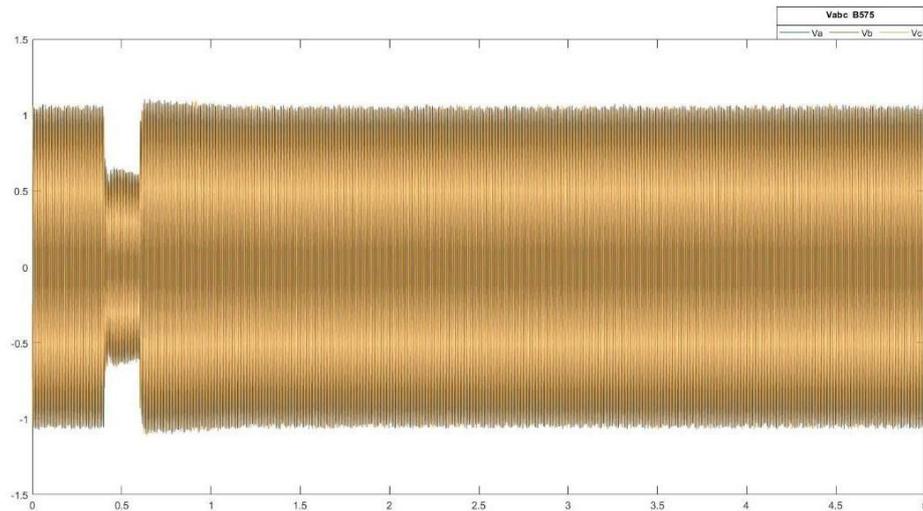
Conforme a parametrização do sistema, a partir do instante 0,4s a 0,6s o comportamento da tensão fornecido pelo sistema mudou, todavia, essa mudança é causada pelo afundamento de tensão de 50%. O comportamento da tensão nos instantes 0,4s a 0,6s alterou, nesses instantes a tensão diminuiu de 1.1 pu para tensão simétrico de 0.51 pu no B25 e de 1.15 pu para valores simétricos no intervalo de 0.7 pu a 0.65 pu no B575.

De acordo com o gráfico da figura 4.12 e 4.13, o desempenho do sistema fornece a tensão puramente senoidal com defasagem de  $120^\circ$ . No momento que ocorreu o afundamento de tensão de 50%, a fase c ( $V_c$ ) atingiu um valor de 1.5 pu no instante 0,6s, entretanto, mesmo com essa subida de tensão na fase c ( $V_c$ ) o sistema estabilizou bem rápido no B25 logo no instante 0,62s.

Para o B575 o sistema levou tempo maior para estabilizar, isso aconteceu porque a tensão no B575 é bem maior em relação ao B25 de modo que a

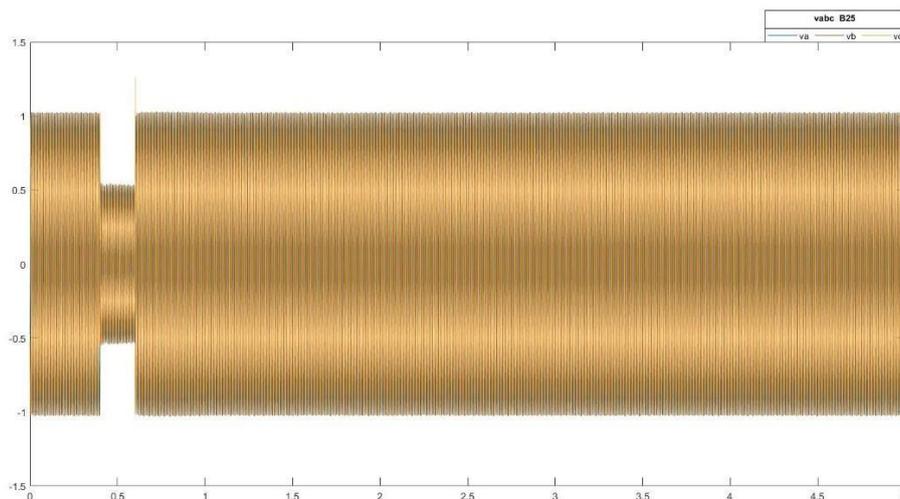
estabilidade da tensão demorou e levou um tempo maior da oscilação, o valor simétrico da tensão em todas as fases subiu até 1.15 pu depois de alcançar esse valor os números da tensão em cada fase começaram a diminuir, procurando-se a estabilidade do sistema, mas, o sistema se estabilizou só no instante 1,5s.

Figura 4.12: Tensão trifásico no barramento 575 do sistema com afundamento de tensão de 50%.



Fonte: Próprio autor (2022)

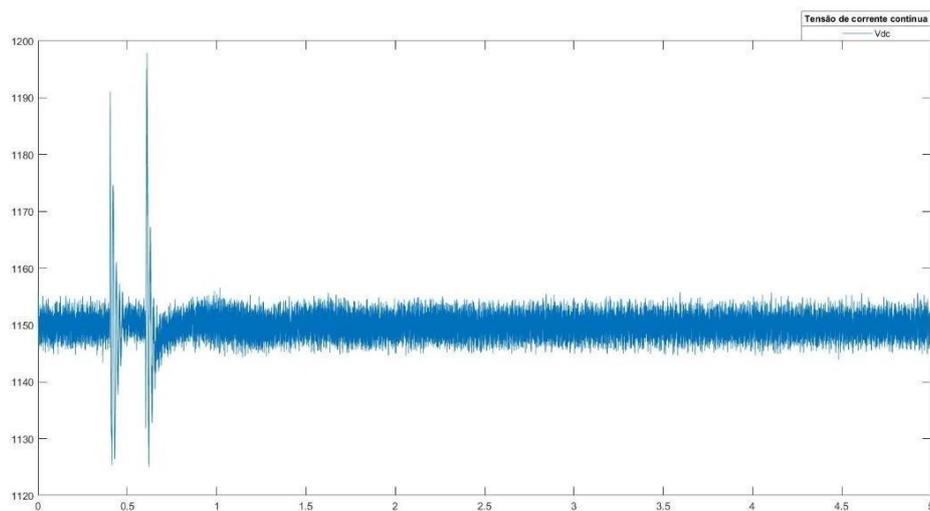
Figura 4.13: Tensão trifásico no barramento 575 do sistema com afundamento de tensão de 50%.



Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 4.14 ilustra a tensão no barramento CC.no instante 0,4s a 0,6s a tensão da corrente contínua oscilou no intervalo dos valores abaixo de 1198 V e acima de 1127 V, isso aconteceu por causa do afundamento de tensão de 50% verificado naquele instantes. Após os instantes 0,4s a 0,6s o sistema não estabilizou facilmente levou alguns segundos a oscilar, o sistema esbilizou-se no tempo 1,58s.

Figura 4.14: Tensão de corrente contínua do sistema com afundamento de tensão de 50%.



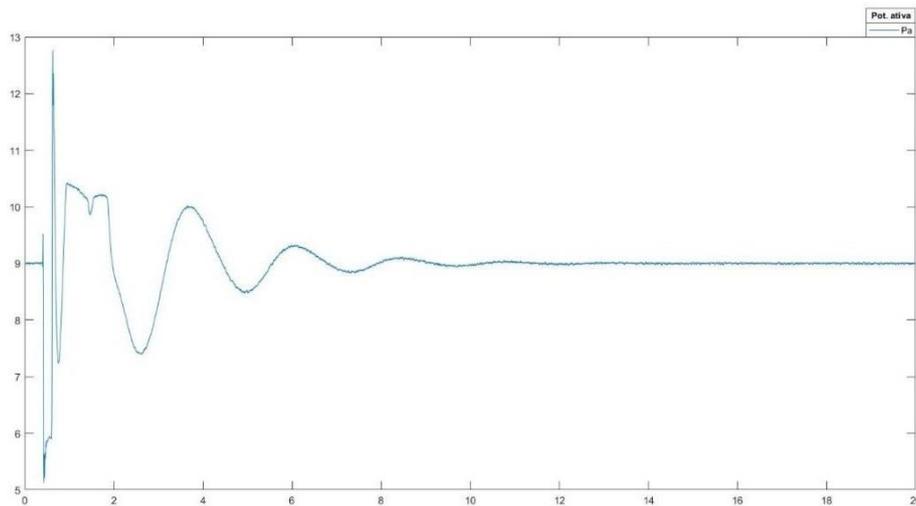
Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 4.15 ilustra o comportamento da potência ativa de 9 MW fornecido pelo sistema, conforme a figura existe oscilação da potência ativa entre os valores de 9.033 MW a 8.962 MW nos instantes 0s a 0,399s, a partir dos instantes 0,4s a 0,6s houve oscilação com os valores bem grande na qual atingiu pico máximo de 12.8 MW e pico mínimo de 5.15 MW, a oscilação e os valores verificada nesse instante ocorreu por causa do afundamento de tensão de 50% da tensão fornecida pelo sistema. Após a esse instante a potência ativa continua oscilando e levou um tempo acima de 27,3s para estabilizar.

Para melhorar o tempo da estabilidade ajustamos os ganhos do regulador da velocidade ( $K_p$  e  $K_i$ ) que tinham os valores 3 e 0.6. Foram colocados novos valores para os ganhos que são 18 e 30.6, os referidos valores do ganho proporcional e ganho integral facilitaram bastante em obter a estabilidade do sistema em 13,3s.

A ação é analisada em 20 segundos, portanto o fornecimento da potência ativa pela nossa turbina eólica é considerado bom, apesar do afundamento de tensão verificado no sistema a potência ativa estabilizou-se e voltou no valor da referência (9MW) para alimentação da nossa linha de transmissão.

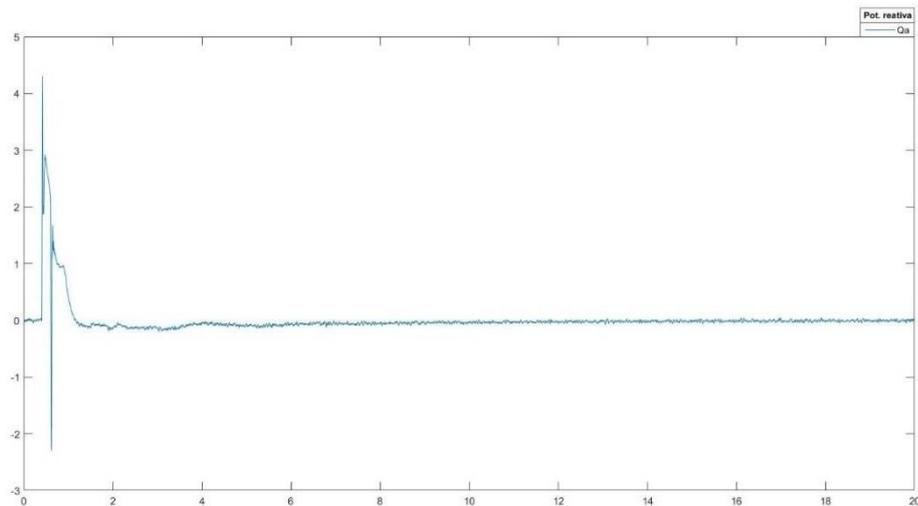
Figura 4.15: Potência ativa do sistema com 50% de afundamento de tensão.



Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 4.16 ilustra o comportamento da potência reativa oscilando entre 0.059 VAR a -0.041 VAR nos instantes 0s a 0,399s, após esses instantes, ocorreu o afundamento de tensão de 50% nos tempos 0,4s a 0,6s conforme parametrização do sistema. No momento em que ocorreu o afundamento de tensão houve oscilação da potência reativa, porém ganhou um valor alto de 4.3 VAR, a ação é analisada em 20 segundos, após o tempo do afundamento de tensão o sistema ganhou um valor mínimo de -2.2 VAR, esse valor começou a subir lentamente até no instante 18s. Entretanto no tempo 18,1s o gráfico voltou a estabilidade dos valores iniciais entre 0.059 VAR a -0.041 VAR.

Figura 4.16: Potência reativa do sistema com 50% de afundamento de tensão.

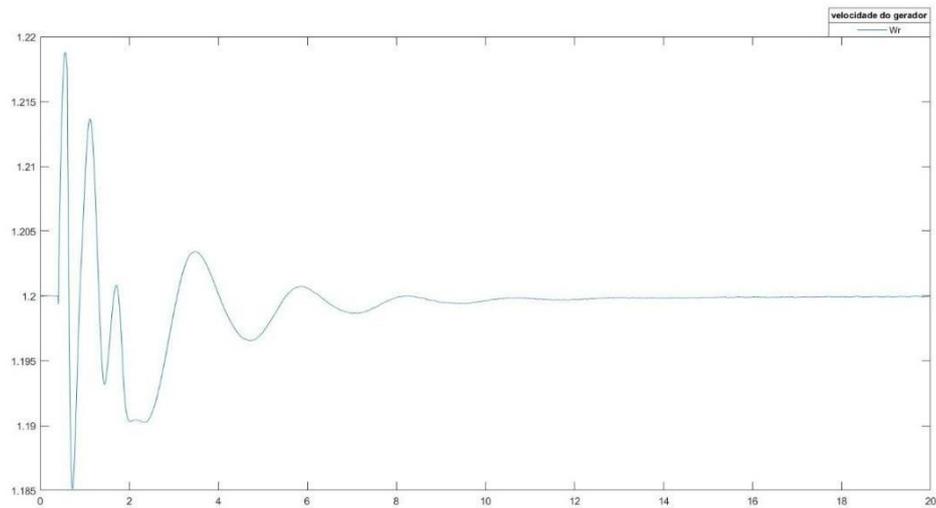


Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 4.17 o gerador começou a funcionar com a velocidade de 1.19996 pu e oscilou entre 1.19993 a 1.20006 nos instantes 0s a 0,399s, nos segundos 0,4 a 0,6 houve distorção no comportamento mostrado no gráfico, essa distorção é causada pelo afundamento de tensão de 50% ocorrido nesse instante, no momento de afundamento de tensão a velocidade do gerador subiu para 1.218 pu, depois dessa elevação a velocidade do gerador baixou para 1.185 pu. Após esse processo de afundamento de tensão o comportamento da velocidade do gerador continua a oscilar ganhando os valores no intervalo de 1.28 pu a 1.191 pu até nos instantes 12,9s.

A velocidade do gerador ganhou a estabilidade no instante 13s depois da regulação dos ganhos do regulador da velocidade ( $K_p$  e  $K_i$ ) que tinham os valores 3 e 0.6, foram colocados novos valores que são 18 e 30.6. Conforme os dados do trem de acionamento para uma turbina eólica do nosso sistema foi parametrizado a velocidade nominal de 1.2 pu para cada gerador, o gráfico 5.25 nos mostrou exatamente o valor parametrizado nos primeiros 0s e 0,399s depois passou pela fase de afundamento de tensão, após alguns segundos o sistema se estabilizou com o valor da referência exatamente no tempo 13s.

Figura 4.17: Velocidade do gerador do sistema com afundamento de tensão de 15%.



Fonte: Próprio autor (2022)

Tabela 4.2: Tabela dos resultados do sistema com o vento constante (15m/s) e com afundamento de tensão de 50%.

Descrição	$I_{abc}$ (pu)		$V_{abc}$ (pu)		P(MW)	Q(VAR)	$V_{dc}$	$W_r$ (pu)
	B575	B25	B575	B25				
Valor real do sistema	0.8	0.8	1	1	9	0	/	1.2pu
Tempo de análise	5s	5s	5s	5s	20s	20s	5s	20s
Antes de A.T. (0s – 0.39s)	0.84	0.84	1.15	1.1	9.033	0.059	1156.2	1.200067
					à 8.962	à -0.041	à 1143.7	à 1.19993
A.T. (0.4s a 0.6s)	1.65	1.7	0.7	0.51	12.8	4.3	1198	1.218
	à -1.8 (simét)	à -1.8 (simét)	à 0.55 (simét)		à 5.15	à -2.2	à 1127	à 1.185
Estabilidade	3.31s	3.31s	1.5s	0.62s	13.3s	18.1s	1.58s	13s

### **4.2.3 Afundamento de tensão de 15% e o vento variável “degrau” (variando de 15 m/s a 17 m/s)**

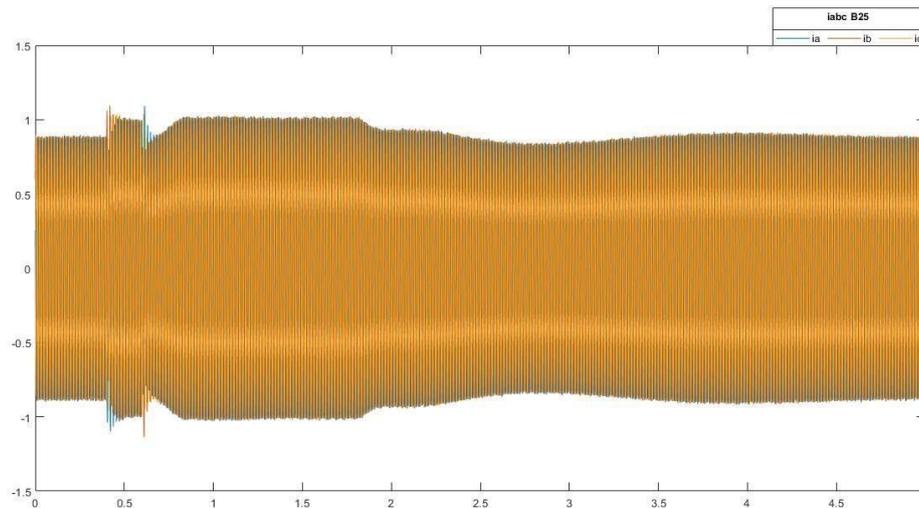
As figuras 4.18 e 4.19 ilustram o comportamento da corrente trifásico no barramento 25 e no barramento 575, os referidos ações foi analisado em 5 segundos e as correntes fornecida pelo sistema em cada fase é de 0.8 pu, e a defasagem é de 120°.

Conforme a parametrização do sistema, a partir do instante 0,4s a 0,6s haverá afundamento de tensão de 15% e a velocidade do vento começou a crescer de 15m/s para 17m/s no tempo 0,5s. O comportamento da corrente no B25 e B575 sofreram alteração, essa alteração é causada pelo afundamento de tensão e aumento da velocidade fornecida pelo sistema.

Na análise do gráfico constatamos o comportamento similar da corrente no B25 e B575; o valor da corrente iniciou-se de 0.8 pu e permaneceu constante nos tempos 0s a 0,39s, no instante 0,4s a corrente começou a crescer ganhando os valores maiores até que chegou à amplitude simétrico de 1.13 pu.

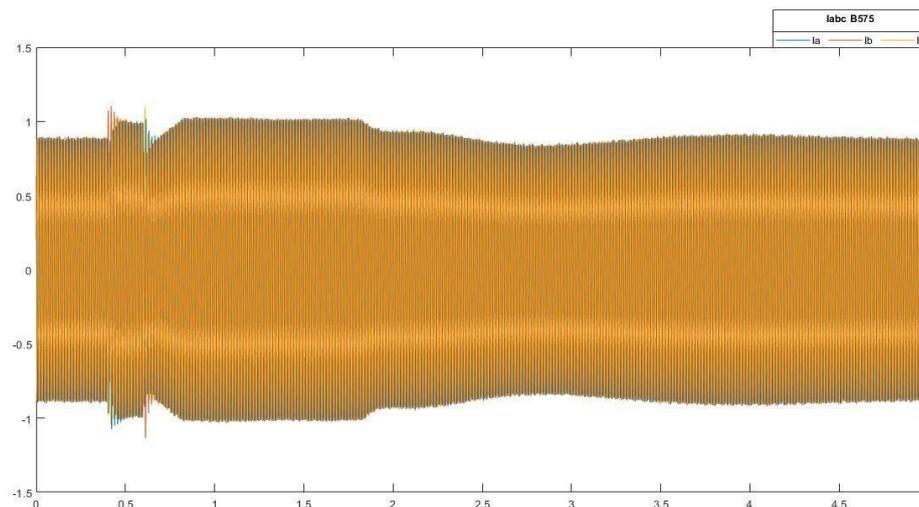
Apesar da junção de dois fenômenos no nosso sistema, a variação da corrente não ultrapassou a simetria da amplitude (1.13 pu), no entanto, quando os valores da amplitude atingiram o valor pico de 1.13 pu, as fases da corrente começaram a oscilar entre os valores [1.13 pu a 1.1 pu], essa variação ocorreu nos instantes 0,4s a 0,6s. No instante 0,61s as fases da corrente começaram a diminuir com os valores abaixo de 1 pu simétrico procurando o valor da referência que é 0.8 pu, as correntes diminuíram até na amplitude simétrico de 0.76 pu no tempo 0,66s, logo no instante 0,67s as correntes começaram a crescer novamente alcançando-se o novo amplitude de 1.01 pu para B25 e 1.02 para B575, o sistema conseguiu estabilizar no instante 4,75s, a estabilidade ocorreu graças ao ajuste dos ganhos que fizemos, porém o ganho proporcional é ajustado por 18 e o ganho integral é ajustado por 6.6.

Figura 4.18: Corrente trifásico no barramento 25 do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 15%.



Fonte: Próprio autor (2022)

Figura 4.19: Corrente trifásico no barramento 575 do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 15%.



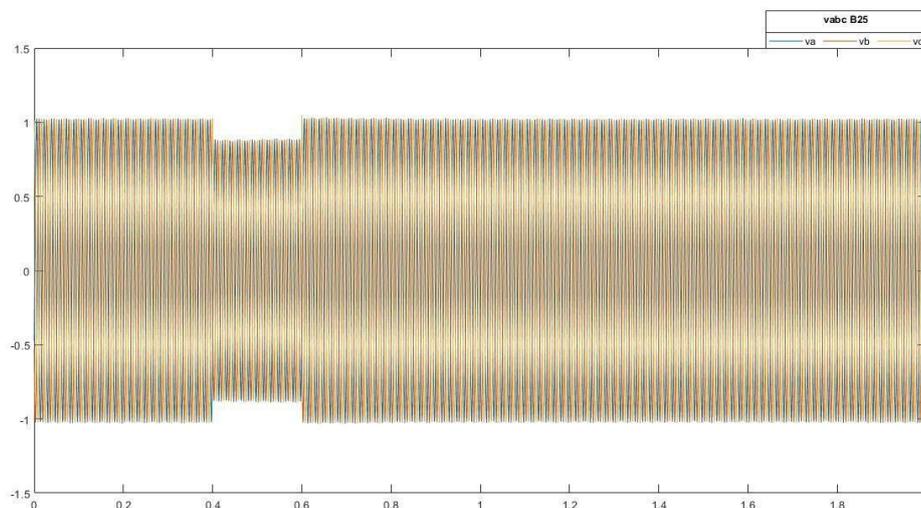
Fonte: Próprio autor (2022)

O comportamento do gráfico na figura 4.20 foi analisado em 2s, o sistema permaneceu constante durante 0 a 0,39s com amplitude simétrica de 1.01 pu, entre o instante 0,4s a 0,6s o sistema sofreu afundamento de tensão de 15% e no instante 0,5s sofreu a variação da velocidade do vento degrau que saiu de 15m/s para 17m/s, no entanto, os dois fenômenos influenciaram o nosso sistema a diminuir a tensão de 1.01 pu para 0.8 pu no B25 a amplitude é meramente

simétrica. No instante 0,61s a amplitude da Vc aumentou para 1.02 pu e a Va e Vb estabilizou de imediato após a ocorrência de dois fenômenos que ocorreu no sistema, a Vc se estabilizou no instante 0,64s.

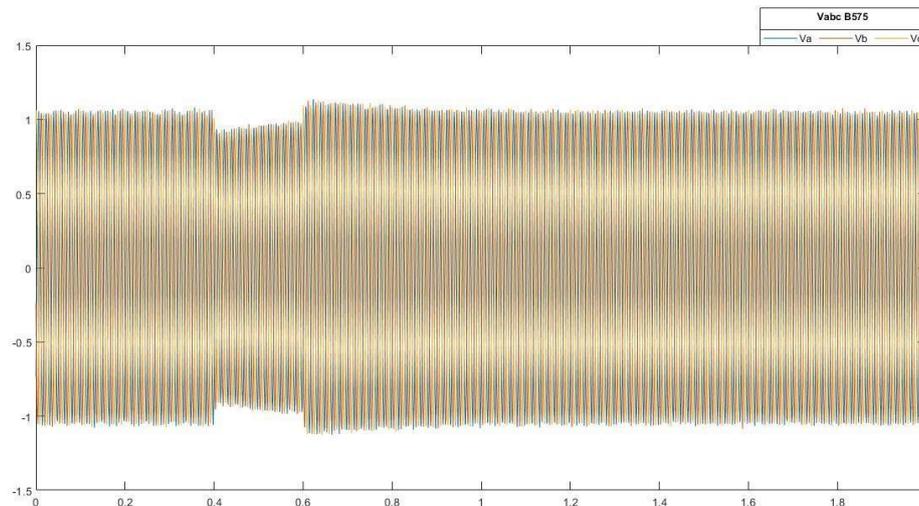
A figura 4.21 foi analisado em 2s, o sistema permaneceu constante durante 0,39s com amplitude simétrico oscilando de 1.01 pu a 1.02 pu, no instante 0,4s a 0,6s o sistema sofreu afundamento de tensão de 15% e no instante 0,5s sofreu a variação da velocidade do vento que saiu de 15m/s para 17m/s, no entanto, os dois fenômenos influenciaram o nosso sistema a diminuir a tensão de 1.01 pu para 0.9 pu no B575, a amplitude é meramente simétrica. Após o instante 0,4s a 0,6s a tensão Va, Vb e Vc começaram a crescer e oscilar até no ponto 0.93 pu, no instante 0,61s a 1,9s a tensão nas fases a, b e c voltaram a ganhar novos valores da amplitude simétrico oscilando de 1.01 pu a 1.04 pu, no instante 0,94s o sistema se estabilizou graças ao ajuste do ganho proporcional e integral feito no sistema.

Figura 4.20: Tensão trifásico no barramento 25 do sistema com o vento variável com afundamento de tensão de 15%.



Fonte: Próprio autor (2022)

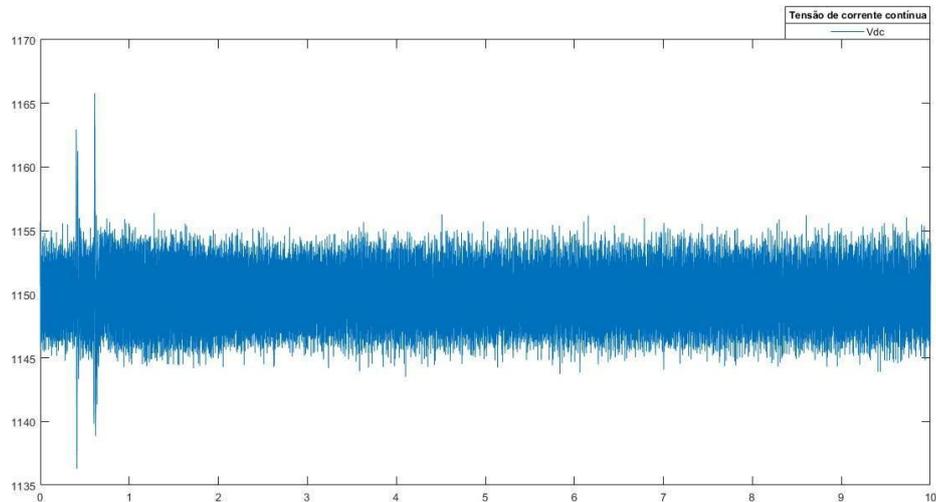
Figura 4.21: Tensão trifásico no barramento 575 do sistema com o vento variável com afundamento de tensão 15%.



Fonte: Próprio autor (2022)

Conforme a figura 4.22, a tensão da corrente contínua oscilou entre os valores de 1152 V a 1144 V no instante 0s a 0,39s, o tempo de análise é de 10s. De forma geral, a influencia do afundamento de tensão e a variação da velocidade do vento proporcionou-se os valores de Vdc a sofrer alteração nos instantes 0,4s a 0,6s. No intervalo de 0,40s a 0,42s o valor de Vdc oscilou entre 1136V a 1163, no intervalo de 0,59s a 0,61s o valor de Vdc oscilou entre 1139V a 1166, no instante 0,43s a 0,58s o valor de Vdc permaneceu constante oscilando entre 1145V a 1155V, as oscilações significativo aconteceram nos instantes 0,4s, 0,5s e 0,6s conforme a parametrização do nosso sistema.

Figura 4.22: Tensão de corrente contínua do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 15%.



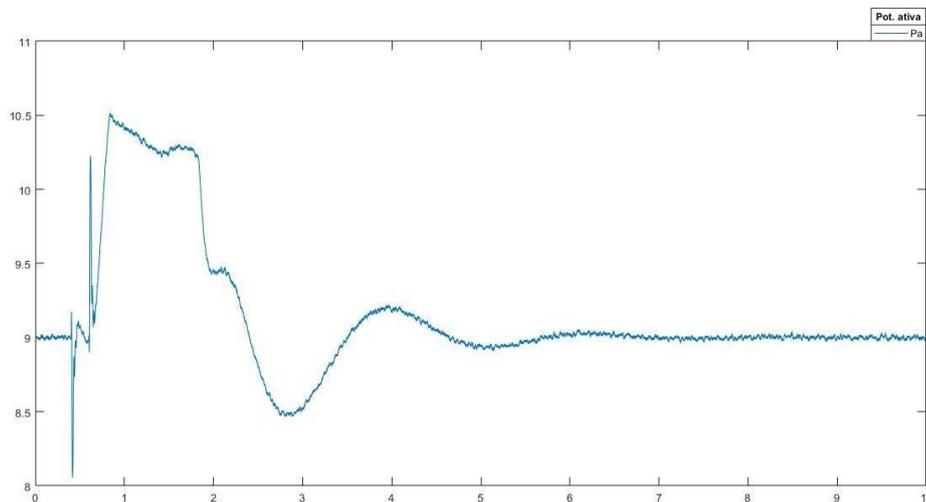
Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 4.23 ilustra o comportamento da potência ativa constante de 9 MW fornecido pelo sistema nos instante 0s a 0,39s, conforme a figura, no instante 0,4s a 0,6s constatamos a queda e o aumento da potência ativa causado pelo afundamento de tensão que aconteceu nesse instante e a variação da velocidade que aconteceu no instante 0,5s. No tempo 0,4s ocorreu a queda da potência ativa, saiu de 9MW para 8.1MW, no instante 0,41s a 0,5s ocorreu o aumento da potência ativa, saiu de 8.1MW para 9.13MW, o aumento ocorreu tendo em conta a aumento da velocidade do vento degrau, a partir de instante 0,51s a 0,6s a potência ativa voltou a diminuir para 8.9MW, no mesmo instante de 0,6s a potência ativa voltou a aumentar, desta vez atingiu o valor de 10.24MW. No tempo 0,61s a 0,63 o sistema voltou a ter um outro tipo de comportamento, a potência ativa baixou lentamente de 10.24MW para 9.1MW.

O comportamento visto no intervalo de [0,4s a 0,6s] é causado pelo afundamento de tensão e aumento da velocidade do vento no nosso sistema. Após o instante 0,63s o sistema começou a procurar a estabilidade através do ajuste feito nos ganhos ( $K_p = 18$  e  $K_i = 6.6$ ), entretanto o sistema demorou um pouco para se estabilizar tendo em conta o valor da potência ativa fornecido pelo sistema, entre o intervalo de tempo [0,63s a 7,4s] a potência ativa do sistema oscilou bastante entre os valores [8.5MW a 10.5MW], finalmente, no instante

7,5s o sistema se estabilizou com valor constante de 9MW fornecido pelo sistema, o gráfico foi analisado em 10s.

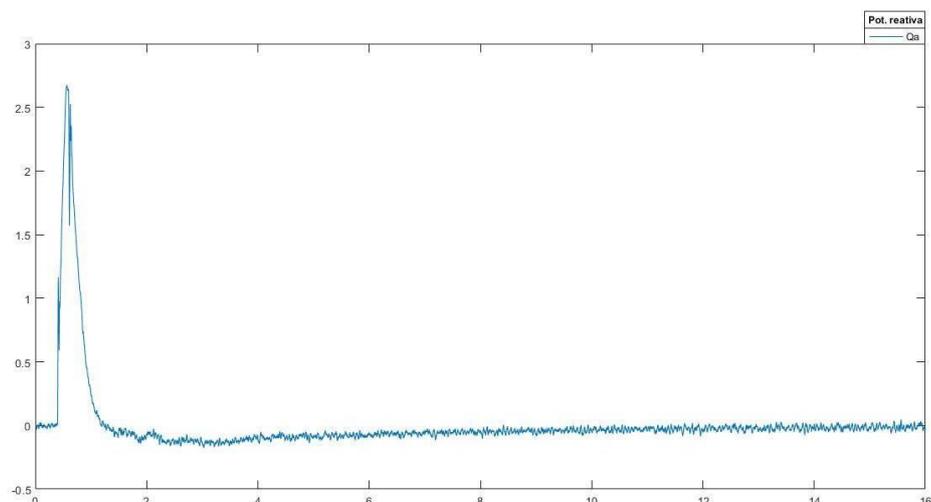
Figura 4.23: Potência ativa do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 15%.



Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 4.24 ilustra o comportamento da potência reativa de 0 VAR fornecido pelo sistema. Conforme a figura, nos instantes 0s a 0,39s a potência reativa permaneceu constante com o valor de 0 VAR, entre o instante [0,4s a 0,6s] ocorreu afundamento de tensão de 15% e no instante 0,5s ocorreu aumento da velocidade do vento degrau, porém, no intervalo de 0,4s a 0,6s o gráfico apresentou comportamento diferente, causado pelo afundamento de tensão e aumento da velocidade do vento, conseqüentemente, a potência reativa oscilou e proporcionou novos valores entre 0.1 VAR a 2.7 VAR para o nosso sistema, após o instante 0.6s a potência reativa começou a diminuir até -0.4 VAR. Por causa do ajuste dos  $k_p$  e  $k_i$  feito no sistema para obtenção da estabilidade, o sistema se estabilizou em 15s, o tempo de análise do gráfico é de 16s.

Figura 4.24: Potência reativa do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 15%.



Fonte: Próprio autor (2022)

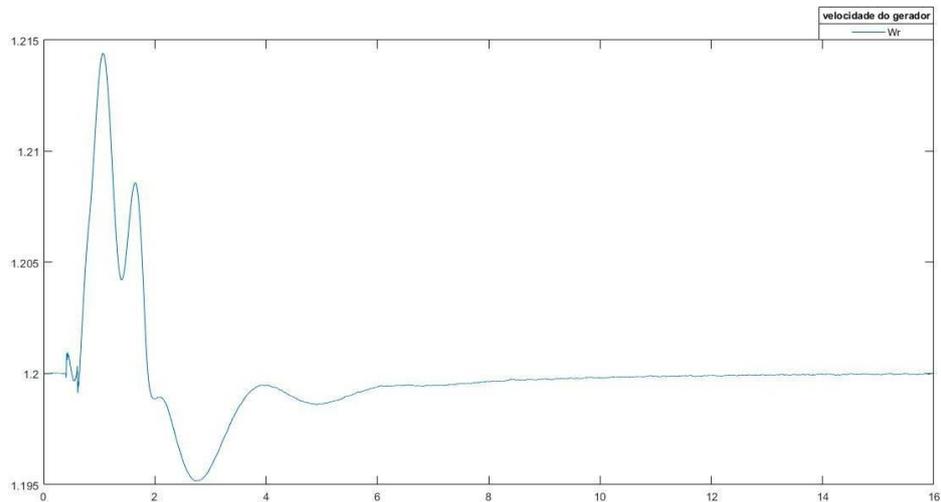
De acordo com a figura 4.25, cada um dos geradores começaram a funcionar com a velocidade de 1.2 pu no instante 0s a 0,39s, entre o instante 0,4s a 0,6s ocorreu afundamento de tensão de 15% e no instante 0,5s a velocidade dos geradores aumentaram. Os dois fenômenos proporcionou-se os geradores do nosso sistema a funcionar com velocidade nominal diferente do padrão que o nosso sistema adaptou, no instante 0,4s a velocidade nominal aumentou para 1.201 pu, no instante 0,5s a velocidade nominal diminuiu para 1.198 pu, a partir do instante 0,51s a 0,59s a velocidade nominal dos geradores aumentaram para 1.2005 e no instante 0,6s a velocidade nominal dos geradores voltaram a diminuir para 1.196 pu, no instante 0,61s a velocidade nominal do sistema aumentou para 1.214 pu. As variações vistas no espaço de tempo entre [0,4s a 0,6s], ocorreu por causa do afundamento de tensão de 15% e da variação da velocidade do vento degrau (15m/s a 17m/s) do nosso sistema.

Após o valor da velocidade nominal dos geradores atingiram o pico máximo de 1.214 pu, o valor começou a diminuir procurando o valor da referência, o decréscimo do valor aconteceu justamente por causa do ajuste feito nos ganhos ( $K_p$  e  $K_i$ ) de cada um dos geradores do sistema.

No espaço do tempo de 0,61s a 14,3s o comportamento da velocidade nominal do nosso sistema não era boa, durante esses instantes ocorreu

oscilação entre os valores abaixo de 1.214 pu e acima de 1.195 pu, finalmente os geradores do nosso sistema se estabilizou no instante 14,4s e o tempo de análise do gráfico é de 16s.

Figura 4.25: Velocidade do gerador do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 15%.



Fonte: Próprio autor (2022)

Tabela 4.3: Tabela dos resultados do sistema com o vento variável de 15m/s à 17 m/s, com afundamento de tensão de 15%.

Descrição	$I_{abc}$ (pu)		$V_{abc}$ (pu)		P(MW)	Q(VAR)	$V_{dc}$	$W_r$ (pu)
	B575	B25	B575	B25				
Valor real do sistema	0.8	0.8	1	1	9	0	/	1.2pu
Tempo de análise	5s	5s	2s	2s	10s	16s	10s	16s
Antes de A.T. (0s – 0.39s)	0.8	0.8	1.01	1.01	9.033	0.059	1152	1.20006
			à 1.02		à 8.962	à -0.041	à 1144	à 1.19993
A.T. e V.V. (0.4s, 0.5 a 0.6s)	1.1	1.1	0.9 (simét)	0.8 (simét)	10.24	2.7	1166	1.201
	à 1.13	à 1.13			à 8.1	à 0.1	à 1136	à 1.198

	(simét)	(simét)						
Valor Máx. no sistema.	1.13	1.13	1.04	1.02	10.24	2.7	1166	1.214
Valor Mín. no sistema.	0.76	0.76	0.9	0.8	8.1	-0.4	1136	1.198
Estabilidade	4.75s	4.74s	0.94s	0.64s	7.5s	15s	3.5s	14.4s

#### **4.2.4 Afundamento de tensão de 50% e o vento variável “degrau” (variando de 15 m/s a 17 m/s)**

As figuras 4.26 e 4.27 ilustram o comportamento da corrente trifásico no barramento 25 e no barramento 575, os referidos ações foi analisado em 10 segundos e as correntes fornecida pelo sistema em cada fase é de 0.8 pu.

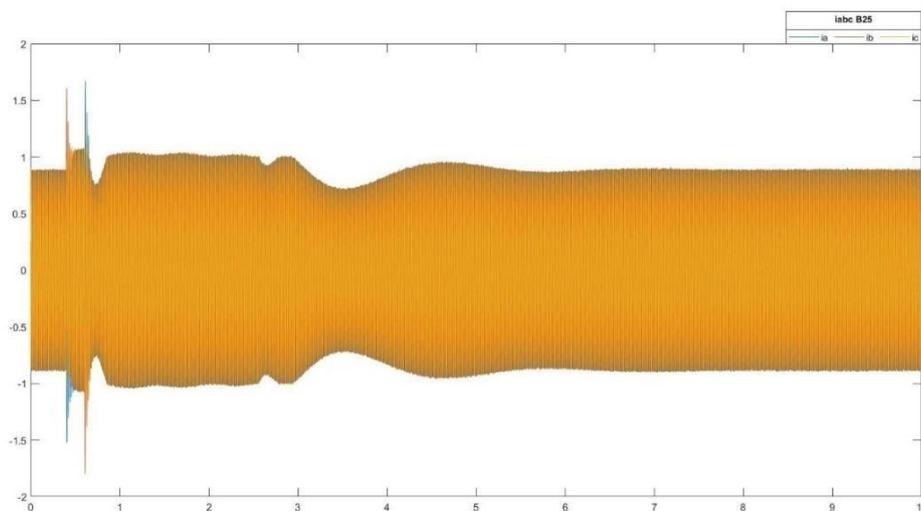
Conforme a parametrização do sistema, a partir do instante 0,4s a 0,6s houve afundamento de tensão de 50% e no instante 0,5s a velocidade do vento começou a crescer de 15m/s para 17m/s, o comportamento da corrente no B25 e B575 sofreram alterações, essa alteração é causada pelos dois fenômenos.

No B25 a corrente permaneceu constante com amplitude simétrico de 0.88pu nos instantes 0s a 0,39s, no instante 0,4s a corrente entre fases começou a adquirir valores maiores em relação à valor da referência. No instante 0,4s o valor da amplitude cresceu para 1.6 pu e a simetria de -1.51 pu, no instante 0,41s a 0,59s as fases decresceram ganhando valores simétricos entre 1.3 pu a 1.05 pu, a partir do instante 6s o valor da amplitude voltou a ganhar novo valor de 1.7 pu na simetria de -1.05 pu. Entre o instante 0,61s a 0,7s as fases continuam a oscilar e diminuir com valores de amplitude entre 1.8 pu na simetria de -1.79 pu. Dentre o segundo 0,71s a 0,8s a amplitude voltou a crescer entre o intervalo de 0.78 pu a 1.02 pu na simetria do mesmo valor. O sistema não parou de oscilar ao longo do tempo, demonstrou comportamento de crescimento e decréscimo no B25, entre instantes 0,81s a 7,5s as fases oscilaram entre os valores simétricos de 1.02 pu a 0.78 pu com finalidade de procurar a estabilidade do sistema, só no instante 7,6s que o nosso sistema se estabilizou por causa do ajuste dos ganhos.

No B575 a corrente permaneceu constante com amplitude simétrico de 0.88pu nos instantes 0s a 0,39s, no instante 0,4s a corrente entre fases começou

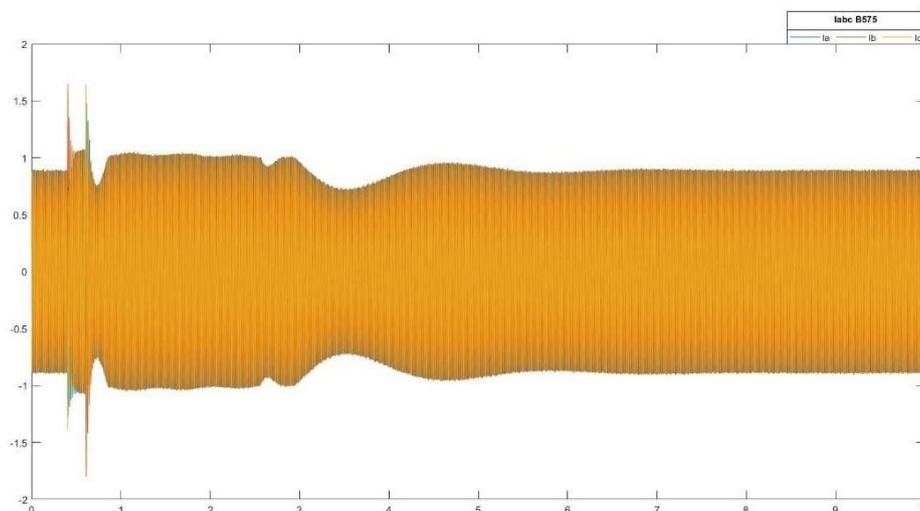
a adquirir valores maiores em relação à valor da referência. No instante 0,4s o valor da amplitude cresceu para 1.65 pu e a simetria de -1.4 pu, no instante 0,41s a 0,59s as fases decresceram ganhando valores da amplitude entre 1.38 pu a 1.03 pu na simetria de -1.33 pu a -1.03 pu, a partir do instante 6s o valor da amplitude voltou a ganhar novo valor de 1.64 pu na simetria de -1.8 pu. Entre o instante 0,61s a 0,7s as fases continuam a oscilar e diminuir com valores de amplitude entre 1.48 pu a 0.79 pu, na simetria de -1.44 pu a -0.79pu. Dentre o segundo 0,71 a 0,8s a amplitude voltou a crescer entre o intervalo de 0.79 pu a 1.01 pu na simetria do mesmo valor. O sistema não parou de oscilar, ao longo do tempo demonstrou comportamento de crescimento e decrescimento no B575, entre instantes 0,81s a 7,5s as fases oscilaram entre os valores simétricos de 1.02 pu a 0.79 pu com finalidade de procurar a estabilidade do sistema, só no instante 7,6s que o nosso sistema se estabilizou por causa do ajuste dos ganhos.

Figura 4.26: Corrente trifásico no barramento 25 do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 50%.



Fonte: Próprio autor (2022)

Figura 4.27: Corrente trifásico no barramento 575 do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão 50%.



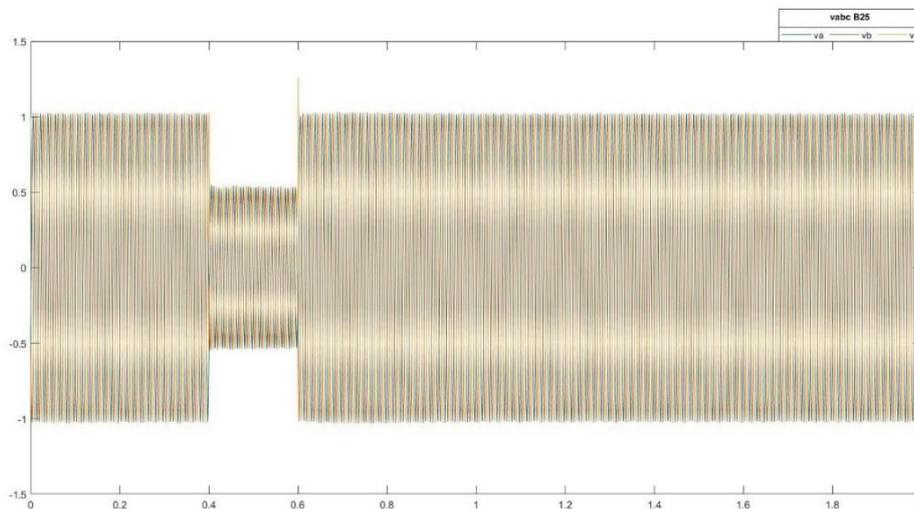
Fonte: Próprio autor (2022)

O comportamento do gráfico na figura 4.28 foi analisado em 2s, o sistema permaneceu constante entre 0s a 0,39s com amplitude simétrica de 1.01 pu, entre o instante 0,4s a 0,6s o sistema sofreu afundamento de tensão de 50% e no instante 0,5s sofreu a variação da velocidade do vento degrau que saiu de 15m/s para 17m/s, no entanto, os dois fenômenos influenciaram o nosso sistema a diminuir a tensão de 1.01 pu para 0.51 pu no B25, a amplitude é meramente simétrica. No instante 0,61s a amplitude da Vc aumentou para 1.25 pu e a Va e Vb estabilizou de imediato após a ocorrência de dois fenômenos que ocorreu no sistema no tempo 0,62s, a Vc se estabilizou no instante 0,64s.

A figura 4.29 foi analisado em 2s, o sistema permaneceu constante 0,39s com amplitude simétrica oscilando de 1.33 pu a 1.31 pu, no instante 0,4s o sistema sofreu afundamento de tensão de 50% e no instante 0,5s sofreu a variação da velocidade do vento degrau que saiu de 15m/s para 17m/s, no entanto, os dois fenômenos influenciaram o nosso sistema a diminuir a tensão de 1.33 pu para valores entre 0.7 pu a 0.53 pu no instante 0,4s a 0,6s, a amplitude é meramente simétrica. Após o instante 0,4s até ao instante 0,6s a tensão Va, Vb e Vc baixou da amplitude e continua a oscilar com valor da amplitude simétrica de 0.7 pu a 0.53 pu, no instante 0,61s a 1,9s a tensão nas fases a, b e c voltaram a ganhar novos valores da amplitude simétrica oscilando

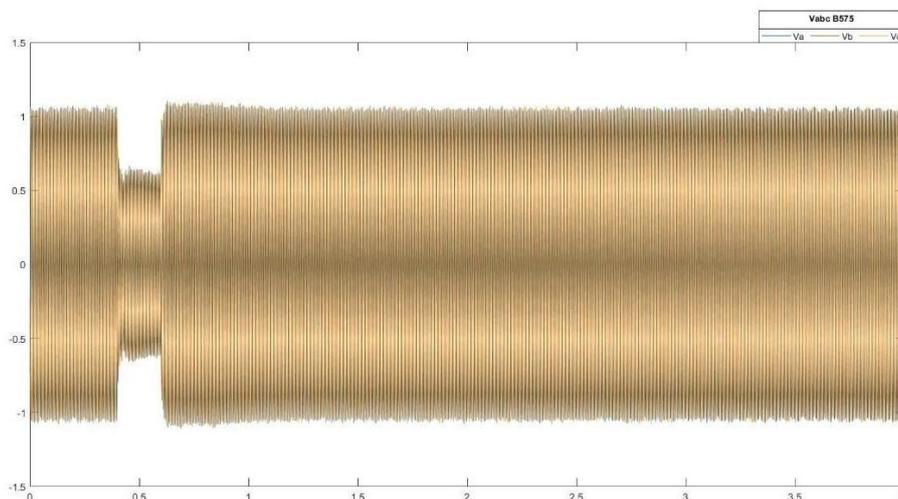
de 1.34 pu a 1.31 pu, no instante 1,4s o sistema se estabilizou graças ao ajuste do ganho proporcional e integral feito no sistema.

Figura 4.28: Tensão trifásico no barramento 25 do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 50%.



Fonte: Próprio autor (2022)

Figura 4.29: Tensão trifásico no barramento 575 do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 50%.

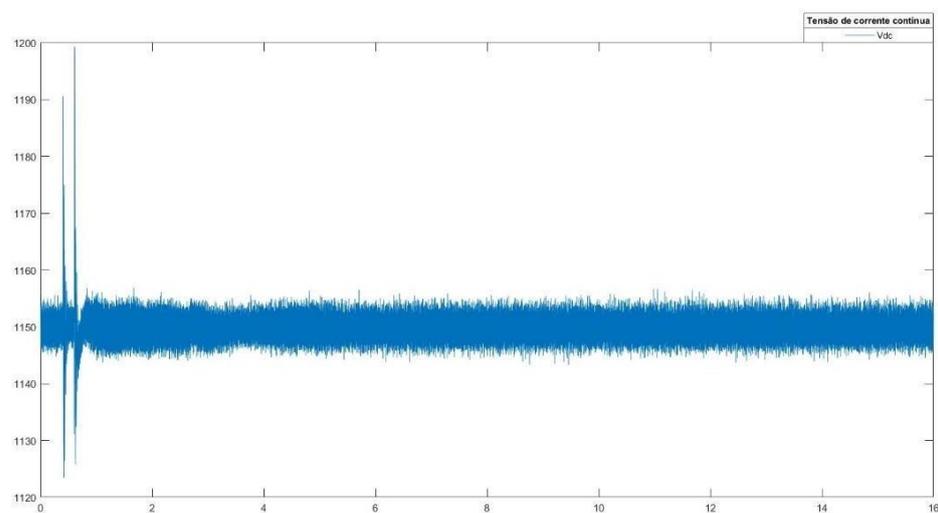


Fonte: Próprio autor (2022)

Conforme a figura 4.30, a tensão da corrente contínua oscilou entre os valores de 1155 V a 1145 V no instante 0s a 0,39s, o tempo de análise é de 16s. De forma geral, a influencia do afundamento de tensão e a variação da

velocidade do vento, proporcionou os valores de Vdc a alterar entre instantes 0,4s a 0,6s. No intervalo de 0,40s a 0,42s o valor de Vdc oscilou entre 1190V a 1124 V, no intervalo de 0,59s a 0,61s o valor de Vdc oscilou entre 1199 V a 1126 V, no instante 0,43s a 0,58s o valor de Vdc permaneceu constante oscilando entre 1155V a 1145V, as oscilações significativo aconteceram nos instantes 0,4s e 0,6s conforme a parametrização do nosso sistema. Após o instante 6s o sistema se estabilizou através do ajuste dos ganhos.

Figura 4.30: Tensão de corrente contínua do sistema com vento variável com afundamento de tensão de 50%.

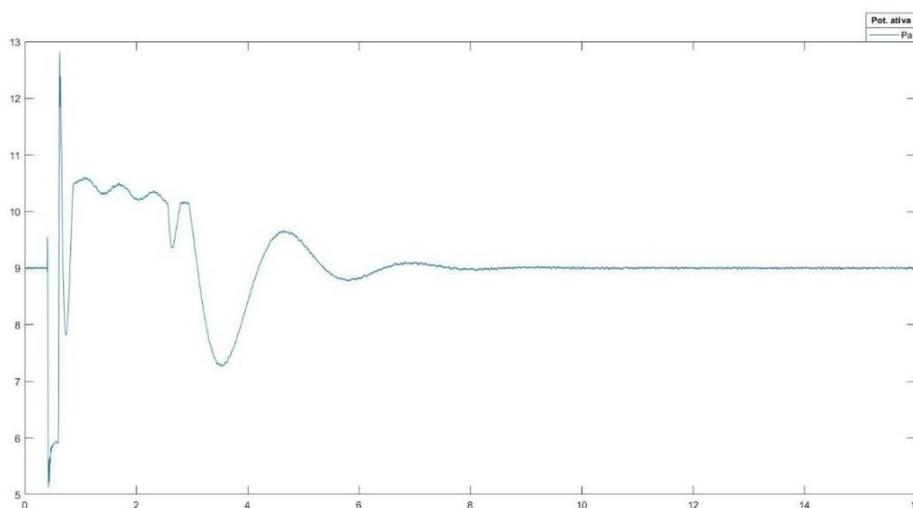


Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 4.31 ilustra o comportamento da potência ativa constante de 9 MW fornecido pelo sistema nos instante 0s a 0,399s, conforme a figura, no instante 0,4s a 0,6s constatamos a queda de tensão, a seguir a potência ativa aumentou novamente no mesmo intervalo de tempo causado pelo afundamento de tensão de 50% e a variação da velocidade que aconteceu no instante 0,5s. No tempo 0,4s ocorreu o aumento da potência ativa, saiu de 9MW para 9.5MW, no instante 0,41s ocorreu a queda da potência ativa de 9.5MW para 5.1MW, no instante 0,5s ocorreu o aumento da potência ativa causado pelo aumento da velocidade do vento, saiu de 5.1MW para 12.9MW, a partir de instante 0,51s a 0,6s a potência ativa voltou a diminuir para 7.9MW, no mesmo instante de 0,6s a potência ativa voltou a aumentar, desta vez atingiu o valor de 10.4MW. No tempo 0,61s a 9,9s o sistema voltou a ter um outro tipo de comportamento, a

potência ativa começou a oscilar entre 10.5MW a 7.3MW, com esse valor da oscilação o sistema começou a procurar a estabilidade através do ajuste feito nos ganhos ( $K_p = 18$  e  $K_i = 6.6$ ), entretanto o sistema demorou um pouco para se estabilizar tendo em conta o valor da potência ativa fornecido pelo sistema, finalmente, no instante 10s o sistema se estabilizou com valor constante de 9MW fornecido pelo sistema, o gráfico foi analisado em 16s.

Figura 4.31: Potência ativa do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 50%.

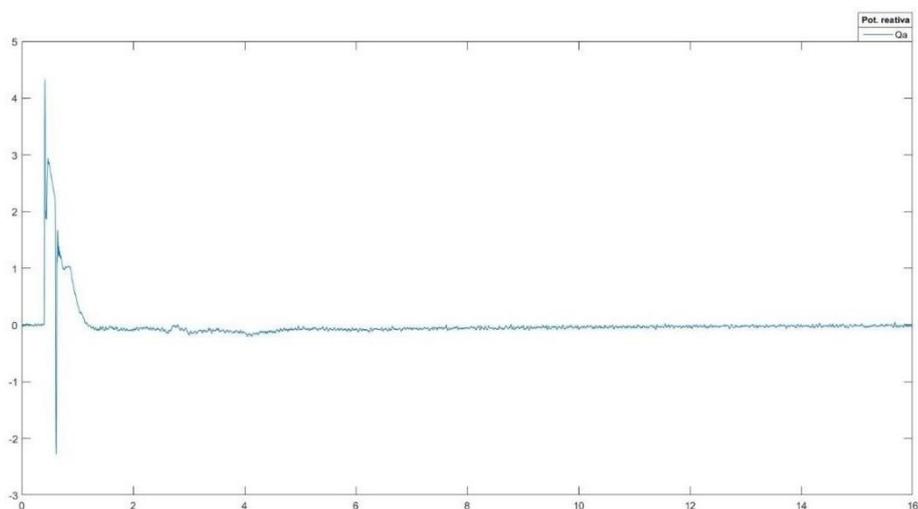


Fonte: Próprio autor (2022)

A figura 4.32 ilustra o comportamento da potência reativa de 0 VAR fornecido pelo sistema, conforme a figura, nos instantes 0s a 0,399s a potência reativa permaneceu constante com o valor de 0 VAR, entre o instante [0,4s a 0,6s] ocorreu afundamento de tensão de 50% e no instante 0,5s ocorreu aumento da velocidade do vento degrau, porém, no intervalo de 0,4s a 0,6s o gráfico apresentou comportamento diferente, causado pelo afundamento de tensão e aumento da velocidade do vento, conseqüentemente, à potência reativa oscilou e proporcionou novos valores. No instante 0,4s a potência reativa saiu de 0 VAR para 4.4 VAR, no instante 0,41s baixou para 1.9 VAR ainda no instante 0,43s a potência reativa aumentou para 2.9 VAR. Entre o instante 0,43s a 0,6s a potência reativa baixou para -2.2 VAR, no instante 0,61s subiu de novo ganhando o valor 1.7 VAR. Após o instante 0,61s a potência reativa começou a

diminuir e procurar a estabilidade, por causa do ajuste feito nos ganhos. O sistema se estabilizou em 6,5s, o tempo de análise do gráfico é de 16s.

Figura 4.32: Potência reativa do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 50%.

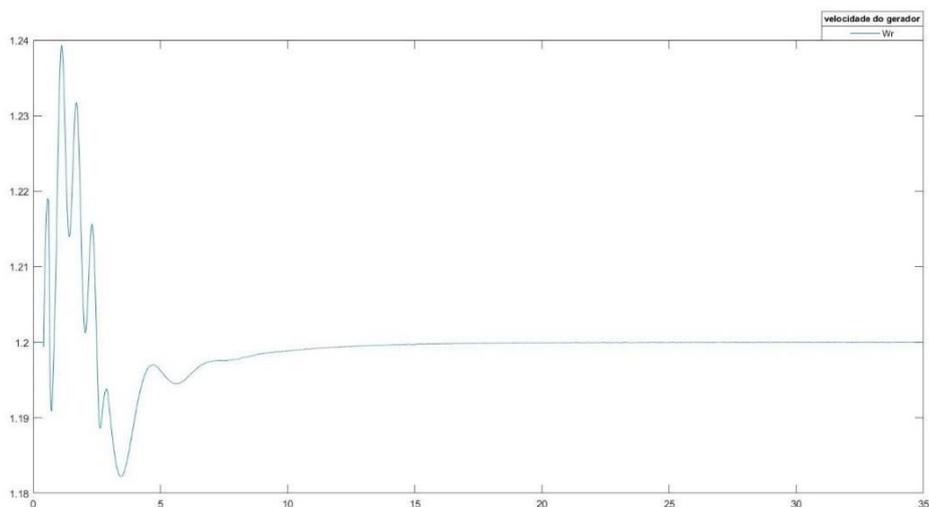


Fonte: Próprio autor (2022)

De acordo com a figura 4.33, cada um dos geradores começaram a funcionar com a velocidade de 1.2 pu no instante 0s a 0,399s, entre o instante 0,4s a 0,6s ocorreu afundamento de tensão de 50% e no instante 0,5s a velocidade dos geradores aumentaram. Os dois fenomenos (afundamento de tensão de 50% e aumento da velocidade do vento degrau) proporcionou-se os geradores do nosso sistema a funcionar com velocidade nominal diferente do padrão que o nosso sistema adaptou, no instante 0,4s a velocidade nominal diminuiu para 1.999 pu, entre o instante 0,41s a 0,59s a velocidade aumentou para 1.218, no instante 0,6s a velocidade nominal diminuiu para 1.191 pu, a partir do instante 0,61s a 20s a velocidade nominal dos geradores ganharam valores aleatória entre 1.239 pu a 1.999 pu, durante esse intervalo de tempo de [0,61s a 20s] o gráfico continua a ascilar com proposito de achar a estabilidade do sistema, o decrescimento e o crescimento do valor da amplitude entre o intervalo de [6,1s a 20s], aconteceu justamente por causa do ajuste feito nos ganhos ( $K_p$  e  $K_i$ ) em cada um dos geradores do sistema, finalmente os geradores do nosso sistema se estabilizou no instante 20,1s.

As variações vistas no espaço de tempo entre [6,1s a 20s], ocorreu por causa do afundamento de tensão de 50% e da variação da velocidade do vento degrau (15m/s a 17m/s) do nosso sistema, o tempo de análise é de 35s.

Figura 4.33: Velocidade do gerador do sistema com o vento variável e com afundamento de tensão de 50%.



Fonte: Próprio autor (2022)

Tabela 4.4: Tabela dos resultados do sistema com o vento variável de 15m/s à 17 m/s, com afundamento de tensão de 50%.

Descrição	$I_{abc}$ (pu)		$V_{abc}$ (pu)		P(MW)	Q(VAR)	$V_{dc}$	$W_r$ (pu)
	B575	B25	B575	B25				
Valor real do sistema	0.8	0.8	1	1	9	0	/	1.2pu
Tempo de análise	10s	10s	2s	2s	16s	16s	16s	35s
Antes de A.T. (0s – 0.39s)	0.88	0.88	1.033	1.01	9.033	0.059	1155	1.20006
			à		à	à	à	à
A.T. (0.4s, 0.5 a 0.6s)	1.5	1.6	0.53	1.25	12.9	4.4	1199	1.218
	à	à	à	à	à	à	à	à
	-1.8	-1.51	0.7	0.51	5.1	-2.2	1124	1.999

	(simét)	(simét)	(simét)					
Valor Máx. no sistema.	1.5	1.8	1.34	1.25	12.9	4.4	1199	1.239
Valor Mín. no sistema.	-1.8	-1.79	0.53	0.51	5.1	-2.2	1124	1.191
Estabilidade	7.6s	7.6s	1.4s	0.65s	10s	6.5s	6.s	20.1s

## 5 CONCLUSÃO

De acordo com o cenário da velocidade do vento constante (15 m/s) e afundamento de tensão de 15% e 50%, o sistema apresentou comportamento não estável, porém nos primeiros 0,39s o sistema funcionou perfeitamente fornecendo valores próximos de 9 MW de potência ativa que são considerados normal, entre 0,4s a 0,6s ocorreu afundamento de tensão, no entanto a potência ativa diminuiu e outros componentes de sistema em análise sofreram alteração, na tabela 4.2, 4.3 e 4.4 consta a explicação dos valores obtido no sistema sem A.T e com A.T de 15% e 50%.

Após o tempo de A.T o sistema voltou a obter estabilidade nos instantes diferentes dependendo dos ajustes do ganho proporcional e integral. Os ganhos desempenharam papel fundamental no nosso sistema, através do ajuste feito nele faz com que o sistema se estabilizou o mais rápido possível.

Conforme a parametrização no *softward MATLAB* do nosso parque eólico, a velocidade variável do vento de 15 m/s à 17 m/s ocorreu no instante 0,5s, e o A.T ocorreu nos instantes 0,4s a 0,6s.

Com a velocidade do vento variável de 15 m/s à 17 m/s no instante 0,5s, e com afundamento de tensão de 15% e 50%, o sistema apresentou um outro tipo de comportamento bem diferente de primeiro caso, todavia nos primeiros 0,399s o sistema funcionou perfeitamente e forneceu valores aproximadamente 9 MW de potência ativa, entre 0,4s a 0,6s ocorreu afundamento de tensão de 15% e 50%, no meio desse intervalo (0,5s) aconteceu o aumento da velocidade do vento, no entanto com acontecimento dos dois fenômenos em simultâneo proporcionou-se o aumento e a distorção da potência ativa e os determinados componentes em análise conforme está explicado na tabela 4.5, 4.6 e 4.7.

Conclui-se que entre os dois cenários em análise referente ao fornecimento da potência ativa, o contexto de variação da velocidade do vento

possui valores maiores em relação ao vento constante. Para obtenção da estabilidade no sistema após o A.T o vento constante levou a vantagem em afundamentos de tensão de 15% e o vento variável se comportou da melhor forma com afundamento de tensão de 50%.

Ambas situações em análise tem a vantagem e desvantagem, um possui desvantagem em relação ao valor do pico de  $P_a$  e outro possui a vantagem em relação ao tempo de estabilidade do sistema.

### **5.1 Trabalhos futuros**

Pretende-se usar outras estratégias para calcular o valor do ganho proporcional e integral, para que não ser por método de tentativa erro.

Pretende-se fazer a mesma análise usando o gerador de imã permanente diante de afundamento de tensão com o mesmo percentual e posteriormente comparar o comportamento do gráfico e os valores dos resultados encontrados.

## 6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] ABDALA, Paulo Jayme Pereira. Energia solar e eólica. **Ponta Grossa (PR): Atena Editora**, v. 1, 2019.
- [2] AFONSO, João L.; MARTINS, Júlio S. **Qualidade da energia eléctrica**. 2004.
- [3] ALMEIDA, Douglas de Florio Ubeda. **Análise da qualidade de energia no sistema elétrico da Universidade Tecnológica Federal do Paraná-Câmpus Pato Branco**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [4] ALVES, Mário Fabiano; COSTA, Janaína G. **“Avaliação do impacto econômico do afundamento de tensão na indústria**. Uberlândia (MG). 2003.” Disponível em: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUK Ewiv0ojZ0aD8AhXlr5UCHTyHDFgQFnoECAoQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.cgti.org.br%2Fpublicacoes%2Fwpcontent%2Fuploads%2F2016%2F01%2FAVALIA%25C3%2587%25C3%2583O-DO-IMPACTO-ECON%25C3%2594MICO-DO-AFUNDAMENTO-DE-TENS%25C3%2583O-NA-IND%25C3%259ASTRIA.pdf&usg=AOvVaw3gvAIHWe\\_h1gq5nPR9q7Z\\_](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUK Ewiv0ojZ0aD8AhXlr5UCHTyHDFgQFnoECAoQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.cgti.org.br%2Fpublicacoes%2Fwpcontent%2Fuploads%2F2016%2F01%2FAVALIA%25C3%2587%25C3%2583O-DO-IMPACTO-ECON%25C3%2594MICO-DO-AFUNDAMENTO-DE-TENS%25C3%2583O-NA-IND%25C3%259ASTRIA.pdf&usg=AOvVaw3gvAIHWe_h1gq5nPR9q7Z_) Acesso em: 08 de Maio de 2022.
- [5] ÁVILA, Manuel Ricardo Vargas. **Modelagem dinâmica e controle de um gerador tipo DFIG em redes de distribuição**. 2014.
- [6] BIGON, Luiz Carlos. **AFUNDAMENTO DE TENSÃO – “VOLTAGE SAG”**. Campinas (SP). 2007. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjivrry6D8AhXkp5UCHSYeARoQFnoECA8QAQ&url=https%3A%2F%2Flyceumonline.usf.edu.br%2Fsalavirtual%2Fdocumentos%2F1365.pdf&usg=AOvVaw3AL1Mj4b2tampcnWG7zG8F> . Acesso em: 08 de Maio de 2022.
- [7] BREITENBACH, Guilherme. **Análise do potencial eólico para geração de energia elétrica em São Francisco de Paula, RS, utilizando método computacional WAsP**. 2017.
- [8] BRITO, William de Sousa. **Controle vetorial de campo orientado indireto em motores de indução trifásicos**. 2016.
- [9] CUSTODIO, Luis Paulo et al. **Retificador boost trifásico intercalado com rastreamento do ponto de máxima potência para aplicação em aerogerador de pequeno porte**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [10] DA MÁQUINA, **UMA COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS; EÓLICA, DFIG PARA GERAÇÃO**; INESC-PORTO, CHESF UFCG ONS. GRUPO II GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS-GPT.2005.
- [11] DE GRADUAÇÃO, PROJETO; CASER, EDUARDO SPALENZA; PAIVA, GIUSEPPE DA MOTA. **PROJETO AERODINÂMICO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL (TEEV) PARA AMBIENTES URBANOS**.2016

- [12] DE SANTANA, Marcelo Patricio et al. **Estratégias para identificação de faltas externas e operação do gerador de indução duplamente alimentado**. Anais, 2012.
- [13] DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. Avaliação da qualidade da energia elétrica. available in <http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/qualidade/b5.pdf>, 2017.
- [14] DUTRA, R. **Energia eólica: Princípios e tecnologias** (Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio de Salvo Brito, Rio de Janeiro, 2008). Disponível em [http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_eolica\\_2008\\_e-book.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf), 2008.
- [15] FADIGAS, E. A. F. A. Energia eólica. **Série sustentabilidade [coordenador Arlindo Philippi Jr]**. São Paulo: Manole, 2011.
- [16] GRANZA, Marcelo Henrique. **Implementação de um sistema de controle do gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo em aerogeradores**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- [17] GUERRA, Thiago Koh. **ESTUDO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO DO TIPO “GAIOLA DE ESQUILO” NA GERAÇÃO EÓLICA COM FREQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO VARIÁVEL**. 2015.
- [18] HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, Merlin.; DOS REIS, L. **Energia e meio ambiente**. Tradução de 5ª edição norte-americana, 2014.
- [19] IVANQUI, Josmar et al. **Controle de geradores síncronos com ímãs permanentes em aerogeradores sob condições de afundamento de tensão da rede elétrica: falhas simétricas e assimétricas**. 2014.
- [20] JÚNIOR, Fernando Delgado Moreira. **VIABILIDADE TÉCNICA/ECONÔMICA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA, EM GRANDE ESCALA, NO NORDESTE BRASILEIRO**. Minas Gerais. 2009. Monografia. UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/4551/1/TCC%20-%20Energia%20E%20c3%b3lica%20-%20Fernando%20Delgado%20Moreira%20Junior%20-Carta%20-%20Final.pdf>. Acesso em: 06 de Março de 2022.
- [21] LIU, Silas Yunghwa. Controle direto de potência em gerador de indução duplamente alimentado. 2011.
- [22] LOPEZ, Ricardo Albadó. Qualidade na Energia Elétrica: Efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções. **São Paulo: Artliber**, 2013.
- [23] MATOS, Frederico Ferreira. Uma contribuição ao estudo da suportabilidade frente a afundamentos de tensão de sistemas eólicos com gerador síncrono a ímãs permanentes. 2012.
- [24] MEDEIROS, Arthur Salgado de. **Controle direto da tensão de rotor de um gerador de indução duplamente alimentado por meio de um processo de otimização restrito em tempo real**. 2020.

- [25] MICHEL, Isabela et al. Normas e regulamentações em qualidade da energia elétrica sob a ótica do fornecedor. 2012.
- [26] NETO, Francisco de Almeida Torres. **UNIDADE DE ENERGIA EÓLICA APLICADA AO BOMBEAMENTO DE ÁGUA**. 2010. Monografia. UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Disponível em: < <https://vdocuments.site/unidade-de-energia-eolica-aplicada-ao-de-almeida-torr-figura-12-central-eolica.html?page=1>>. Acesso em: 28 de Março de 2022.
- [27] PADILHA, Marina; DEQUIGIOVANI, Tiago. **ESTUDO SOBRE CONTROLE DEMOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**. 2015.
- [28] PADILLA, Julian Villelia. Qualidade de energia elétrica. **O setor Elétrico**, p. 93, 2008.
- [29] PINTO, Bruno Miguel dos Reis. **Análise e simulação de falhas em conversores AC- DC- AC num sistema de energia eólica**. 2016. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [30] PURIFICAÇÃO, L. S.; FONTE, R. B. D. **Estudo de turbinas eólicas verticais com exemplo de dimensionamento de uma turbina eólica darrieus para aplicação em edifícios**. Vitória, 2012. Monografia. Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em: <[https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/estudo\\_de\\_turbinas\\_eolicas\\_verticais\\_com\\_exemplo\\_de\\_dimensionamento\\_de\\_uma\\_turbina\\_eolica\\_darrieus\\_para\\_aplicacao\\_em\\_edificios.pdf](https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/estudo_de_turbinas_eolicas_verticais_com_exemplo_de_dimensionamento_de_uma_turbina_eolica_darrieus_para_aplicacao_em_edificios.pdf)>. Acesso em: 28 de Março de 2022.
- [31] QUINTAS, Bernardino Joaquim. **Análise experimental e computacional para extração da máxima potência em aerogeradores de pequeno porte**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2016. Disponível em: <[https://www.academia.edu/89613995/An%C3%A1lise\\_experimental\\_e\\_computacional\\_para\\_extra%C3%A7%C3%A3o\\_da\\_m%C3%A1xima\\_pot%C3%Aancia\\_em\\_aerogeradores\\_de\\_pequeno\\_porte](https://www.academia.edu/89613995/An%C3%A1lise_experimental_e_computacional_para_extra%C3%A7%C3%A3o_da_m%C3%A1xima_pot%C3%Aancia_em_aerogeradores_de_pequeno_porte)>. Acesso em: 25 de Abril de 2022.
- [32] RAMOS, Filipe G.; SEIDLER, Nelson. **Estudo da energia eólica para aproveitamento em pequenos empreendimentos**. *Revista Vivências*, v. 7, n. 13, p. 108-127, 2011.
- [33] RIBEIRO, Luiza Bastos. **Um estudo sobre energia eólica no Brasil**. 2017.
- [34] ROCHA, Allysson Costa Amaral. **CONTROLE DE UM AEROGERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES PARA EXTRAÇÃO DE MÁXIMA POTÊNCIA DA TURBINA**. 2017
- [35] ROCHA, Marco Aurélio. **Modelagem e controle de gerador de indução duplamente alimentado para estudo de sistema de geração eólica**. 2018.
- [36] RODRIGUES, Paulo Roberto. Energias renováveis: energia eólica. **Santa Catarina**, 2011.
- [37] ROSA, Diogo Martins; BOLSON, Marco Antonio; MORAES, Luiz André Motta de. **Comportamento dos geradores de indução duplamente alimentados em turbinas eólicas de 1, 5MW**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

- [38] RUEDA, Oscar Solano et al. **Simulação de um sistema de geração eólica DFIG com controle direto de torque (DTC)**. In: **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**. 2019.
- [39] RÜNCOS, F. et al. **Geração de energia eólica–Tecnologias atuais e futuras**. Jaraguádo Sul-SC, 2015.
- [40] SANTOS, Alison Alves et al. Projeto de geração de energia eólica. **Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Industrial Mecânica**. Universidade Santa Cecília, 2006.
- [41] SILVA, Renato Ferreira. **Emulação de uma turbina eólica e controle vetorial do gerador de indução rotor gaiola de esquilo para um sistema eólico**. Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- [42] TAVARES, Carmem Lúcia. **Modelagem de aerogeradores de indução dupla alimentação para estudos de transitório eletromagnético**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- [43] VICENZI, André Luís Guterres. Simulações de um gerador de indução duplamente alimentado frente a afundamentos de tensão. 2013.
- [44] VIDAL, Ana Paula Cenci. **Biocombustíveis: o valor estratégico das energias renováveis para o Brasil**. 2009.
- [45] VIEIRA, João Paulo Abreu et al. Controladores fuzzy aplicados ao conversor de geradores de indução duplamente excitados em sistemas eólicos integrados a sistemas de potência. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 18, p. 115- 126, 2007.
- [46] VIEIRA, João Paulo Abreu et al. **Otimização de controladores utilizando algoritmos genéticos para melhoria da capacidade de sobrevivência a afundamentos de tensão de aerogeradores de indução duplamente excitados**. 2009.
- [47] VOLTOLINI, Helio et al. **Modelagem e controle de geradores de indução duplamente alimentados com aplicação em sistemas eólicos**. 2007.
- [48] ZAMPERIN, João Luiz Bergamo. **Método analítico para análise da estabilidade do gerador assíncrono através do monitoramento da tensão**. 2011.