



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E
AUTOMAÇÃO

DANIEL CARLOS DE CARVALHO CRISÓSTOMO

**SIMULADOR DE CONTROLE DE POTÊNCIA, ENERGIA E CONEXÃO À
REDE DE AEROGERADORES**

MOSSORÓ

2017

DANIEL CARLOS DE CARVALHO CRISÓSTOMO

**SIMULADOR DE CONTROLE DE POTÊNCIA, ENERGIA E CONEXÃO À
REDE DE AEROGERAADORES - SiConErCo**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura - UFERSA

MOSSORÓ

2017

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

C932s Carlos de Carvalho Crisóstomo, Daniel.
SIMULADOR DE CONTROLE DE POTÊNCIA, ENERGIA E
CONEXÃO À REDE DE AEROGERADORES / Daniel Carlos de
Carvalho Crisóstomo. - 2017.
165 f. : il.

Orientador: Adriano Aron Freitas de Moura.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Sistemas de Comunicação e Automação, 2017.

1. Simulação Computacional. 2. Energia Eólica.
3. Fluxo de Potência. I. Aron Freitas de Moura,
Adriano, orient. II. Título.

DANIEL CARLOS DE CARVALHO CRISÓSTOMO

**SIMULADOR DE CONTROLE DE POTÊNCIA, ENERGIA E CONEXÃO À
REDE DE AEROGERADORES**

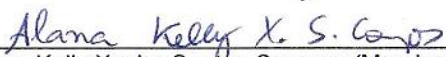
Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Defendida em: 10/03/2017

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura (Presidente e Orientador - UFERSA)


Prof. Dr. Ailson Pereira de Moura (Membro externo - UFC)


Profa. Dra. Alana Kelly Xavier Santos Campos (Membro interno - UFERSA)

À minha família, pela confiança, paciência e constantes ensinamentos

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar saúde, compreensão, força, discernimento, paciência e sabedoria para cruzar o árduo caminho trilhado, ensinando a enxergar a vitória como um valioso momento de exercício à gratidão e a derrota como igualmente valioso momento de reflexão e aprendizado.

Agradeço à minha família: meus pais Geiza Maria e Neilton Rodrigues, por serem a representação mais genuína do amor dedicado a mim: são meus formadores, meus espelhos, ídolos, incentivadores, conselheiros, exemplos. Tenho absoluta convicção que minha vitória é também de vocês, e isso me motiva; e à minha irmã, Anna Beatriz, que antes de tudo, é minha amiga: obrigado Bia, por sempre me orgulhar, surpreender, e por consequência, me motivar.

Agradeço ao meu grande amor Cinthia Rodrigues, responsável pelas páginas mais bonitas da minha história do passado, do presente, e quem desejo escrever as do futuro. Obrigado, acima de tudo, pelo companheirismo que não me deixam desanimar e me fazem olhar para frente sem temor, por tê-la ao lado.

Agradeço ao Professor Adriano Aron, pela orientação no trabalho.

Aos meus amigos nessa caminhada, Arimatéia Magno, Allyson Figueira, Samanta Holanda, Juan Rafael, Manassés Medeiros, Anamaria Sena, Edpo Rodrigues, Diego Pires, Flavia Dantas, Marks Cruz, Felipe Bezerra, Isau Balbino, Alexandre Henrique e Allison Cunha, pelo companheirismo em compartilhar os momentos de tensão e alegria que nos acompanharam durante todo esse tempo.

Agradeço por fim às instituições UFERSA e CAPES pelo suporte oferecido na confecção deste trabalho.

“Merecer vencer não é um estado de espírito. Não se acorda, abre a janela, olha para o céu e pensa: hoje eu mereço vencer. A vitória, é fruto do trabalho incansável, da preparação perfeita, dos mínimos detalhes, do bom ambiente e, igualmente importante, do respeito entre companheiros e adversários”

Adenor Leonardo Bacchi (Tite)

RESUMO

O bom uso da tecnologia a favor da educação torna-se uma alternativa bastante viável no aperfeiçoamento dos métodos de ensino. Em um mundo onde as informações são trocadas em alta velocidade, os processos de ensino-aprendizado também demandam rapidez e eficiência. Uma das opções que garantem estes requisitos na modernização do ensino está no uso de ferramentas de realidade virtual, como simuladores, que adicionam os fatores imersão e interatividade no processo de aprendizado do aluno. Aliar esses benefícios ao contexto do ensino de energia eólica, que vem se difundindo ano a ano no país e principalmente no estado do Rio Grande do Norte, torna a consolidação dessa tecnologia bastante relevante. Desta forma, este trabalho trata da construção de uma ferramenta de simulação 3D em uma plataforma gratuita que trará em sua estrutura os principais conceitos inerentes à energia eólica retratadas de uma forma interativa e imersiva para o usuário. O simulador, terá 5 módulos distintos, que permitirão a análise das temáticas de controle de potência e suas estratégias; produção anual de energia e conexão à rede. Usando o simulador, é possível transitar em um ambiente similar ao parque eólico e conhecer sua estrutura, além de opções como: escolher a força do vento incidente, visualizar a execução do controle das pás e acompanhar a energia gerada de acordo com suas decisões, entre outros. O simulador foi desenvolvido majoritariamente no software *Unity 3D*, que é, originalmente desenvolvido para criação de jogos, mas que, nesse trabalho, foram aproveitados todos os recursos gráficos e interatividade disponíveis para fins didáticos na temática da aquisição e aproveitamento de energia através dos ventos.

Palavras-chave: Simulação Computacional, Energia Eólica, Fluxo de Potência.

ABSTRACT

Good use of technology for education becomes a very viable alternative in the improvement of teaching methods. In a world where information is exchanged at high speed, learning - teaching processes also demand quickly and efficiency. One of the options to ensure these requirements in education modernization is the use of virtual reality tools, such as simulators, adding factors immersion and interactivity in the student learning process. Combine these benefits to the context of wind energy education, which has been disseminated every year in the country and mainly in the state of Rio Grande do Norte, makes the consolidation of this highly relevant technology. Thus, this work deals with the construction of a 3D simulation tool on a free platform that will bring in its structure the key concepts inherent in wind energy portrayed in an interactive and immersive way to the user. The simulator, 5 different modules, in which will be allowed the analysis of thematic of power control and its strategies; energy annual production and grid connection. In the simulator, the user may move in an environment similar to the wind farm and know its structure, as well as options such as choose the power of the incident wind, view the control of the execution of the blades and monitor the power generated according to your decisions, beyond others. The simulator was developed on the Unity 3D software, which is originally developed for creating games, but in this work were used all the graphics and interactivity available for educational purposes on the subject of acquisition and energy use through the winds.

Keywords: Computer Simulation, Windpower, Power Flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - (a) e (b) Visualização interna das partes constituintes do aerogerador, com recursos que permitem a interatividade na atividade.....	25
Figura 1.2 - (a) Aerodinâmica das pás do aerogerador sendo interpretadas através da variação da velocidade do vento (b) Forças atuantes nas pás do aerogerador em função da incidência do vento	25
Figura 1.3 - MARWind usado em uma localidade real, inserindo os aerogeradores e simulando seu posicionamento em um parque eólico	26
Figura 2.1 - Moinho de Halladay	29
Figura 2.2 - James Blyth e o primeiro Aerogerador	30
Figura 2.3 - Aerogerador criado por Charles Brush	31
Figura 2.4 - Johannes Juul e o primeiro aerogerador AC.....	31
Figura 2.5 - Crescimento da dimensão das turbinas eólicas.....	33
Figura 2.6 - Potencial Eólico estimado para vento médio igual ou superior a 7,0 m/s ..	36
Figura 2.7 - Distribuição de parques eólicos em operação, construção e contratados ...	40
Figura 2.8 - Pressão Horizontal que atua em um pequeno elemento diferencial de um fluído.....	42
Figura 2.9 - Rosa dos ventos: indicando magnitude e direção dos ventos	48
Figura 2.10 - Vento passando por entre o anel	49
Figura 2.11 - Potência do Vento x Velocidade do vento.....	51
Figura 2.12 - Velocidades dos ventos no território nacional.....	51
Figura 2.13 - Ambiente de consulta dos parâmetros de vento	52
Figura 2.14 - Dados de vento através da latitude e longitude de um local.....	53
Figura 3.1 - Estrutura e partes constituintes de um aerogerador	56
Figura 3.2 - Turbinas de eixo horizontal (a) e vertical (b)	57
Figura 3.3 - Aerofólio.....	57
Figura 3.4 - Forças aerodinâmicas em relação ao ângulo de ataque α	58
Figura 3.5 - Força de sustentação em função do ângulo α	59
Figura 3.6 - Aerofólio NACA 63-415	60
Figura 3.7 - Corte transversal de uma pá e seus parâmetros	61
Figura 3.8 - Extração de energia cinética do vento	62
Figura 3.9 - Zonas da curva de potência do aerogerador.....	64
Figura 3.10 - Máquina do Tipo 1.....	67

Figura 3.11 - Máquina do Tipo 2.....	67
Figura 3.12 - Máquina do Tipo 3.....	68
Figura 3.13 - Máquina do Tipo 4.....	69
Figura 3.14 - Controle por Estol Passivo.....	75
Figura 3.15 - Potência desenvolvida em uma turbina controlada por Estol Passivo.....	75
Figura 3.16 - Controle por Estol ativo.....	76
Figura 3.17 - Comportamento da Potência desenvolvida em uma turbina controlada por Estol Ativo.....	77
Figura 3.18 - Controle de Passo	78
Figura 3.19 - Aerogeradores em condição de máximo estol e máximo passo	79
Figura 3.20 - Ações de controle de passo e estol ativo para um mesmo aerogerador	80
Figura 3.21 - Controle de guinada (yaw).....	80
Figura 3.22 - Modelo simplificado de impedância do sistema elétrico.....	83
Figura 3.23 - Barra com geração, carga e linhas	84
Figura 3.24 - Exemplo de Sistema elétrico.....	87
Figura 3.25 - Comportamento da Tensão para diferentes taxas de X/R.....	88
Figura 4.1 - Processamento do sistema de RV	90
Figura 4.2 - Cone de experiência de Edgar Dale.....	92
Figura 5.1 - Plataformas disponíveis exportação do projeto desenvolvido no Unity 3D	95
Figura 5.2 - Microsoft Visual Studio 2015 em edição	96
Figura 5.3 - Modelo de Aerogerador confeccionado no Blender; (b) Aerogerador no formato .fbx exportado e imerso no ambiente Unity 3D.....	97
Figura 5.4 - (a) Arte da disposição geográfica das torres no parque eólico Alegria; (b) Reprodução do layout do parque eólico de Alegria no SiConErCo.....	98
Figura 5.5 - Imagem base retirada do Google Earth para alocação exata dos aerogeradores no SiConErCo.....	98
Figura 5.6 - Modelo Vestas V82-1.65 visto em sua ficha técnica.....	99
Figura 5.7 - Modelagem da Pá do aerogerador	100
Figura 5.8 - Modelagem do conjunto Nacele do aerogerador	100
Figura 5.9 - Modelagem do cubo do aerogerador	101
Figura 5.10 - Modelagem da torre do aerogerador.....	101
Figura 5.11 - Modelagem do Aerogerador	102
Figura 5.12 - Aerogerador no Unity 3D	102
Figura 5.13 - Barras deslizantes interativas.....	103

Figura 5.14 - Vista da Câmera 1	104
Figura 5.15 - Vista da Câmera 2.....	105
Figura 5.16 - Vista da Câmera 3.....	105
Figura 5.17 - Leme e Anemômetro: Sensores de direção e velocidade do vento.....	107
Figura 5.18 - Diagrama de blocos para os controles de passo e estol ativo	108
Figura 5.19 - Diagrama de blocos para o controle de guinada.	109
Figura 5.20 - (a) Representação gráfica das alterações dos ângulos de incidência do vento e de guinada; (b) Rosa dos ventos interativa, disponível no SiConErCo	110
Figura 5.21 - Módulo Produção de Energia do SiConErCo	111
Figura 5.22 - Módulo Parque Eólico do SiConErCo.....	114
Figura 5.23 - Módulo Conexão à rede do SiConErCo	116
Figura 5.24 - Limites de tensão para conexão à rede	120
Figura 5.25 - Módulo Conexão à rede do SiConErCo – duas gerações	121
Figura 6.1 - SiConErCo – Tela de Apresentação	123
Figura 6.2 - SiConErCo – Informações	124
Figura 6.3 - Simulação de Controle de Passo.....	125
Figura 6.4 - Gráficos no momento da simulação do controle de passo: (a) Gráfico de ângulo de passo β ; (b) Gráfico de velocidade do vento; (c) Gráfico de Potência gerada	126
Figura 6.5 - Alteração do ângulo de passo β , perceptível na análise individual das pás do aerogerador	127
Figura 6.6 - Freio dinâmico do aerogerador	128
Figura 6.7 - Controle de guinada (yaw).....	129
Figura 6.8 - Simulação de Controle de Estol Ativo.....	131
Figura 6.9 - Gráficos no momento da simulação do controle de estol ativo: (a) Gráfico de ângulo de passo β ; (b) Gráfico de velocidade do vento; (c) Gráfico de Potência gerada	132
Figura 6.10 - Alteração do ângulo de passo β , quase imperceptível na análise individual das pás do aerogerador	133
Figura 6.11 - Simulação de Produção de Energia em Tibau-RN com aerogerador modelo Vestas.	136
Figura 6.12 - Simulação de Produção de Energia em Tibau-RN com aerogerador modelo Enercon.....	137

Figura 6.13 - Simulação de Produção de Energia em Tibau-RN com aerogerador modelo WinWind.	137
Figura 6.14 - Simulação de Produção de Energia em Mossoró-RN com aerogerador modelo Vestas.	138
Figura 6.15 - Simulação de Produção de Energia em Mossoró-RN com aerogerador modelo Enercon.	138
Figura 6.16 - Simulação de Produção de Energia em Mossoró-RN com aerogerador modelo Enercon.	139
Figura 6.17 - Simulação no módulo Parque Eólico para as velocidades 13 e 19 m/s ..	141
Figura 6.18 - Gráfico da simulação no módulo Parque Eólico para as velocidades 13 e 19 m/s ..	141
Figura 6.19 - Controle de guinada no módulo Parque Eólico	142
Figura 6.20 - Simulação 1 do módulo Conexão à rede: P máximo; Q_c mínimo	143
Figura 6.21 - (a) Variação de tensão na barra E2; (b) Variação de tensão na barra E3	144
Figura 6.22 - Simulação 2 do módulo Conexão à rede: P máximo; Q_c máximo.....	145
Figura 6.23 - (a) Variação de tensão na barra E2; (b) Variação de tensão na barra E3	145
Figura 6.24 - Simulação 3 do módulo Conexão à rede: dois parques conectados ao sistema, com P_1 e Q_{c1} máximos e P_2 máximo e Q_{c2} mínimos	146
Figura 6.25 - (a) Variação de tensão na barra E2; (b) Variação de tensão na barra E3	147
Figura 6.26 - Simulação 4 do módulo Conexão à rede: dois parques conectados ao sistema, com P_1 e Q_{c1} máximos e P_2 e Q_{c2} máximos.....	147
Figura 6.27 - (a) Variação de tensão na barra E ₂ ; (b) Variação de tensão na barra E ₃ .	148

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Capacidade Instalada de Energia Eólica acumulada no mundo 2000-2015	34
Gráfico 2.2 - Capacidade Instalada de Energia Eólica pontual no mundo 2000-2015... 34	
Gráfico 2.3 - Potência acumulada entre 2000 e 2015.....	35
Gráfico 2.4 - Potência instalada de janeiro a dezembro de 2015	35
Gráfico 2.5 - Matriz Energética Brasileira – Em Operação	38
Gráfico 2.6 - Matriz Energética Brasileira – Em Construção.....	38
Gráfico 2.7 - Matriz Energética Brasileira – Construção não iniciada.....	39
Gráfico 2.8 - Frequência de distribuição em horas por ano de vento	44
Gráfico 2.9 - Probabilidade de ocorrência de velocidade do vento.....	45
Gráfico 2.10 - Função Densidade Probabilidade dos ventos.....	46
Gráfico 2.11 - (a) Função densidade probabilidade de Weibull com parâmetros de forma $k = 1,2$ e 3 (com parâmetro de escala fixo em $c = 6$); (b) Função densidade probabilidade de Weibull com parâmetros escala $c = 4,6$ e 8 (com parâmetro de forma fixo em $k = 3$)	47
Gráfico 3.1 - C_s , C_a e C_s/C_a em função de α	60
Gráfico 5.1 - Potência (P) e Coeficiente de Potência (C_p) do aerogerador Vestas V82 - 1.65 MW.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Escala de Beaufort para magnitude dos ventos	43
Tabela 3.1 - Resumo exemplificando os 4 tipos de máquinas em aerogeradores	71
Tabela 3.2 - Relação entre conceitos de controle de potência do aerogerador.....	73
Tabela 3.3 - Tipos de Máquinas nas quais os conceitos de controle são utilizados	74
Tabela 3.4 - Requisitos operacionais da variação de tensão permitida	82
Tabela 5.1 - Dados técnicos dimensionais do aerogerador Vestas 1.65 MW	99
Tabela 5.2 - Dados técnicos pertinentes ao controle de potência do aerogerador Vestas V82-1.65 MW.....	106
Tabela 5.3 - Critérios para o controle de Estol Ativo e de Passo	108
Tabela 5.4 - Critérios para o controle de guinada.....	109
Tabela 5.5 - Especificações relevantes dos 3 modelos de aerogeradores trabalhados no módulo Produção de Energia do SiConErCo	112
Tabela 5.6 - Especificações relativas às potências ativas e reativas do aerogerador modelo Vestas V82-1.65 MW	118
Tabela 5.7 - Especificações relativas a conexão à rede do aerogerador modelo Vestas V82-1.65 MW.....	120
Tabela 6.1 - Dados Eólicos de Tibau - RN.....	135
Tabela 6.2 - Dados Eólicos de Mossoró - RN	135
Tabela 6.3 - Quadro comparativo: Valores de Energia anual e Fator de carga para as cidades de Tibau e Mossoró	139

NOMENCLATURA

Letras latinas

v – Velocidade do vento

h – Altura de medição do vento

k – Parâmetro de forma

c – Parâmetro de escala

E_c – Energia Cinética

m – Massa do vento

A – Área útil varrida

D – Diâmetro

t – Tempo

P – Potência disponível

F_c – Fator de carga

G – Centro geométrico

F_s – Força de sustentação

F_a – Força de arrasto

F – Força resultante

C_s – Coeficiente de sustentação

C_a – Coeficiente de arrasto

r – Raio

C_p – Coeficiente de potência

V_{cut-in} – Velocidade mínima na qual a máquina gerará potência útil

$V_{cut-off}$ – Velocidade máxima velocidade permitida

V_n – Velocidade nominal

u – Velocidade escalar de ponta da pá

P_k – Potência ativa de uma barra k

Q_k – Potência reativa de uma barra k

S_k – Potência aparente de uma barra k

I – Corrente

V_k – Tensão na barra k

X – Reatância

R – Resistência

Y – Admitância

Letras gregas

Δ – Variação

μ – Rugosidade

Φ – Ângulo de guinada

ρ – Densidade do vento

α – Ângulo de ataque

β – Ângulo de passo

ω – Velocidade angular

θ_k – Ângulo de tensão

λ – TSR

Siglas

PTC – Production Tax Credit

GWEC – Global Wind Energy Counce

Cepel – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica

Proeólica – Programa De Desenvolvimento da Cadeia Produtiva Geradora De Energia Eólica

Proinfa – Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento

BIG – Banco de Informações de Geração

ANEEL – Agencia Nacional da Energia Elétrica

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito

NACA – *National Advisory Committee for Aeronautics*

GIDA – Gerador de Indução Duplamente Alimentado

RV – Realidade Virtual

MARWind – *Mobile Augmented Reality Wind Farm Visualization*

SiConErCo – Simulador de Controle de Potência, Energia e Conexão à rede

TSR – *Tip Speed Ratio*

Abreviações

CGH – Central Geradora Hidrelétrica

EOL – Central Geradora Eólica

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

UFV – Central Geradora Solar Fotovoltaica

UHE – Usina Hidrelétrica

UTE – Usina Termelétrica

UTN – Usina Termonuclear

PCG – Pequena Central Hidrelétrica

EAG – Energia Anual Gerada

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	20
1.1 Organização do Trabalho	22
1.2 Objetivos Gerais.....	23
1.3 Objetivos Específicos	23
1.4 Revisão Bibliográfica	24
1.5. Justificativa.....	26

CAPÍTULO 2

HISTÓRICO, PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS DA ENERGIA EÓLICA.....	28
2.1 História da Energia Eólica no Mundo	28
2.2 Matriz Eólica Mundial	33
2.3 Energia Eólica no Brasil – Motivações, panorama e desenvolvimento.....	35
2.4 O vento como recurso energético	41
2.5 Estatística dos ventos e estimativa do potencial eólico	44
2.6 Potência disponível no vento	49
2.7 Geração de Energia estimada em um aerogerador	52

CAPÍTULO 3

O AEROGERADOR	55
3.1 Conversão e partes constituintes	55
3.2 Aerodinâmica das pás.....	57
3.3 Coeficiente e Curva de Potência em um Aerogerador	62
3.4 Tipos de Máquinas.....	66
3.4.1 Tipo 1.....	66
3.4.2 Tipo 2.....	67
3.4.3 Tipo 3.....	68
3.4.4 Tipo 4.....	69
3.5 Conceitos de Controle de Potência no Aerogerador	72
3.5.1 Controle de Estol Passivo	74
3.5.2 Controle por Estol Ativo.....	76
3.5.3 Controle de Passo	77
3.5.4 Controle de Guinada (Yaw)	79
3.6 Conexão com a rede.....	81

3.6.1 Qualidade de Energia.....	81
CAPÍTULO 4	
REALIDADE VIRTUAL: UM RECURSO PARA ENSINO E TREINAMENTO	89
4.1 Realidade Virtual.....	89
4.2 Realidade Virtual e Educação	91
CAPÍTULO 5	
PROJETO DE CONFECÇÃO E MODELAGEM DO SIMULADOR DE	
CONTROLE, ENERGIA E CONEXÃO A REDE – SiConErCo.....	94
5.1 Construção do Ambiente – Softwares utilizados	94
5.1.1 Unity 3D	95
5.1.2 Blender	96
5.2 Módulo – Controle de Passo e Estol Ativo.....	97
5.3 Módulo – Produção de Energia	111
5.4 Módulo – Parque Eólico	113
5.5 Módulo – Conexão à rede.....	115
CAPÍTULO 6	
SIMULAÇÕES	123
6.1 Controle de Passo – Simulações.....	124
6.2 Controle de Estol (Stall) – Simulações	130
6.3 Produção de Energia – Simulações	134
6.4 Parque Eólico – Simulações	140
6.5 Conexão à rede – Simulações	142
CAPÍTULO 7	
CONCLUSÕES.....	149
7.1 Recomendações para Trabalhos Futuros	150

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Como resultado da crescente preocupação com o meio ambiente, o impacto da geração de energia elétrica convencional (não renováveis) tem sido minimizado, e os esforços estão voltados para a geração advinda de fontes renováveis. As principais vantagens dessa prática são a ausência de danosas emissões de gases na atmosfera e a infinita disponibilidade do recurso convertido em energia elétrica. Uma forma de geração de eletricidade de uma fonte renovável é o uso de turbinas que convertem a energia contida nas massas de ar em eletricidade.

A Indústria eólica tem se desenvolvido rapidamente durante os últimos 20-30 anos. O desenvolvimento tem se concentrado em tecnologias que possam conectar os aerogeradores à rede elétrica, e suas estratégias de controle. Sobre o primeiro aspecto, Pires et al. (2008); Zanchettin (2012) apud Lowemberg (2013) citam os principais requisitos técnicos que os acessantes do sistema elétrico devam cumprir para conexão de sistemas de geração eólica, sendo eles: variação de tensão terminal em regime permanente, regulação de potência ativa, regulação de potência reativa, regulação da frequência, *flicker*, conteúdo harmônico e capacidade de sustentação durante faltas. Sobre o segundo aspecto, Mihet-Popa e Groza (2011) diz que as turbinas eólicas são predominantemente divididas em: turbinas com controle de *stall*, equipadas com geradores com rotor gaiola de esquilo, cuja velocidade é praticamente constante, e turbinas com velocidade e *pitch* variáveis, que usam geradores de indução com dupla alimentação ou geradores síncronos em conexão com conversores de potência.

Juntamente com o crescimento da indústria eólica e do desenvolvimento de suas tecnologias, se dá também o aumento da demanda por mão de obra especializada. Em virtude disso, surge a exigência fundamental de educar e formar uma geração de profissionais para a indústria de energia dos ventos. Essa etapa requer um cuidado e a necessidade de uma eficaz transferência de conceitos aprendidos em sala de aula para prática. Do et al. (2013) relata que a questão da transferência dos conceitos aprendidos em sala de aula para resolver complexas soluções de tarefas é uma barreira, resultando na incapacidade de apresentar pensamento inovador, que dificulta a performance do aprendizado, e a produção profissional. Estes contratempos educacionais são sentidos especialmente na indústria eólica. Há um pequeno número de profissionais especializados

e pesquisadores capazes de aplicar conceitos relevantes para desenvolver e operar turbinas eólicas em parques. Santos – Martin et al. (2002), defende que estudantes que usam metodologias de ensino que indutivas (como ferramentas de simulação), possuem maiores notas, retêm informação na sua memória de longa data e são capazes de aplicar esse conhecimento em diversos contextos. Posteriormente, como Engenheiros, serão treinados para se tornar profissionais cuja principal função é oferecer soluções práticas e inovadoras para problemas em sua área profissional. A principal ideia por trás de uma ferramenta de simulação é construir essas habilidades requeridas permitindo futuros engenheiros experimentem situações onde serão forçados a resolver problemas em ambientes controlados

Desta forma, objetivando contribuir para uma reforma educacional através de novos instrumentos de ensino, este trabalho trata da construção de uma ferramenta computacional de simulação didática em 3 dimensões na plataforma *Unity 3D*, com funções de simulação de controle potência, geração de energia e variação de tensão de conexão de um gerador eólico através de parâmetros de entrada como velocidade do vento, com acompanhamento de gráficos em tempo real dos parâmetros como potência, ângulo de passo, velocidade do vento e tensões nas barras de conexão; paralelamente à visualização das mudanças físicas no aerogerador.

1.1 Organização do Trabalho

Este trabalho, cujas temáticas principais permeiam em torno da energia eólica e uma metodologia moderna de ensino e treinamento desta, está dividido em uma ordem que respeita a cronologia desse processo, ou seja, são 7 capítulos que tratam desde a fonte primária de geração de energia eólica (vento) até a última fase da geração, que é a entrega da energia à rede, passando por tópicos sobre metodologias de confecção e resultados da proposta do trabalho, com objetivo de situar o leitor e tornar a experiência de leitura mais dinâmica. O conteúdo dos 7 capítulos tratados na dissertação é resumido nos parágrafos seguintes.

O Capítulo 1 introduz o trabalho ao leitor, com informações gerais sobre o conteúdo que a dissertação trata, além dos tópicos de organização do trabalho, objetivos gerais e específicos.

O Capítulo 2 tem o vento como personagem principal: sobre ele, são abordados dados históricos sobre seu aproveitamento, princípios de formação além de estudos estatísticos que objetivam entender a principal matéria prima da obtenção de energia elétrica pelas turbinas eólicas.

O Capítulo 3 trata da máquina que converte o vento em energia elétrica: o aerogerador. Sobre ele: partes constituintes, processo de conversão, aerodinâmica, estratégias de controle e conexão à rede são alguns dos subtópicos presentes no capítulo.

O Capítulo 4 adentra no contexto da realidade virtual como artifício de otimização na metodologia de ensino e treinamento de diversas matérias, sendo especificamente tratados nos subtópicos, a energia eólica.

O Capítulo 5 trata da metodologia da construção do simulador proposto no trabalho: para cada módulo deste, são descritos os critérios e materiais usados para tornar a experiência do usuário a mais fiel e real possível de acordo com a teoria estudada.

O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos da ferramenta proposta na dissertação, na forma de simulações pontuais que atestem o grau de interatividade dos recursos do simulador, divididos em módulos distintos.

O Capítulo 7 levanta as conclusões estabelecidas acerca do conteúdo da dissertação, assim como sugestões para futuros trabalhos, enxergando este estudo como

uma contribuição a ser considerada no objetivo de aprimorar as formas de estudo e aprendizado no contexto da energia eólica.

1.2 Objetivos Gerais

- Elaborar uma ferramenta computacional de simulação didática em 3 dimensões na plataforma *Unity 3D* com funções de simulação de controle de potência, geração de energia e conexão à rede de um gerador eólico através de parâmetros de entrada controláveis pelo usuário, divididos em módulos em separado, para que este possa compreender através de imersão e simulação, os conceitos acima citados sobre a energia eólica.
- Propiciar a experiência ao usuário da ferramenta computacional de estar dentro de um ambiente de parque eólico, simulando e explorando as projeções perspectivas e transformações geométricas, dando a impressão de imersão em um ambiente virtual, onde ele irá conhecer aspectos construtivos e funcionamento da localidade.

1.3 Objetivos Específicos

- Estudar as interações do vento com a potência e energia útil à serem fornecidas para uso.
- Estudar os principais parâmetros construtivos relativos à engenharia elétrica que compõem a instalação de um Parque Eólico.
- Elaborar uma interface com o usuário do simulador, para que este possa introduzir os dados à sua escolha;
- Elaborar uma ferramenta que simule graficamente o comportamento da potência gerada através do tempo;
- Elaborar uma programação orientada ao objeto que possa ler todos os parâmetros e aplicá-los nas equações adquiridas na literatura, de modo a calculá-las, obter os resultados e mostra-los de maneira dinâmica e interativa. O usuário terá a opção de acompanhar a potência gerada no aerogerador através da variação da velocidade do vento (alterável na interface, ou de acordo com o tamanho da torre na localidade); a área útil das pás do aerogerador (podendo ser escolhidos modelos

distintos de pás e acompanhado seu desempenho através disto); Uso e variações do coeficiente de potência C_p da máquina nas condições de operação; Além da observação de vários aerogeradores operando no parque e seu impacto na geração de energia.

- Elaborar a animação da inclinação das pás dos aerogeradores, referenciando o controle do ângulo de *pitch*, associando com a programação orientada ao objeto e às estratégias de controle existentes.
- Elaborar uma seção onde o usuário poderá estimar a energia elétrica anual gerada por aerogeradores à sua escolha de acordo com a localidade também à escolha.
- Elaborar uma sessão que trabalhe os conceitos de conexão à rede, unindo as informações técnicas de máquinas específicas à teoria que envolve a qualidade de energia e sua conexão.
- Exportar o produto final do trabalho para, principalmente, as plataformas de *Web*, *PC*, tornando acessível ao usuário a utilização do simulador.

1.4 Revisão Bibliográfica

Nesta sessão, serão apresentados trabalhos desenvolvidos que envolvam ferramentas virtuais de simulação em 3D que tratam do contexto da energia eólica, utilizadas para fins didáticos.

Do et al., (2013), apresenta uma pesquisa que propõe uma solução inovadora para otimização do processo de aprendizagem de alunos do ensino superior pelo desenvolvimento de simuladores virtuais 3D que podem facilmente serem usados e integrados nas disciplinas de energia eólica. O objetivo é aplicar o protótipo de simulação para treinar os estudantes, assim como profissionais da área da energia eólica. Nas Figuras 1.1 e 1.2, são mostradas partes das simulações propostas em diferentes temáticas: em 1.1 (a) e (b), uma visão interativa dos componentes internos do aerogerador, com possibilidade de observação com recursos de *zoom* e mudança de ângulo; em 1.2 (a), os efeitos da incidência do vento nas pás do aerogerador e sua eficiência quando alterados os valores de velocidade do vento; em 1.2 (b), as forças atuantes na pá do aerogerador, de forma interativa.

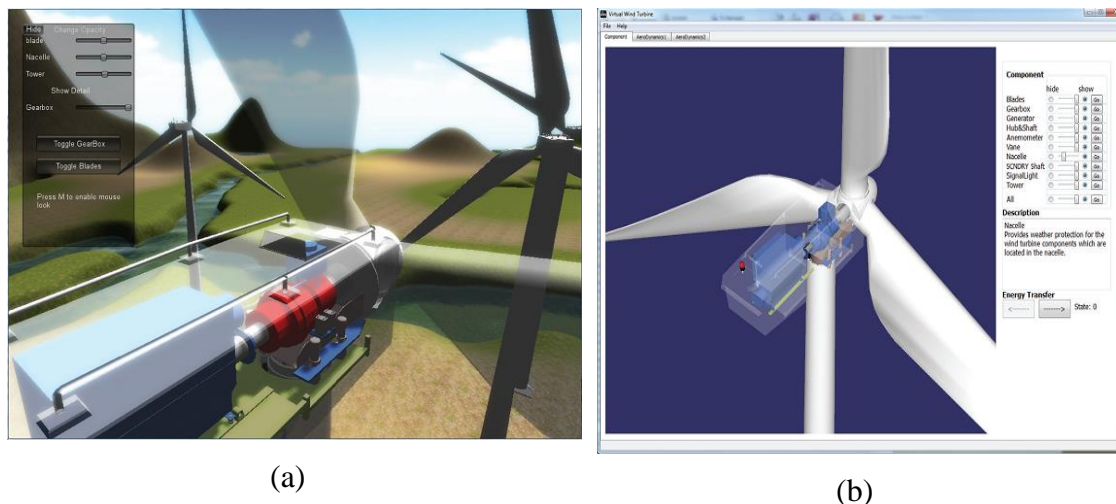


Figura 1.1 - (a) e (b) Visualização interna das partes constituintes do aerogerador, com recursos que permitem a interatividade na atividade

FONTE: DO et al., 2013

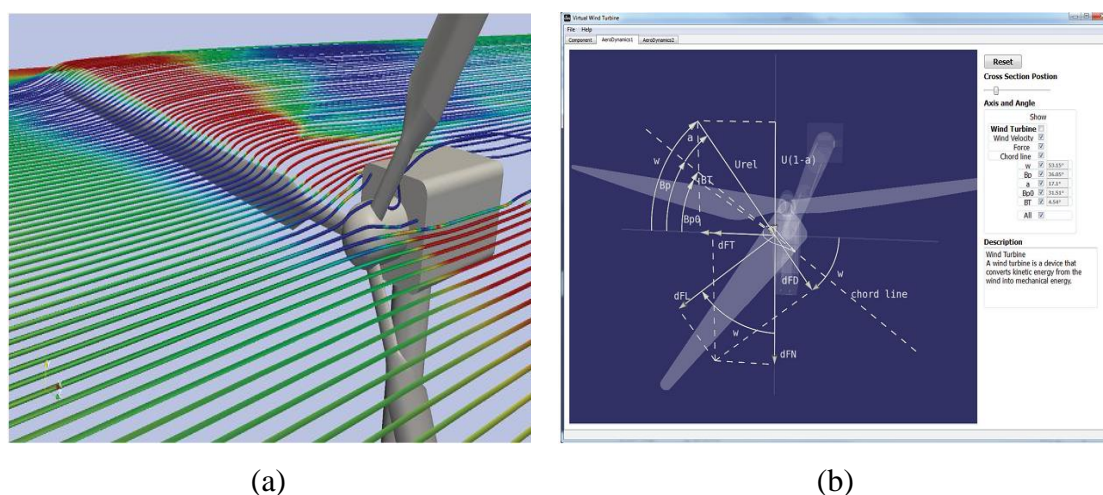


Figura 1.2 - (a) Aerodinâmica das pás do aerogerador sendo interpretadas através da variação da velocidade do vento (b) Forças atuantes nas pás do aerogerador em função da incidência do vento

FONTE: DO et al., 2013

Os simuladores foram dispostos para uso e interação a uma turma de universitário, estudantes de engenharia, para que, posteriormente, eles relatassem o quão útil foi a vivência com o simulador e os potenciais efeitos destes no processo de aprendizagem.

Dekker et al., (2013) descreve o projeto de nome *MARWind: Mobile Augmented Reality Wind Farm Visualization*, ou Realidade Aumentada Móvel para Visualização de

Parques Eólicos, onde objetiva aprimorar a educação e o treinamento de profissionais qualificados para o mercado, através da criação de um simulador que permita o usuário criar um parque eólico virtual na tela do celular, de acordo com a imagem que a câmera do dispositivo está capturando naquele momento, como visto na Figura 1.3:

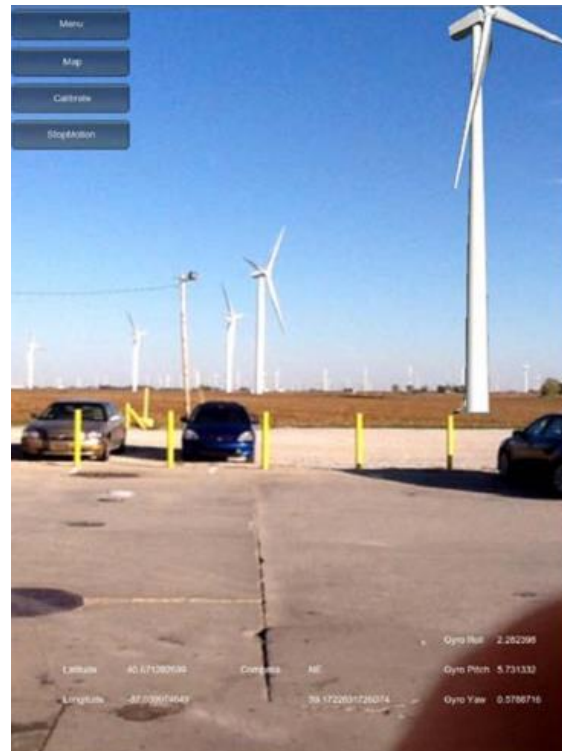


Figura 1.3 - MARWind usado em uma localidade real, inserindo os aerogeradores e simulando seu posicionamento em um parque eólico

FONTE: DEKKER et al., 2013

Na Figura 1.3, a localidade atual vista na tela do celular do usuário, é atualizada com a inserção de aerogeradores, com distâncias bem definidas para simular como seria a configuração e distribuição destes em um verdadeiro parque eólico.

1.5. Justificativa

Com o passar dos anos, torna-se evidente a evolução da tecnologia que nos rodeia: máquinas mais potentes, internet mais acessível e com maiores velocidades, aparelhos de telefone com recursos antes nunca imaginados, e muito mais. Há de se observar que,

concomitante ao avanço da tecnologia, deve estar também a progressão das técnicas de ensino utilizadas em sala de aula, objetivando otimizar o aprendizado dos alunos desta geração que é imersa num mundo tecnológico sem precedente. Assim, o modelo de ensino pautado na relação professor – aluno em sala de aula com recursos limitados tem se tornado obsoletos mediante a quantidade de informações cada vez maior que acompanha o mundo globalizado. Assim, a criação de uma ferramenta computacional de simulação em 3 dimensões baseada nos conceitos de Realidade Virtual surge como uma alternativa de grande valia no processo de ensino aprendizagem moderno.

Aliando ao objetivo de melhoria do processo de ensino, cabe ressaltar o contexto da ferramenta criada neste trabalho: simulação de atividades realizadas em um parque eólico no que se refere principalmente a práticas do interesse à engenharia elétrica e eletrotécnica. Sua existência justifica-se quanto ao seu objetivo que, além das informações técnicas à serem disponibilizadas, o modo didático e interativo que ele dispõe, permitirá o maior interesse do público, contribuindo para uma capacitação mais eficaz de profissionais a adentrar na indústria da energia eólica, cada vez mais difundida e em expansão no nosso país, principalmente no Estado do Rio Grande do Norte, maior produtor de energia eólica do Brasil.

CAPÍTULO 2

HISTÓRICO, PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS DA ENERGIA EÓLICA

A energia eólica surge como um dos principais expoentes no contexto de fontes alternativas de energia. Vem crescendo ao longo dos anos em termos de geração de potência, mostrando desenvolvimento e consolidação na matriz energética nacional e seu objetivo de dispor de outras fontes, alternativas à vigência e soberania da fonte hídrica e fóssil.

Neste capítulo, serão apresentados diversos aspectos referentes à energia eólica, desde relevância histórica, princípios, panorama nacional, mundial, até tecnologias, aquisição e aproveitamento da energia presente no vento.

2.1 História da Energia Eólica no Mundo

Tratar historicamente da energia disponível nos ventos é informar que seu aproveitamento se deu em diferentes contextos, desde movimentação de barcos na antiguidade até a geração de eletricidade, objeto de estudo no trabalho. Portanto, a abordagem sobre a história da energia eólica será geral, tratando não somente da evolução dos aerogeradores, mas sim, de todas as formas de aproveitamento do vento.

O título de “descoberta” do emprego da energia presente nos ventos é dos antigos Egípcios, em 5000 A.C, os quais inventaram os barcos a vela que se moviam segundo a intensidade e direção dos ventos que nele sopravam. Embora não haja registros de quem exatamente inventou o primeiro moinho de vento, arqueólogos encontraram em vasos chineses datados do terceiro milênio Antes de Cristo, desenhos do que seriam moinhos utilizados na irrigação, corte de madeira e moagem de grãos. Durante o século XI, os povos do Oriente Médio utilizavam o a força do vento por intermédio dos moinhos para a produção de alimentos (EL-SHARKAWI, 2016).

No século XIII, mercantes estrangeiros que comerciavam no Oriente Médio, além de participantes de cruzadas marítimas que invadiam a região trouxeram a tecnologia dos moinhos de vento para a Europa. Na Holanda, os moinhos ainda são utilizados na drenagem de terras abaixo do nível do rio Rhine. Ainda no passado, trabalhar com essa tecnologia era uma das atividades mais perigosas da Europa, pois os trabalhadores eram frequentemente atingidos e

feridos pelas enormes massas que estavam em rotação sem nenhum tipo de controle. Eram constantes os casos de surdez (moagem) e problemas respiratórios (material advindo da trituração de grãos), além de queimaduras. Além da produção de energia mecânica, os moinhos eram utilizados para comunicação, na Segunda Guerra Mundial. O moinho era travado em uma posição específica que passava uma mensagem de alerta para os vizinhos de possíveis ataques de seus inimigos (EL-SHARKAWI, 2016). No Século XVI, percebendo a grande difusão dos moinhos de vento na Holanda, o bispo declarou uma taxa anual cobrada aos donos dos moinhos no objetivo de arrecadar fundos para a Igreja. Histórias da época como Dom Quixote já retratavam a presença dessa tecnologia: nela, o protagonista via os moinhos como gigantes armados que ameaçavam sua amada Dulcinéia (PINTO, 2013).

O século XIX marcou a chegada do moinho de vento à América do Norte, trazida pelos Europeus. Em terras novas, a tecnologia era usada para bombeio de água para irrigação da agricultura. O primeiro moinho comercial foi construído por Daniel Halladay, em 1854. Era inovador pelo fato de que ele se alinhava à direção do vento (Figura 2.1):



Figura 2.1 - Moinho de Halladay

Fonte: EL-SHARKAWI, 2016

Durante esse século, mais de 1000 fábricas utilizavam sua tecnologia, embora o aparelho fosse constantemente quebrado devido à ventos fortes e rajadas de vento (EL-SHARKAWI, 2016).

Julho de 1887 é a data do surgimento do primeiro aerogerador, ou seja, a primeira máquina que aproveita a energia dos ventos para a geração de eletricidade. O feito é atribuído ao Engenheiro Eletricista Escocês James Blyth, que rearranjou a tecnologia, conectando o rotor à um dínamo, onde iria alimentar sua casa (PINTO, 2013). A Figura 2.2 mostra o escocês e o aerogerador desenvolvido por ele.

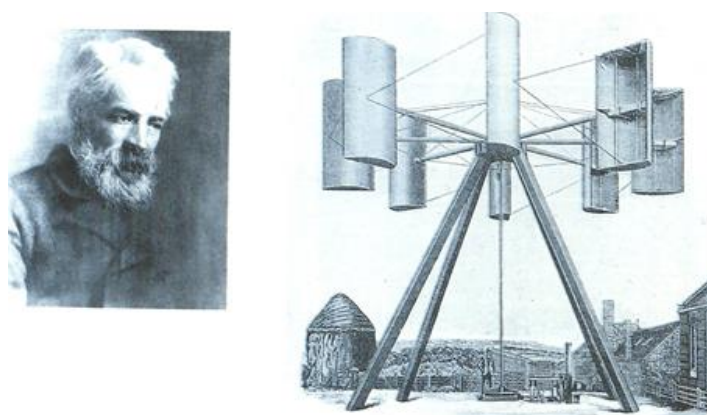


Figura 2.1 - James Blyth e o primeiro Aerogerador

FONTE: PINTO, 2013

Algumas referências costumam tratar o americano Charles Brush como o autor do primeiro aerogerador, no ano de 1888, pela construção de uma máquina de 20 metros de altura, que pesava 36 toneladas, de potência 12 kW (Figura 2.3). Porém, há registros suficientes para aferir que Brush construiu não o primeiro, mas sim o segundo aerogerador da história (PINTO, 2013).

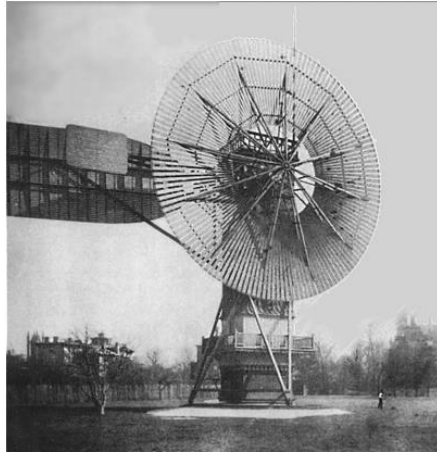


Figura 2.2 - Aerogerador criado por Charles Brush

FONTE: PINTO, 2013

Em 1891, o dinamarquês Paul La Cour construiu seu modelo de aerogerador. Sua contribuição foi importante, pois foi o primeiro a fazer experimentos no que se refere à performance e rendimento de um aerogerador. Concluiu que a relação do número de pás e a energia obtida não era linear, além de afirmar via testes que pás curvadas capturam mais energias, afirmações estas que contribuíram para o desenvolvimento dos modernos aerogeradores (EL-SHARKAWI, 2016). O primeiro aerogerador que fornecia corrente alternada foi criado por Johannes Juul, em 1957. Dinamarquês, aluno de La Cour, sua turbina foi a primeira a utilizar a tecnologia do estol para controle de potência (PINTO,2013). A Figura 2.4 mostra Johannes e seu aerogerador, com 24 m de diâmetro.



Figura 2.3 - Johannes Juul e o primeiro aerogerador AC

FONTE: PINTO,2013

Com a criação da máquina a vapor e a expansão das linhas de transmissão de energia para as áreas rurais, o interesse nas turbinas eólicas caíram. Retornou novamente durante a crise do petróleo nos anos de 1970, principalmente devido à generosos incentivos fiscais oferecidos pelo governo dos Estados Unidos. Conseqüentemente, muitos parques eólicos lá foram construídos entre os anos de 1970 e 1980. Porém, os aerogeradores eram caros e com custo de manutenção elevadíssima, além de gerar problemas na rede que alimentavam, como *flickers*¹ e afundamentos de tensão (EL-SHARKAWI, 2016).

O interesse pela energia eólica declinou novamente na década de 1980 por razões como (EL-SHARKAWI, 2016):

- Preço do petróleo caiu substancialmente por volta de 1985;
- Apesar dos incentivos, a baixa rentabilidade que a tecnologia oferecia devido à baixa produtividade e defeitos técnicos frequentes contribuíram para o fim desses incentivos;
- Design frágil com alta demanda de manutenção;
- Custo de eletricidade gerada era muitas vezes maior do que as fontes convencionais;

Para frear o declínio do interesse na energia dos ventos, os Estados Unidos providenciaram um novo tipo de incentivo fiscal, em 1992, baseado na produção de eletricidade ao invés do custo de instalação, que ficou conhecido como Taxa de crédito por produção (do inglês, *Production Tax Credit – PTC*). O PTC encorajou investimentos maiores em pesquisas que maximizariam a eficiência dos aerogeradores e sua produção de eletricidade. Como resultado, atualmente, o custo da energia produzida reduziu significativamente, se comparando ao custo de geração das usinas de combustível fóssil (EL-SHARKAWI, 2016).

O comércio de aerogeradores tem se desenvolvido rapidamente durante os últimos anos. Modelos cada vez maiores e mais potentes têm surgido, embora alguns desafios logísticos tenham que ser considerados, como transporte rodoviário de componentes muito grandes do aerogerador. A Figura 2.5 mostra o desenvolvimento do tamanho e da potência das turbinas. Atualmente, a maioria dos aerogeradores comerciais de maiores potências (ordem de MW) está instalada na Alemanha, o que mostra a importância do seu mercado no desenvolvimento técnico mundial. Muito disso se deve ao fomento do mercado eólico interno com o “Programa

¹ É a variação de tensão muito rápida e ocorrer em frequências baixas, visíveis ao olho humano, devido a flutuações nas condições do vento. Pode ser entendida também como a impressão subjetiva da variação de densidade da luz das lâmpadas. (Pinto, 2013).

Experimental de 250 MW” na década de 80, e mais tarde, no início da década de 90, com a “Lei de Alimentação de Eletricidade” (DUTRA, 2001).

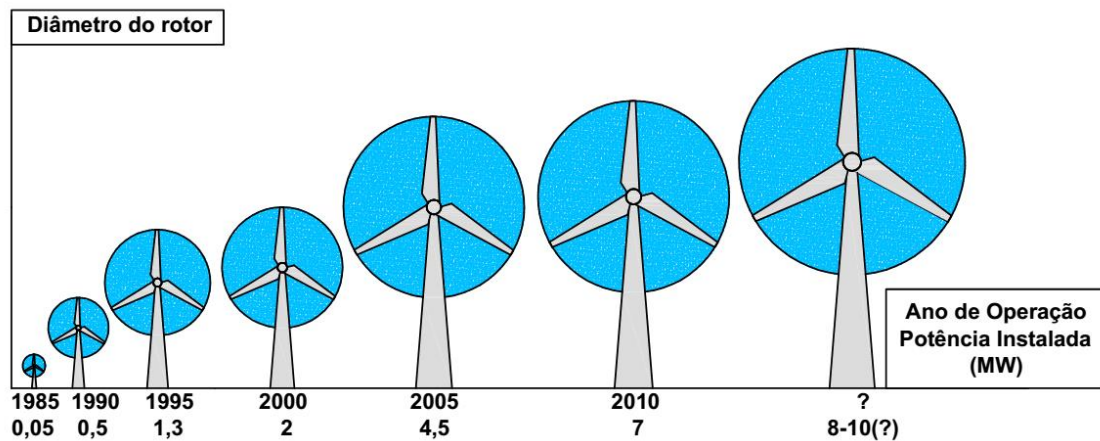


Figura 2.4 - Crescimento da dimensão das turbinas eólicas

FONTE: Adaptado de PINTO, 2013

2.2 Matriz Eólica Mundial

Como resultado do crescente investimento em uma fonte que alia os benefícios de renovabilidade, limpeza, rentabilidade e eficiência, o Gráfico 2.1 mostra a evolução da capacidade instalada em empreendimentos envolvendo energia eólica no mundo, desde 2000 até o ano de 2015. Já o Gráfico 2.2 apresenta a quantidade de potência instalada pontualmente naquele ano, no mesmo período de tempo.

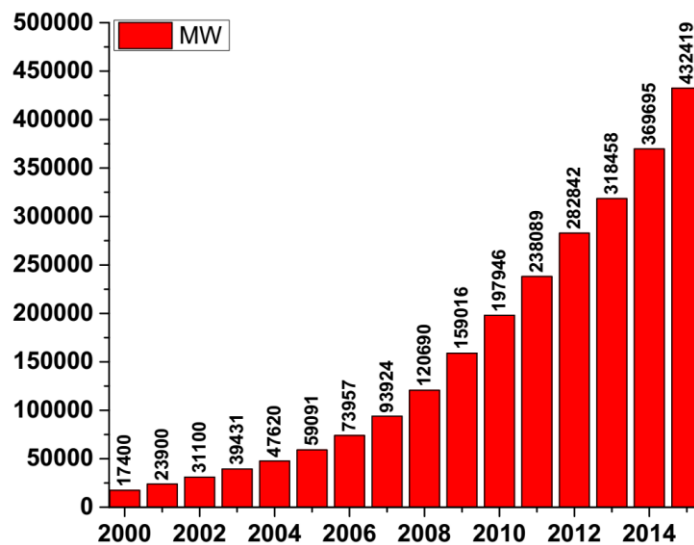


Gráfico 2.1 - Capacidade Instalada de Energia Eólica acumulada no mundo 2000-2015

FONTE: Adaptado de GWEC, 2016

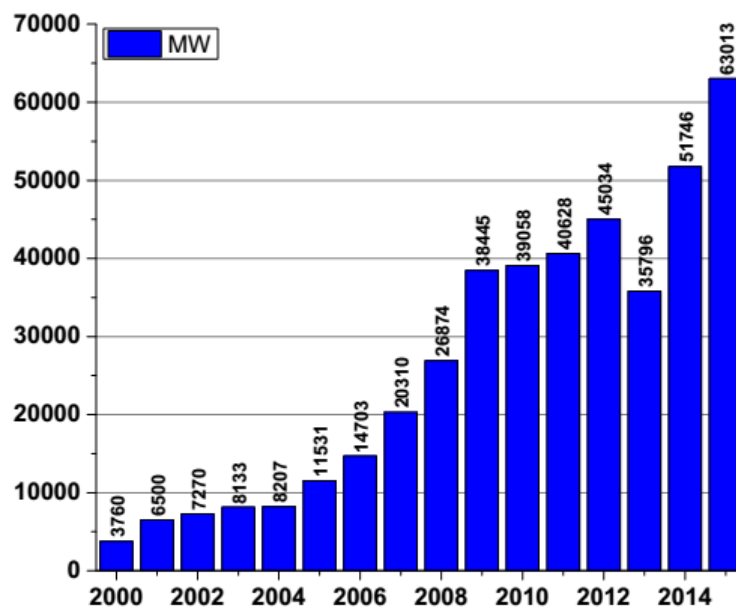


Gráfico 2.2 - Capacidade Instalada de Energia Eólica pontual no mundo 2000-2015

FONTE: Adaptado de GWEC, 2016

Embora tenha-se destacado no tópico anterior o papel histórico relevante no desenvolvimento da energia eólica na Europa e América, há de se destacar o papel da China no mercado eólico, evoluindo em uma velocidade assustadora no quesito investimento e potência instalada dessa tecnologia, figurando assim, como líder mundial na produção de energia limpa. Os gráficos 2.3 e 2.4 mostram as potências instaladas acumuladas durante o período de 2000 a 2015 e a potência instalada de janeiro a dezembro de 2015, respectivamente.

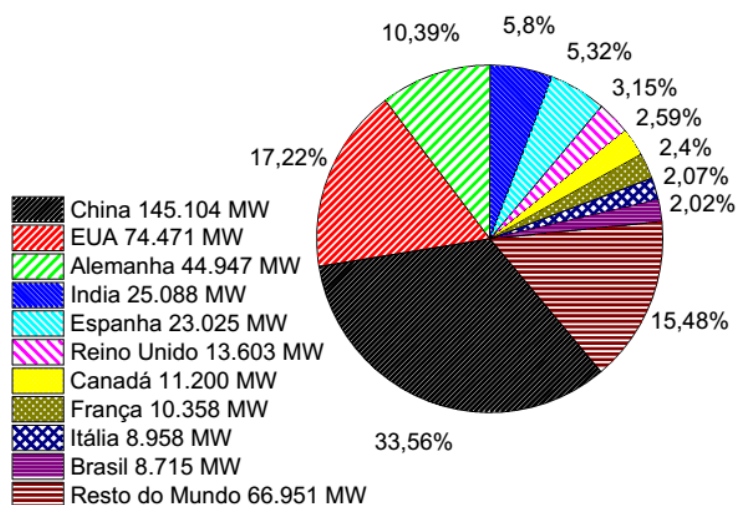


Gráfico 2.3 - Potência acumulada entre 2000 e 2015

FONTE: Adaptado de GWEC, 2016

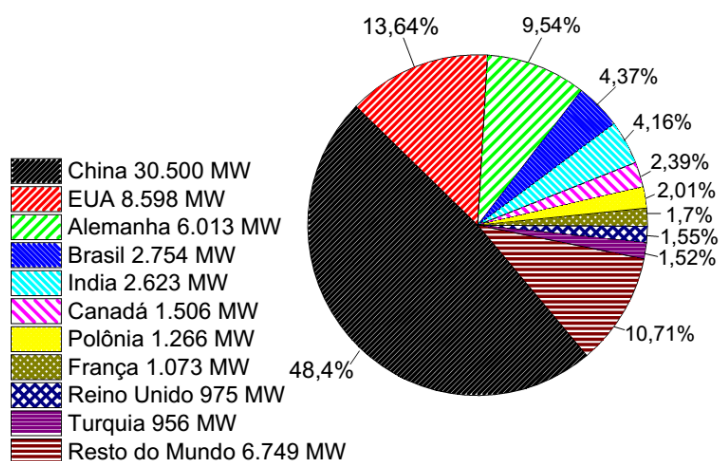


Gráfico 2.4 - Potência instalada de janeiro a dezembro de 2015

FONTE: Adaptado de GWEC, 2016

2.3 Energia Eólica no Brasil – Motivações, panorama e desenvolvimento

Nos gráficos explanados anteriormente, observa-se que, embora o Brasil ainda não mostre protagonismo mundial no que se refere à potência eólica acumulada, o crescimento decorrente do maior investimento e construção de mais parques eólicos leva o país a ter sido o 4º do mundo que mais instalou aerogeradores em seu território. Isso é decorrência de uma valorização da tecnologia da energia dos ventos recente. Essa valorização justifica-se pelo enorme potencial que o país detém quando se trata de energia eólica, como mostra estudo presente no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, na Figura 2.6.

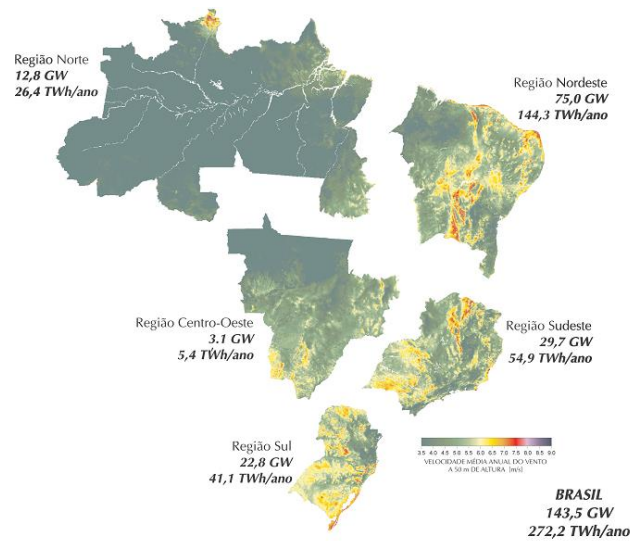


Figura 2.5 - Potencial Eólico estimado para vento médio igual ou superior a 7,0 m/s

FONTE: CEPEL, 2001

Pode-se dizer que, motivado pela crise de abastecimento de energia elétrica ocorrida em 2001, o Brasil iniciou os trabalhos no intuito de diversificar sua matriz energética. No contexto da energia eólica, no mesmo ano, a Resolução nº 24, da Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica – GCE, criou o Programa Emergencial de Energia Eólica – Proeólica, com o objetivo de promover o aproveitamento dessa fonte de energia, de modo a viabilizar, até dezembro de 2003, a implantação de 1.050 MW de geração eólica, o equivalente a 50 vezes a capacidade instalada da época. O incentivo consistia na compra pela Eletrobrás por 15 anos da energia produzida pelas usinas eólicas que entrassem em operação até o final de 2003 (OLIVEIRA; ARAÚJO, 2015).

Mais tarde, no ano de 2002, uma das mais influentes ações para impulsionar o uso de novas fontes renováveis de energia foi realizada: a criação do Proinfa (Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia), através da aprovação da Lei n. 10.438. A primeira parte do programa tinha como meta adicionar 3.300 MW de potência instalada na matriz divididas igualmente em energia eólica, PCH e biomassa. A sua segunda versão, nomeada de Proinfa 2, objetivava a participação dessas 3 fontes em 10% do consumo de eletricidade nos próximos 20 anos (FADIGAS, 2011).

O Proinfa apresentava incentivos a instauração de novas fontes renováveis na matriz energética do Brasil através de (FADIGAS,2011):

- A garantia do acesso da eletricidade renovável à rede elétrica e o pagamento de preço fixo, diferenciado por tipo de fonte de energia renovável;

- Leilão de projetos de energia renovável, determinando cotas de potência contratada para cada tecnologia;
- Subsídios por meio de linhas especiais de crédito de Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), que cobria até 70 % do investimento dos empreendimentos;
- A responsabilidade da Eletrobrás em contratar durante 20 anos projetos selecionados no âmbito do programa;
- Incentivo ao índice de nacionalização dos empreendimentos energéticos;
- Através da Lei n. 10.762 de 11 de novembro de 2003, permitiu a participação de mais estados no programa e excluiu consumidores de baixa renda do pagamento do rateio da compra de energia nova.

O Proinfa — principal marco para a inserção das fontes renováveis no setor elétrico — enfrentou barreiras significativas à sua implementação, mas foi através de sua experiência que o país adquiriu capacidade para promover métodos e estrutura para o desenvolvimento da geração renovável, uma opção alternativa à geração proveniente das grandes usinas hidrelétricas. Não obstante um cenário adverso, a geração eólica foi a maior beneficiada com o Proinfa, uma vez que a capacidade contratada para essa fonte foi superior àquela preestabelecida, apesar de seu alto custo na época de sua criação. Nos dias atuais, a contratação das fontes renováveis acontece por meio de leilões de energia específicos para essas fontes. (OLIVEIRA; ARAÚJO, 2015).

Atualmente, o modelo vigente para a concessão de empreendimentos eólicos se dá principalmente por meio de leilões de energia específicos para fontes renováveis. Essa prática tem como meta, garantir a segurança de suprimento de eletricidade à rede através de plantas de geração contratadas especialmente para tal propósito (OLIVEIRA; ARAÚJO, 2015).

Para se ter a dimensão do panorama da energia eólica no Brasil, faz-se necessário a explanação de alguns conceitos difundidos no Banco de Informações de Geração – BIG, ferramenta virtual da ANEEL que fornece dados atualizados de geração de energia elétrica de cada uma das fontes utilizadas no país. No *website*, os empreendimentos energéticos são tratados segundo 3 categorias distintas: Empreendimento em operação; Empreendimento em construção e Empreendimento com construção não iniciada.

São apresentados nos Gráficos 2.5, 2.6 e 2.7, a situação da matriz energética brasileira em termos das situações descritas acima.

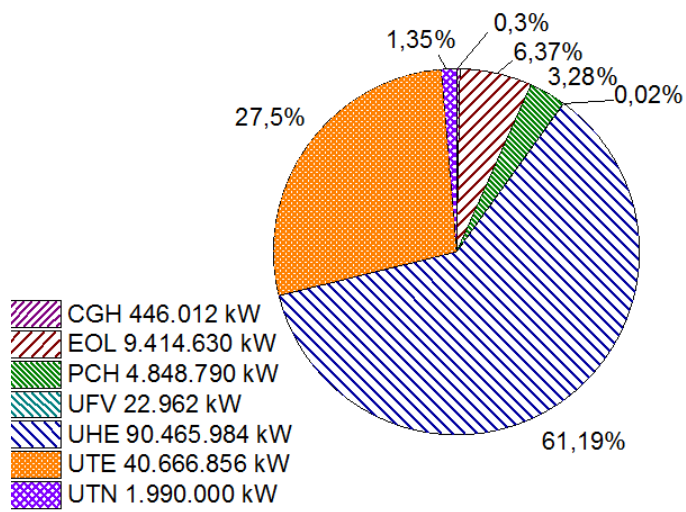


Gráfico 2.5 - Matriz Energética Brasileira – Em Operação

FONTE: Adaptado de ANEEL, 2016

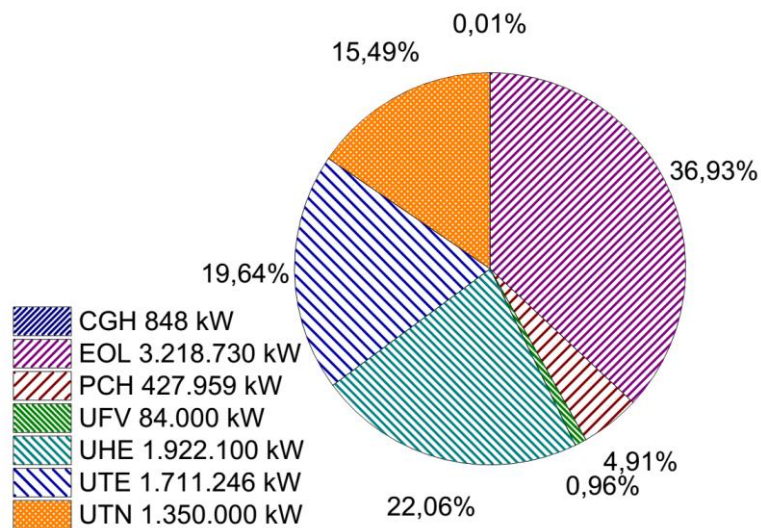


Gráfico 2.6 - Matriz Energética Brasileira – Em Construção

FONTE: Adaptado de ANEEL, 2016

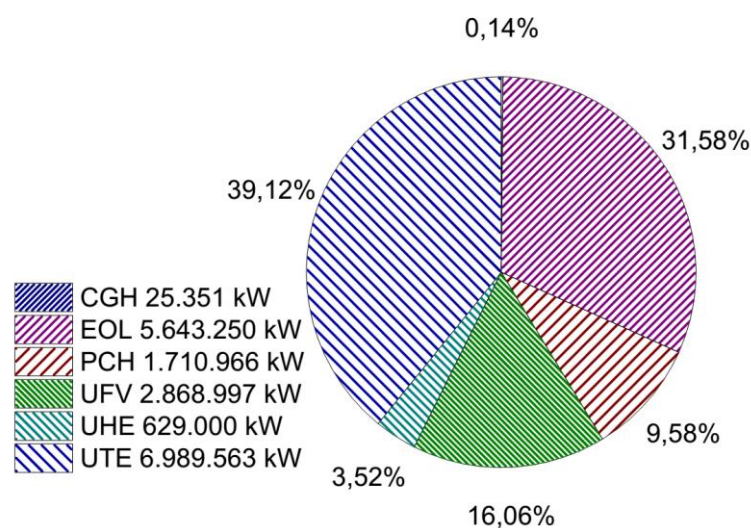


Gráfico 2.7 - Matriz Energética Brasileira – Construção não iniciada

FONTE: Adaptado de ANEEL, 2016

As siglas representadas nos gráficos representam, respectivamente: CGH – Central Geradora Hidrelétrica; EOL – Central Geradora Eólica; PCH – Pequena Central Hidrelétrica; UFV – Central Geradora Solar Fotovoltaica; UHE – Usina Hidrelétrica; UTE – Usina Termelétrica; UTN – Usina Termonuclear

A interpretação dos gráficos mostra, a princípio, a tímida, porém relevante participação da energia eólica na matriz energética nacional, ocupando 6,37% do total. Mas o maior destaque refere-se aos empreendimentos que estão atualmente em construção, com os parques eólicos liderando a estatística. No que se refere àqueles cuja construção ainda não foi iniciada, a energia dos ventos ocupa papel de destaque, com 31,58% dos projetos contratados.

Objetivando setorizar o país no tocante a potência em operação, construção e contratação, a Figura 2.7 traz, na forma do mapa do Brasil, as informações adquiridas no BIG – ANEEL sobre a participação de cada estado em relação a energia eólica:

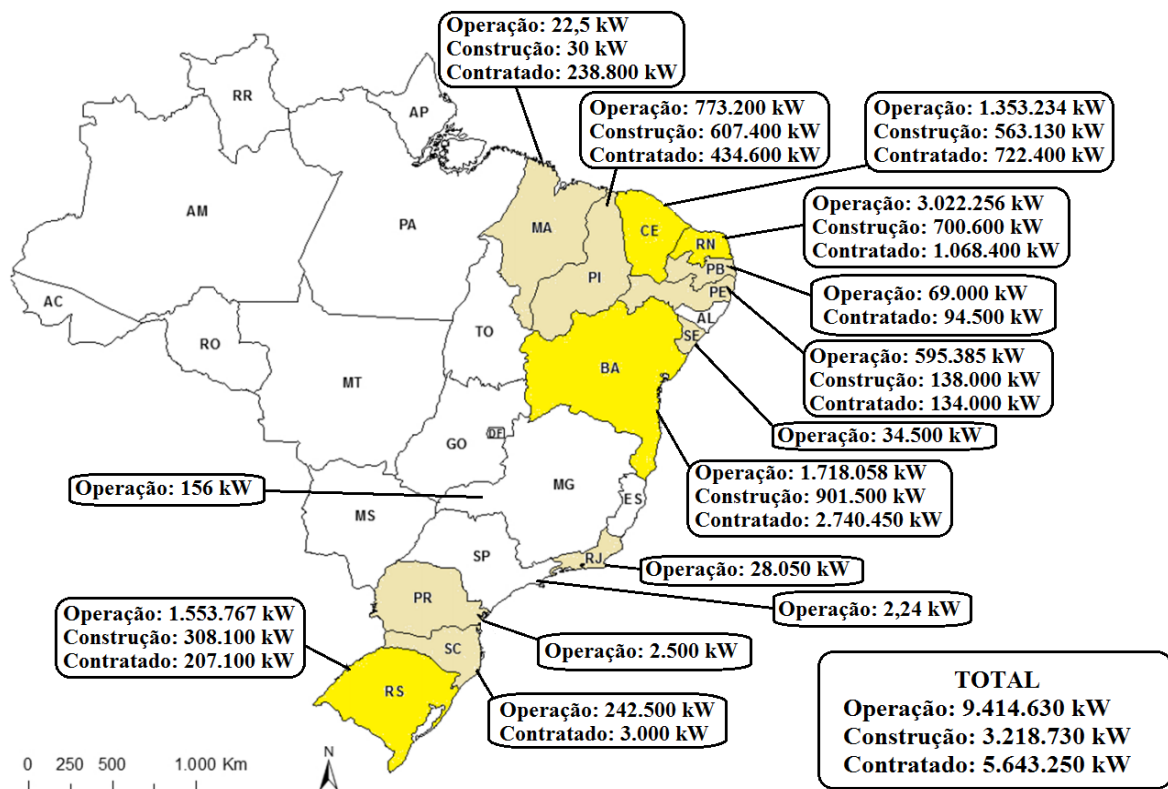


Figura 2.6 - Distribuição de parques eólicos em operação, construção e contratados

FONTE: adaptado de OLIVEIRA;ARAUJO, 2015; atualizado com dados de ANEEL, 2016

Os dados da Figura 2.7 destacam a soberania de quatro estados em relação ao uso dos ventos para geração de energia elétrica: Rio Grande do Norte, Bahia, Rio Grande do Sul e Ceará são, respectivamente, os maiores produtores de energia eólica. O Rio Grande do Norte, recentemente, bateu o recorde nacional de geração, superando os 3 GW de potência instalada. Embora hoje ocupe essa liderança, os dados de potência contratada mostram que logo o estado da Bahia ocupará esse espaço, com 5,36 GW² de potência total.

Dados da ABEEólica (2016) mostram que todo esse investimento nessa modalidade de energia renovável resulta numa redução de emissão de 17.267.894 Toneladas/ano de CO₂, o que corresponde a cerca de 11 milhões de automóveis emitindo o dióxido de carbono na atmosfera.

² Admitindo uma perspectiva futura, somando os valores de potência em operação, em construção e contratada.

2.4 O vento como recurso energético

Pode-se definir o termo vento como sendo o ar atmosférico em movimento natural. Característica essa, que é uma premissa fundamental para a geração de eletricidade. Portanto, aprofundar os conhecimentos sobre esse recurso surge como uma alternativa interessante para suprir a necessidade de geração de energia e contemplar os objetivos de diversificação da matriz nacional.

O que gera o movimento do ar é a circulação das camadas de ar provocada pelo aquecimento desigual do planeta, via raios solares. O total de radiação que chega à Terra é de aproximadamente 1,58 bilhão de TWh/ano, o que corresponde a uma média de 350 W/m² sobre a superfície do planeta, sendo distribuído em maior quantidade, próximo à linha do Equador, do que nos pólos. Cerca de apenas 3% a 5% da radiação que chega é convertida em energia cinética que possa provocar o movimento da atmosfera por meio das diferenças de temperatura, formando a base para a fonte da energia eólica (PINTO, 2013).

O vento é um recurso renovável que está em constante movimento relativo à superfície da Terra. Mas uma de suas características mais relevantes vem do fato de ele ser estocástico, ou seja, depende ou resulta de uma variável aleatória; além de sua magnitude e direção estarem mudando continuamente sendo modificadas. Dessa forma, pode-se admitir que o vento não é uma variável que se possa ser controlada (EL-SHARKAWI, 2015). Do ponto de vista da geração de energia, a mais preponderante característica do recurso eólico é sua variabilidade, tanto geográfica quanto temporal. Além disso, essa variabilidade persiste por grandes escalas, ambas no espaço e no tempo, o que torna relevante sua análise quanto à energia disponível nos ventos (BURTON et al., 2001).

São 3 os principais fatores que determinam a velocidade do vento: Força Gradiente de Pressão, força de *Coriolis* e a rugosidade do terreno, sendo o primeiro fator o de natureza mais estocástica.

1. Força Gradiente de Pressão: advém da forma circular da Terra e seu alinhamento em relação ao Sol. Este, aquece a toda a Terra em temperaturas desiguais por toda sua superfície. Assim, duas áreas adjacentes com diferentes temperaturas causam uma diferença de pressão. Esta, por sua vez, causará um fluxo de ar no sentido de maior pressão para o de menor pressão, objetivando igualar as temperaturas. Dessa forma, quanto maior a força gradiente de pressão, maior será a velocidade do vento.

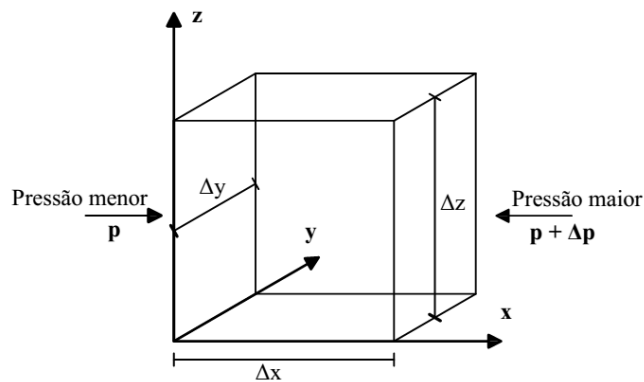


Figura 2.7 - Pressão Horizontal que atua em um pequeno elemento diferencial de um fluido
 FONTE: Adaptado de PINTO, 2013

2. Força de *Coriolis*: Ocorre devido à rotação da Terra. O efeito *coriolis* é a deflexão do movimento do ar quando ele é visto por um quadro de referência, como a superfície da Terra. Dessa forma, as forças gradiente de pressão e *coriolis* determinam a magnitude e direção do vento;
3. Rugosidade: É um termo que se refere à condição da superfície do local onde se estuda o comportamento do vento: quanto mais rugoso, maior será o atrito do vento, reduzindo assim sua velocidade. Superfícies lisas, como a água, reduzem o atrito com o ar. Florestas ou construções, prédios, diminuem sua magnitude de maneira significativa. Para aferir quantitativamente essa influência do terreno quanto à sua topografia e meteorologia, existe um método aproximado, representado na Equação 2.1.

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\mu \quad (2.1)$$

Onde:

μ é o coeficiente de atrito. É função do terreno e sua topologia. Alguns valores típicos são: $\mu = 0,143$ para lugares abertos; $\mu = 0,4$ para grandes cidades; $\mu = 0,1$ para águas calmas

v é a velocidade do vento na altura h

v_0 é a velocidade do vento conhecido na altura

Quanto a magnitude dos ventos, pode-se quantificar esses valores através da Escala de força do vento de Beaufort, que foi desenvolvida em 1805 pelo Irlandês Francis Beaufort. A escala é mostrada na Tabela 2.1. A escala de 3 a 9 é ideal para os mais modernos aerogeradores

operarem. Abaixo de 3, o vento não é forte o suficiente para justificar a rotação das turbinas. Acima de 9, o vento é muito forte e pode danificar os aerogeradores (EL-SHARKAWI, 2016).

Tabela 2.1 - Escala de Beaufort para magnitude dos ventos

Escala Belfort	Velocidade do vento por períodos maiores que 10 minutos	Termo Geral
0	<1	Calmo
1	1-3	Vento leve
2	4-6	Brisa leve
3	7-10	Brisa calma
4	11-16	Brisa moderada
5	17-21	Brisa fresca
6	22-27	Brisa forte
7	28-29	Ventania moderado
8	30-33	Ventania fresca
9	34-40	Ventania forte
10	41-47	Gale total
11	48-55	Tempestade
12	56-63	Furacão
13	64-72	
14	73-85	
15	86-89	
16	90-99	
17	100-106	
	107-114	
	115-119	
	>120	

FONTE: EL-SHARKAWI, 2016

2.5 Estatística dos ventos e estimativa do potencial eólico

Denomina-se prospecção como a fase de levantamento de áreas e de dados de vento. Esta, sugere atividades de campo e equipe multidisciplinar no apoio para decisão da escolha da área do projeto eólico e escolha dos pontos de medição do recurso eólico. Posteriormente, elaboram-se os projetos básico e executivo, que subsidiarão a fase da construção. Essa etapa é objeto de mitigação de riscos de negócio para o proprietário do parque, além de fundamentar o planejamento de investimentos e amortização financeira (OLIVEIRA; ARAÚJO, 2015).

As primeiras ferramentas de análise do potencial eólico nesta fase inicial da concepção do parque são estudos que se iniciam com um modelo macro, Mesoescala, como é mais conhecido. Nele, são utilizados dados de torres anemométricas com alturas entre 10 e 50 m espalhadas pela região que já possui um histórico de dados de velocidade e direção do vento de pelo menos 12 meses. Os dados medidos são então validados e correlacionados com dados de estações meteorológicas existentes na região, as quais normalmente possuem um histórico de vários anos de dados de velocidade e direção do vento, porém em uma altitude menor. Após essa validação, esses dados são tratados para considerar a influência do relevo e a rugosidade da região (PAVINATTO, 2005).

Nesse contexto, tem-se o vento como uma incógnita extremamente variável, cabendo uma avaliação estatística bem apurada. Uma vez que a medição da frequência dos ventos é coletada e analisada, o potencial do parque também pode. Uma forma de se trabalhar com essa estatística é representá-lo na forma de variável discreta, como mostrado no Gráfico 2.8:

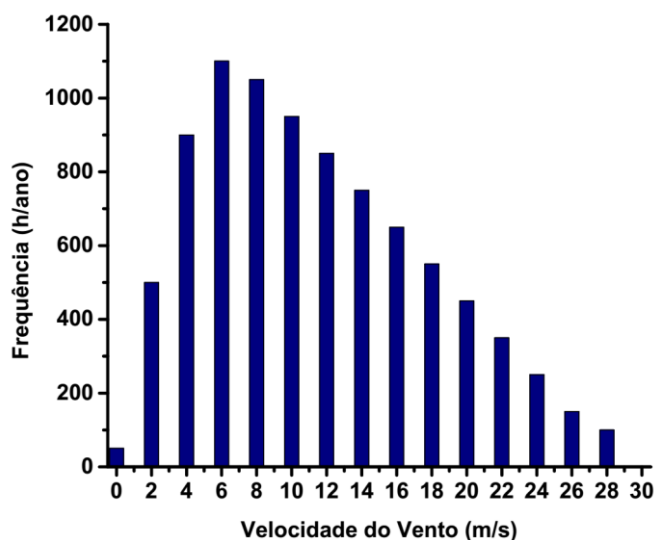


Gráfico 2.8 - Frequência de distribuição em horas por ano de vento

FONTE: Adaptado de EL-SHARKAWI, 2015

No objetivo de padronizar em termos estatísticos o tratamento dos dados relativos à velocidade dos ventos, o Gráfico 2.9 mostra a probabilidade de ocorrência dos mesmos dados usados no Gráfico 2.8.

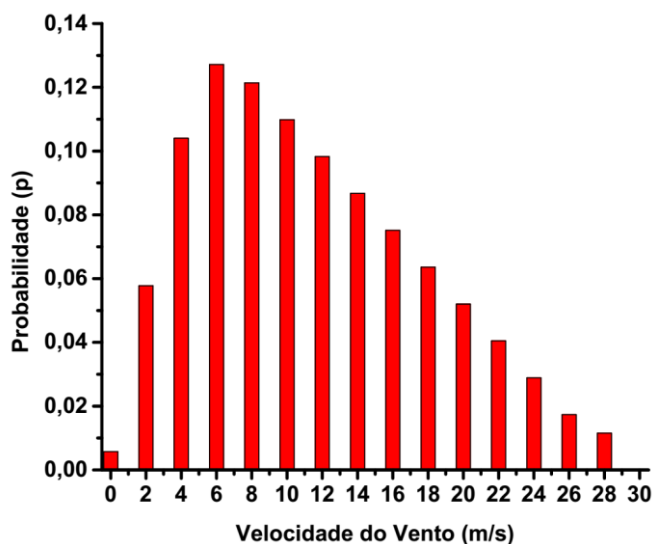


Gráfico 2.9 - Probabilidade de ocorrência de velocidade do vento

FONTE: Adaptado de EL-SHARKAWI, 2015

O uso de dados brutos (vistos nos gráficos anteriores) para análises não são tão simples porque as medições podem ser imensas em tamanho, difíceis de gerir, além de gerarem certa dificuldade para se extrair uma informação específica dela. Além disso, os dados podem ser escassos em alguns intervalos. Para solucionar esses problemas, funções matemáticas que podem representar as características dos dados coletados podem ser usadas ao invés das informações brutas. Elas são conhecidas como Funções Densidade Probabilidade (EL-SHARKAWI, 2016).

As informações antes discretas, agora são dispostas de forma contínua na função densidade probabilidade. As principais características dela, como podem ser vistas no Gráfico 2.10, são que a área total compreendida por ele é igual a unidade, além desse mesmo recurso servir para aferir com exatidão a probabilidade de ocorrência dos ventos de um intervalo a outro (MASTERS, 2004). A expressão matemática é dada por:

$$f(v) = \text{função densidade probabilidade}$$

$$\text{probabilidade } (v_1 \leq v \leq v_2) = \int_{v_1}^{v_2} f(v)dv \quad (2.2)$$

$$\text{probabilidade } (0 \leq v \leq \infty) = \int_0^{\infty} f(v)dv = 1$$

Em se tratando de um modelo para descrever probabilisticamente o comportamento dos ventos em um local, pergunta-se, qual a função densidade probabilidade mais adequada? Pesquisadores tem encontrado funções convenientes; duas delas são as mais comumente usadas: Função Distribuição de *Weibull* e Função Distribuição de *Raileigh*.

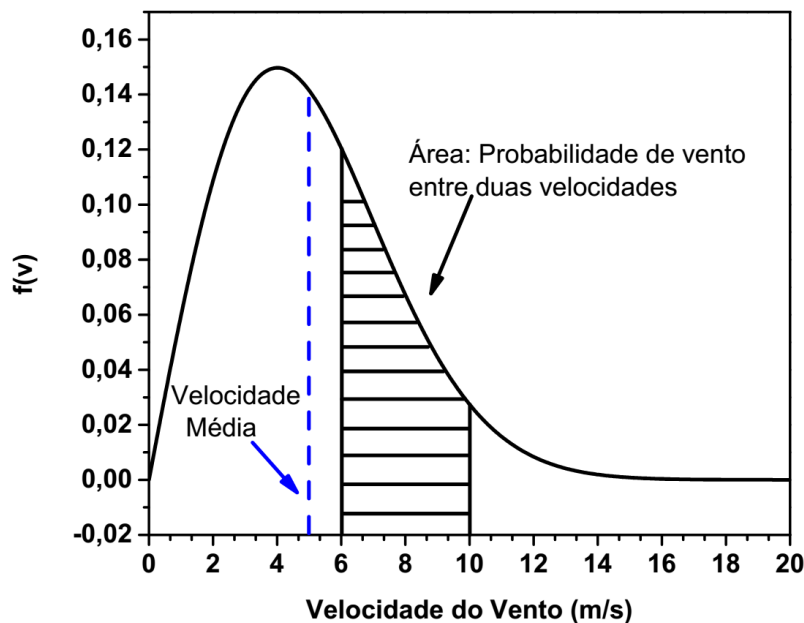


Gráfico 2.10 - Função Densidade Probabilidade dos ventos

FONTES: Adaptado de MASTERS, 2004

A Função Distribuição de *Weibull* é dada segundo a Equação (2.3):

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \quad (2.3)$$

Onde:

c é o parâmetro de escala, que pode ajustar principalmente a magnitude da função;

k é o parâmetro de forma, que pode movimentar o pico da função.

Os efeitos dos dois parâmetros citados podem ser vistos nos Gráficos 2.11 (a) e (b). Algumas literaturas citam valores pré-definidos para os parâmetros c e k . Porém, um método aproximado pode ser usado para obtê-los em termos da velocidade média e desvio padrão dos dados brutos. São descritos nas equações 2.4 e 2.5.

$$k \approx \left(\frac{\sigma}{v_{méd}} \right)^{-1,086} ; \text{para } 1 \leq k \leq 10 \quad (2.4)$$

$$c \approx \frac{v_{méd}}{\Gamma \left[1 + \left(1/k \right) \right]} \quad (2.5)$$

Onde:

$$\Gamma \left[1 + \left(1/k \right) \right] = \int_{x=0}^{\infty} x^{1/k} e^{-x} dx \quad (2.6)$$

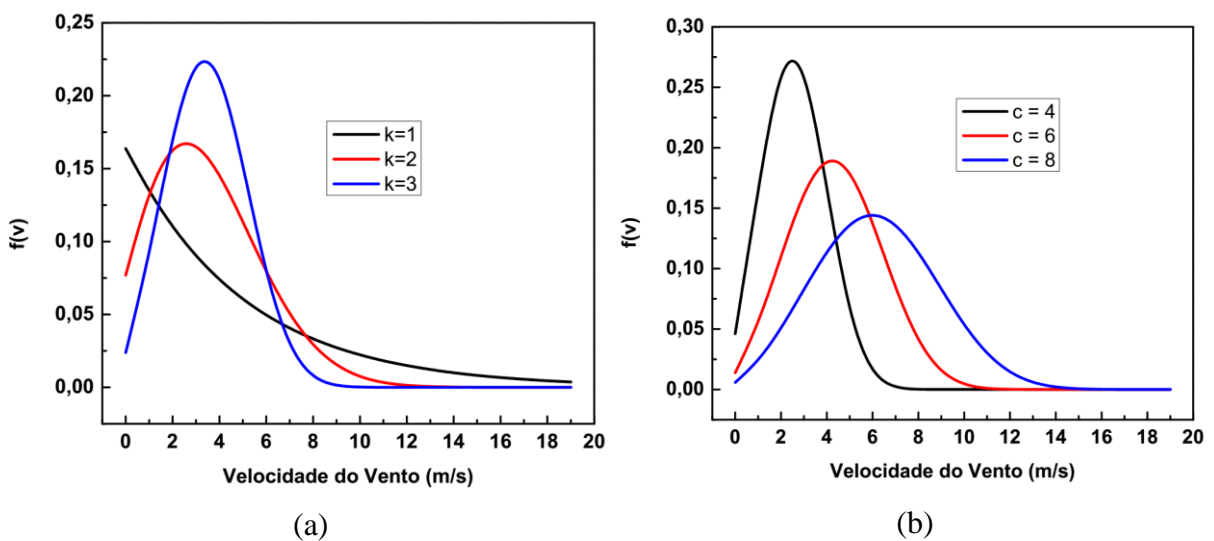


Gráfico 2.11 - (a) Função densidade probabilidade de Weibull com parâmetros de forma $k = 1, 2$ e 3 (com parâmetro de escala fixo em $c = 6$); (b) Função densidade probabilidade de Weibull com parâmetros escala $c = 4, 6$ e 8 (com parâmetro de forma fixo em $k = 3$)

FONTE: Adaptado de MASTERS, 2004

A função distribuição de *Rayleigh* é uma equação de duas incógnitas. É mais simples que a função de *Weibull* (é a mesma, porém com parâmetro k fixo em 2), porém menos precisa. É usada geralmente em estudos preliminares, quando basta o conhecimento da velocidade média do vento para encontrar a sua frequência de distribuição. Resulta na Equação 2.7:

$$f(v) = \left(\frac{2v}{c}\right)^2 e^{-(v/c)^2} \quad (2.7)$$

Outro fator influente na caracterização do potencial eólico de um local é a direção de onde o vento é proveniente. Uma ferramenta útil para aferir essa característica é a rosa dos ventos, mostrada na Figura 2.9, exibindo a velocidade e a direção do vento distribuídas em uma determinada área.

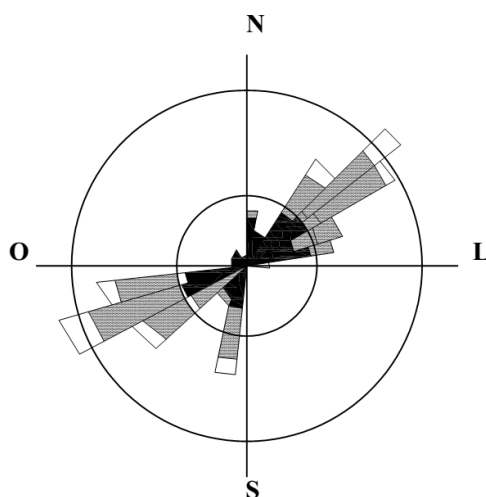


Figura 2.8 - Rosa dos ventos: indicando magnitude e direção dos ventos

FONTE: Adaptada de PINTO, 2013

Os dois círculos concêntricos representam cada um, uma frequência diferente, partindo do zero até suas extremidades. Além dessas informações, a rosa dos ventos pode trazer consigo um código de cores, que mostrará as faixas de velocidade do vento e o percentual de tempo que este sopra de uma direção particular e em certa faixa de velocidade. As ocorrências de velocidade são separadas, segundo sua direção, em 12 setores de 30° ou 16 de $22,5^\circ$, igualmente espaçados. O comprimento de cada setor é proporcional à frequência do vento. Na Figura 9, é visto que no centro, há ventos mais calmos, por exemplo.

2.6 Potência disponível no vento

Para estimar a potência disponível extraída da movimentação dos ventos, será tomado um modelo matemático-físico que objetivam refletir a absorção de energia eólica. Um anel imerso numa corrente de ar, mostrado na Figura 2.10 é escolhida para representar esse modelo:

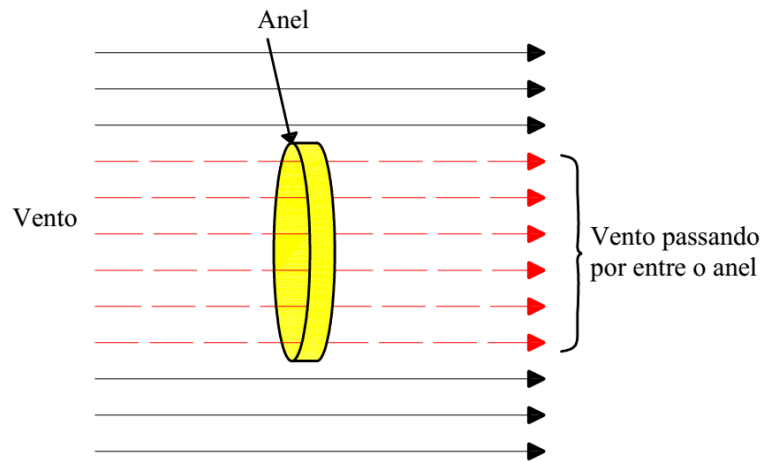


Figura 2.9 - Vento passando por entre o anel

FONTE: Adaptado de EL-SHARKAWI, 2016

A energia cinética da massa de ar é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.8)$$

Onde

E_c é a energia cinética do vento

m é a massa do vento (kg)

v é a velocidade de deslocamento (m/s)

A massa de ar pode ser computada como a Equação 2.9:

$$m = A d \rho \quad (2.9)$$

Onde

ρ é a densidade do ar (kg/m³)

A é a área de captação do vento (m²)

d é o comprimento da coluna de ar (m)

Esse comprimento d é variante no tempo, ou seja, depende da velocidade do vento :

$$d = v t \quad (2.10)$$

Onde

v é a velocidade do vento (m/s)

t é o tempo (s)

Dessa forma, a massa de ar que passa por entre o anel é dada, finalmente, por:

$$m = A \rho v t \quad (2.11)$$

Substituindo (2.11) em (2.8), tem-se:

$$E_c = \frac{1}{2} A \rho t v^3 \quad (2.12)$$

E assim, devido a energia cinética ser resultante do produto entre potência e tempo, é possível estimar a potência disponível (P_v) de uma massa de ar passando por um anel de área A a uma velocidade v :

$$P_v = \frac{1}{2} A \rho v^3 \text{ (W)} \quad (2.13)$$

Interpretando a Equação 2.13, conclui-se que a potência disponível no vento é diretamente proporcional ao cubo da velocidade deste, ou seja, se o vento aumentar 10% em sua velocidade, significa que a potência irá aumentar em 33%. Na Figura 2.11 é mostrado o comportamento padrão dessa potência em relação à velocidade do vento. Percebe-se daí o quão importante é essa variável para aferir a viabilidade da implementação de um parque eólico em uma localidade.

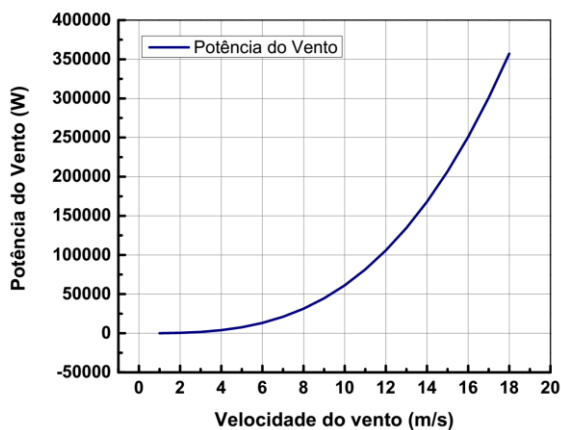


Figura 2.10 - Potência do Vento x Velocidade do vento

FONTE: Autoria própria

O parâmetro vento é tão importante que, foi feito um estudo com o objetivo de estimar as velocidades médias dos ventos incidentes em todo o território brasileiro. O estudo é disponibilizado no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, e é mostrado na Figura 2.12:

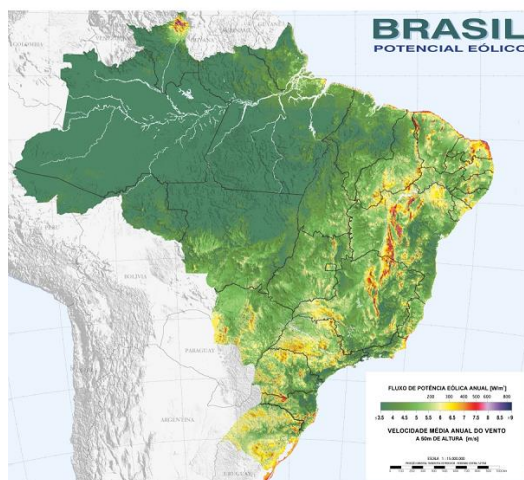


Figura 11 - Velocidades dos ventos no território nacional

FONTE: CEPEL, 2001

Conhecendo como estimar a potência eólica em um local e a disponibilidade do vento nesta localidade, é possível entender melhor o porquê da concentração dos investimentos em energia eólica nos estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Bahia e Rio Grande do Sul (Figura 2.7).

2.7 Geração de Energia estimada em um aerogerador

A geração de energia elétrica via aerogeradores exige dados precisos. Somente com eles, é possível uma análise técnica e econômica mais apurada. Os dados eólicos também são importantes para o aprimoramento dos equipamentos, buscando desenvolvimento de perfis de aerogeradores otimizados para uma determinada região (DUTRA, 2001).

Para uma análise do potencial eólico destinado à geração de energia elétrica, faz-se necessário um nível de detalhamento maior do comportamento do vento em uma determinada região. Os dados disponíveis atualmente podem apresentar valores médios anuais, sazonais, mensais, médias diárias, médias horárias ou até mesmo médias de 10 minutos da velocidade do vento. Para a obtenção de dados relevantes nesse contexto, existe o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: documento que cobre todo o território nacional com o objetivo de fornecer informações para capacitar tomadores de decisão na identificação de áreas adequadas para aproveitamentos eólio-elétricos (CRESESB, 2016).

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro apresenta mapas temáticos dos regimes médios de vento (velocidade, direções predominantes e parâmetros estatísticos de *Weibull*) e fluxos de potência eólica na altura de 50 m, na resolução horizontal de 1km x 1km, para todo o País. No site do CRESESB, é disponível a consulta da base de dados de vento, que possibilita a captação de todas as características acima citadas sobre o vento de pontos próximos da coordenada geográfica inserida pelo usuário. A Figura 2.13 mostra o ambiente de consulta:

Coordenada Geográfica

Latitude Longitude Sul Oeste

Norte:

graus decimais (00.00°)

graus, minutos e segundos (00°00'00")

Figura 2.12 - Ambiente de consulta dos parâmetros de vento

FONTE: CRESESB, 2016

A consulta de dados é realizada a partir dos dados de latitude e longitude do ponto de interesse. O formato numérico de entrada da coordenada pode ser feita em graus decimais (00.00°) ou graus, minutos e segundos (00°00'00''). Na Figura 2.14, um exemplo de aplicação e coleta dos dados obtidos.

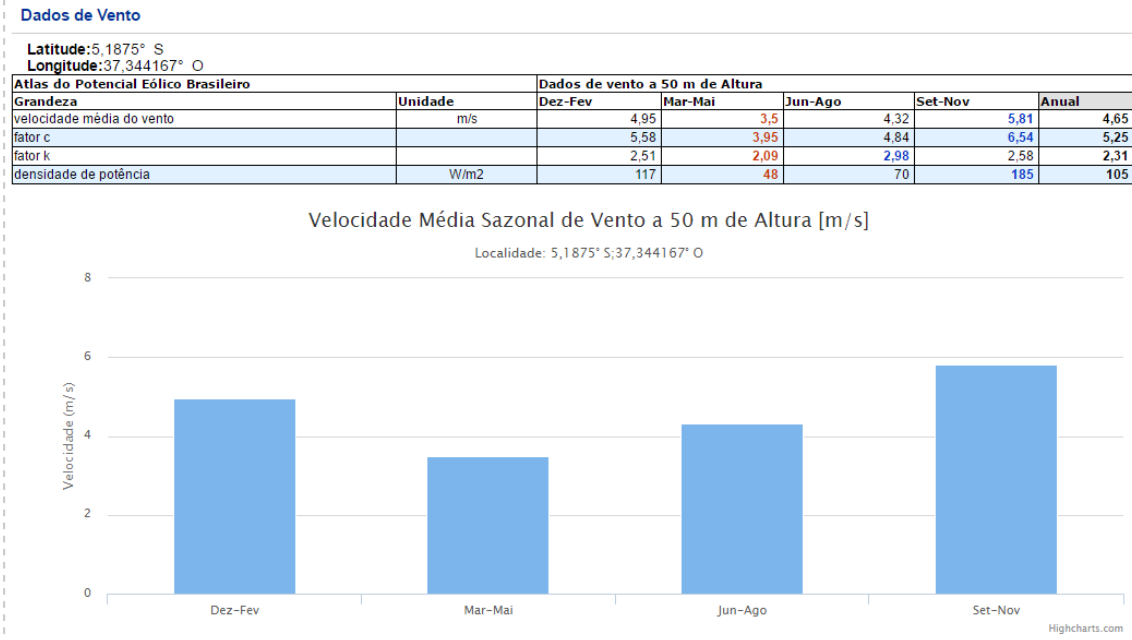


Figura 2.13 - Dados de vento através da latitude e longitude de um local

FONTE: CRESESB, 2016

A energia produzida por um determinado aerogerador, caracterizado por uma curva de potência, em um determinado local, caracterizado por uma função de distribuição de probabilidade de velocidades de vento, é obtida multiplicando, em primeiro lugar e para cada velocidade de vento, o valor da curva de potência pelo valor da função de distribuição para essa velocidade de vento e, em segundo lugar, somando todos os resultados obtidos. Este processo é, na realidade, uma integração do produto da curva de potência pela função de distribuição de velocidades de vento, e o resultado é a energia média produzida, que é o parâmetro com o qual se caracteriza a energia gerada por um aerogerador em um local. Este procedimento é realizado geralmente com algum programa de computador ou com uma folha de cálculo (ARRIBAS, 2013).

Há de se destacar que essa etapa é comum a qualquer tipo de aerogerador, independentemente de como foi realizada a caracterização do recurso eólico. Isso quer dizer que tanto para um aerogerador de menor porte, quanto para um aerogerador de grandes proporções, o cálculo da produção energética teórica é realizada da mesma forma. A diferença é que, no primeiro caso, trabalha-se com uma função de distribuição de probabilidade de

Weibull estimada a partir de, por exemplo, um atlas eólico da região, enquanto no segundo caso, a função densidade probabilidade deverá ser calculada a partir de dados coletados no local (ARRIBAS, 2013).

Através dos dados de energia produzida em um determinado gerador, é possível aferir um parâmetro importante no tocante a eficiência da máquina: o fator de capacidade de uma turbina (F_c). Este, é uma taxa percentual que exprime a relação entre a energia elétrica gerada e sua capacidade de produção. Considera-se, para os cálculos, o período de 1 ano, obtendo-se a energia anual gerada (EAG), em kWh, que é mostrada na Equação 2.14:

$$\begin{aligned} EAG &= \sum [f(v)P(v)] \times 365 \text{ dias} \times 24 \text{ horas} \\ &= \sum [f(v)P(v)] \times 8760 \text{ (kWh)} \text{ (kWh)} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Com $f(v)$ sendo a frequência percentual de ocorrência da velocidade do vento e P a potência produzida pela turbina na velocidade do vento v . Assim, o fator de capacidade de uma turbina eólica é dado pela equação 2.15:

$$F_c = \frac{(EAG)}{8760 \times P_n} \quad (2.15)$$

Em que P_n é a potência nominal do vento. Geralmente, o fator de capacidade de uma turbina eólica varia na faixa de 40 a 50%. Valores maiores representam uma máxima produção de potência. Por exemplo, uma turbina de 2MW e fator de capacidade de 33% irá produzir: $0,33 \times 2 \times 24 \times 365 = 5781,6$ MW por ano. O fator de capacidade, sendo assim, calcula os limites da produção de potência que são inerentes às propriedades do vento na localidade tomada (PINTO, 2013).

CAPÍTULO 3

O AEROGERADOR

Aerogerador, ou turbina eólica, é como são conhecidas as máquinas que aproveitam a energia cinética do vento e a convertem em energia elétrica. Para um aproveitamento em larga escala e obtenção de uma quantidade de energia elétrica considerável, os aerogeradores são dispostos de modo a constituir um Parque Eólico. Este, irá gerar a energia e transportá-la através das linhas de transmissão e seguir pelos sistemas de distribuição até o consumo.

Neste Capítulo, serão explorados todos os componentes de um aerogerador, sendo abordados conceitos, equações, funcionalidades e peculiaridades de cada item que forma a turbina eólica, até sua forma de conexão à rede.

3.1 Conversão e partes constituintes

A conversão da energia eólica em elétrica se dá, de maneira geral, através da seguinte sequência, através dos seguintes constituintes principais:

1. Uma torre alta o suficiente para expor as pás da turbina a ventos fortes o suficiente para satisfazer as condições de geração. Grandes turbinas podem ter torres acima de 250 metros acima de sua base. Esta, deve suportar os esforços da estrutura como um todo.
2. A nacelle é a estrutura que comportará o maquinário interno do aerogerador. Está localizada no topo da estrutura.
3. Captação e conversão da energia cinética dos ventos: essa etapa acontece na parte externa da máquina, nas pás do aerogerador. Estas, irão girar por consequência da porção de ar incidente sobre o conjunto. As pás irão girar um eixo principal, convertendo assim, a energia cinética em energia mecânica de rotação; elas podem ter tamanhos variando de 5 a 100 metros.
4. Uma estrutura denominada cubo, onde as pás estão conectadas e através dele que há sua junção com o eixo principal. São dotadas, em alguns modelos, de mecanismos denominados *pitch*, para ajustar o ângulo longitudinal da pá.

5. O mecanismo de guinada (yaw), que rotacional a nacele para posicionar-se face a incidência do vento;
6. Multiplicação da velocidade do eixo: internamente à nacele, o eixo girante está acoplado à caixa de engrenagem, que tem função de aumentar a rotação do eixo vindo das pás. A etapa é necessária pois, para a conexão do eixo principal no gerador elétrico, somente a velocidade da primeira etapa não se faz suficiente.
7. Geração de Energia Elétrica: O eixo que deixa a caixa de engrenagens está com rotação elevada e adequada aos padrões de geração. Assim, este é conectado ao gerador elétrico, convertendo a energia mecânica em energia elétrica.
8. Um disco de freio para prevenir que as pás rotacionem a uma velocidade que ponha a segurança do conjunto em risco.
9. Transformação e conexão à rede: A energia elétrica deixa o gerador e tem seu nível de tensão alterado para os seus devidos fins através do transformador. A conexão com a rede é realizada mediante “tratamento” da tensão gerada e transformada objetivando boa compatibilidade e segurança com a rede elétrica.

A Figura 3.1 mostra o esquema geral de conversão de energia, bem como os principais itens constituintes de um aerogerador:

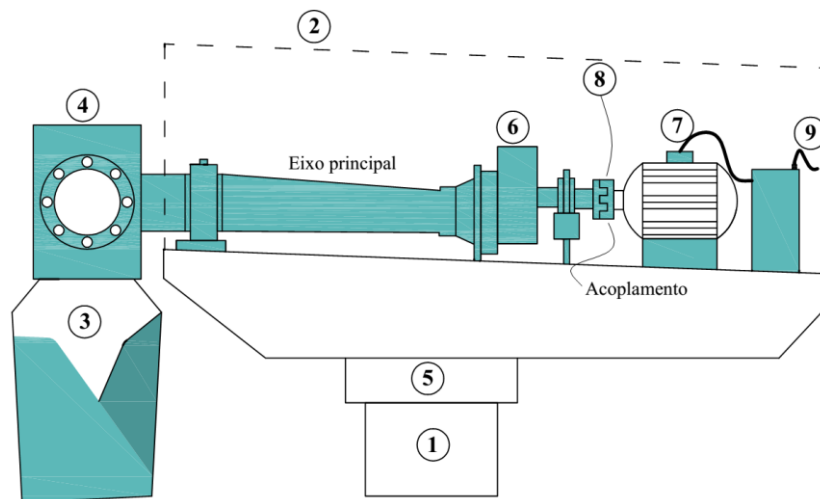


Figura 141 - Estrutura e partes constituintes de um aerogerador

FONTE: Adaptado de EL-SHARKAWI, 2016

Quanto a sua orientação e disposição, os aerogeradores são classificados em:

- a) Turbinas de eixo horizontal - Figura 16 (a)
- b) Turbinas de eixo vertical – Figura 16 (b)

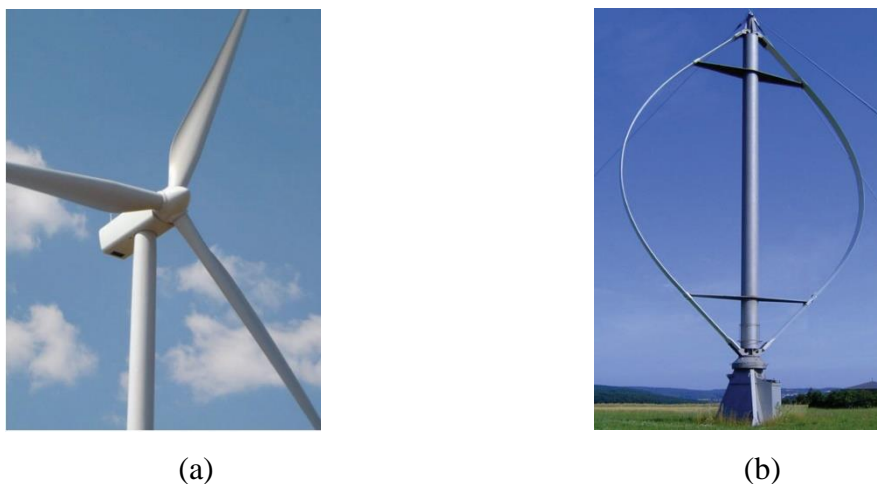


Figura 3.2 - Turbinas de eixo horizontal (a) e vertical (b)

FONTE: EL-SHARKAWI, 2016

Apesar de ambas terem suas características individuais que denotam vantagens e desvantagens, são mais comumente utilizadas, principalmente numa escala de geração em maior quantidade de energia, as turbinas de eixo horizontal por apresentarem maior eficiência de produção e menores índices de falhas.

3.2 Aerodinâmica das pás

As pás dos aerogeradores tem semelhança em relação ao seu formato no geral com asas de aviões. A sessão transversal da pá é chamada de aerofólio, e seu formato e componentes estão representados na Figura 3.3:

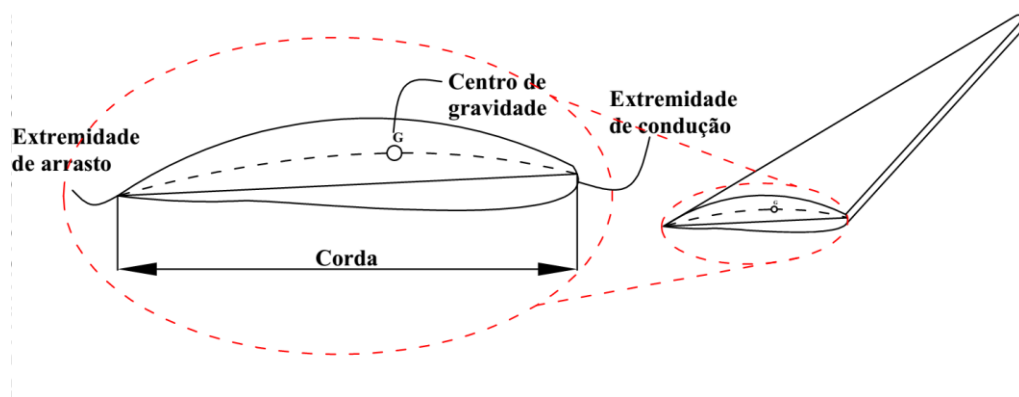


Figura 3.3 - Aerofólio

FONTE: Adaptado de HEMANI, 2012

O aerofólio é a parte da pá que desenvolve a potência mecânica; a extremidade de condução é a superfície na qual primeiramente entra em contato com o ar; a extremidade de arrasto é por onde o ar deixa a pá; a corda pode ser definida como a distância entre as duas extremidades acima citadas; o “G” representado na Figura 3.3, refere-se ao centro de gravidade da pá. A largura e o comprimento da pá são funções do desempenho aerodinâmico desejado, das propriedades do aerofólio considerado, da máxima potência desejada do rotor e das forças envolvidas (PINTO,2013).

As forças aerodinâmicas de uma pá são controladas pelo ângulo de ataque. Convencionado como α , ele pode ser definido como o ângulo entre a direção incidente de vento (v) e a corda. Na Figura 3.4, estão representadas as forças aerodinâmicas resultantes F para alguns ângulos de ataque diferentes:

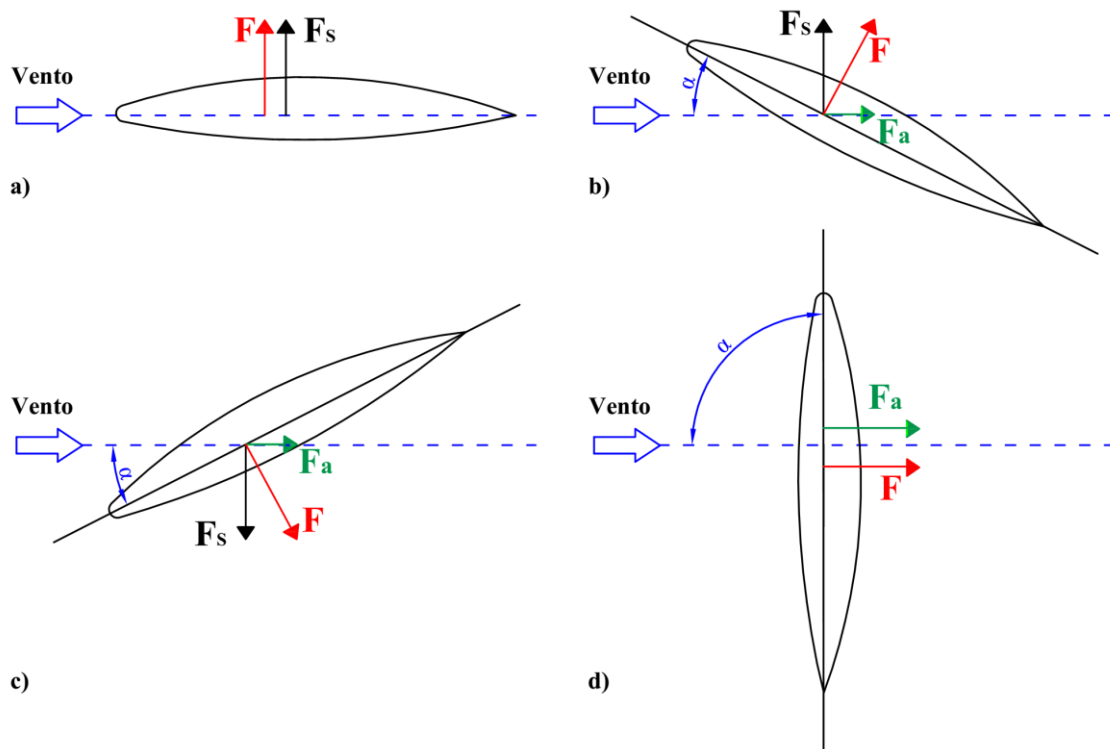


Figura 3.4 - Forças aerodinâmicas em relação ao ângulo de ataque α

FONTE: Adaptado de EL-SHARKAWI, 2016

Na Figura 3.4 a), o ângulo de ataque em relação a corda é zero. Assim, toda a força aerodinâmica resultante é a Força de Sustentação (F_s). Em 3.4 b), o ângulo α é positivo em relação a direção do vento incidente. Nesse caso, a força aerodinâmica resultante é decomposta em duas outras componentes no centro de gravidade da pá: a

perpendicular é a força de sustentação (F_s); a da direção da corda é chamada de Força de Arrasto (F_a). Em 3.4 c), o ângulo α é negativo, ocorrendo o oposto de 3.4b). Em 3.4 d), o ângulo α se eleva até alcançar 90° , resultando numa força de sustentação nula e na máxima força de arrasto. Quando na situação de tempestades de vento, o aerogerador põe suas pás em uma situação de embandeiramento. O que não é o caso exatamente da Figura 3.4 d), pois o arrasto poderia causar uma força tremenda que causaria deformação ou defeito na pá. No embandeiramento, o ângulo de ataque é negativo. Quando as pás saem do α negativo para o positivo, a força de sustentação vai a zero depois se inverte. Na posição onde não há força de sustentação, as pás estão em embandeiramento. Na Figura 3.5, é mostrado o comportamento da força de sustentação em relação ao α :

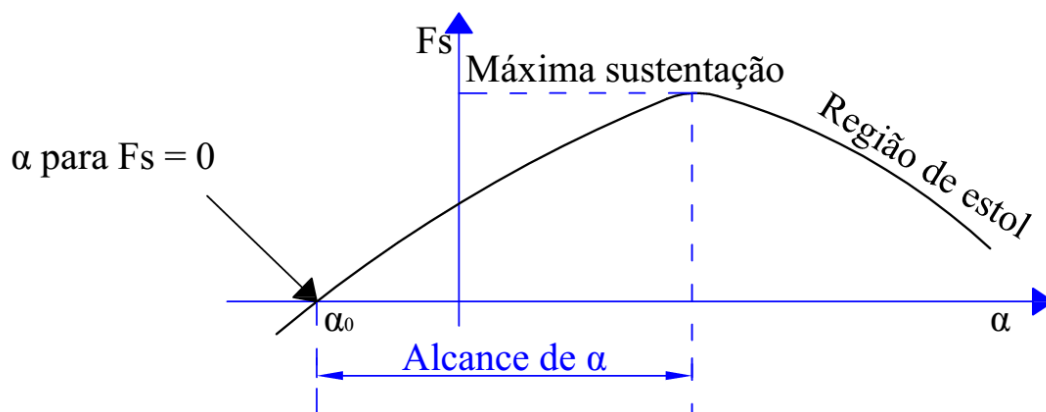


Figura 3.515 - Força de sustentação em função do ângulo α

FONTE: Adaptado de EL-SHARKAWI, 2015

Para um ângulo α negativo, a força de sustentação é zero. Um alto ângulo de ataque negativo pode reverter a sustentação. Com α igual a zero, a pá tem alguma força de sustentação. O F_s se eleva a medida que o α faz o mesmo, até um limite. Para além desse limite, o aumento do ângulo de ataque irá reduzir a sustentação e aumentar a força de arrasto, colocando a pá numa região denominada estol³.

Há dois termos usualmente correlatos em forças aerodinâmicas: coeficiente de sustentação C_s e coeficiente de arrasto C_a . São definidas nas equações 3.1 e 3.2:

$$C_s = \frac{F_s}{F} \quad (3.1)$$

³ *Stall*, ou estolar, é um termo originalmente usado na aerodinâmica e na aviação para descrever a perda total de sustentação (PINTO, 2013).

$$C_a = \frac{F_a}{F} \quad (3.2)$$

Ambos os coeficientes são função do formato da pá e do ângulo de ataque. Os valores obtidos para os coeficientes de sustentação e arrasto (C_s e C_a) obtidos com base em medições realizadas em túnel de vento para cada α e velocidade podem ser apresentados tanto na forma tubular quanto graficamente. O Gráfico 3.1 apresenta os coeficientes C_a , C_s e a relação entre os dois (C_a/C_s) em função do ângulo de ataque para uma determinada seção do aerofólio. Este modelo, baseia-se no padrão existente na base de dados do catálogo online de aerofólios. Foi escolhido o modelo NACA⁴ 63-415 (Figura 3.6) para as análises mostradas a seguir:

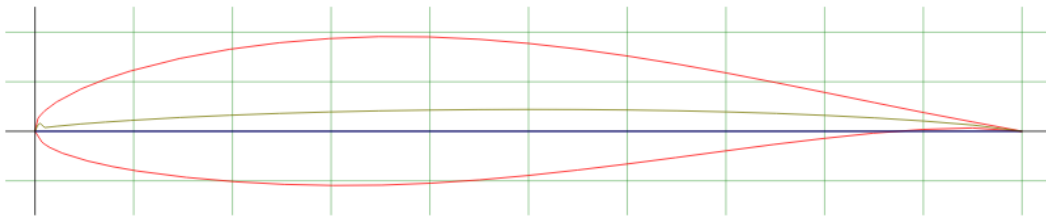


Figura 3.6 - Aerofólio NACA 63-415

FONTE: AIRFOILTOOLS, 2016

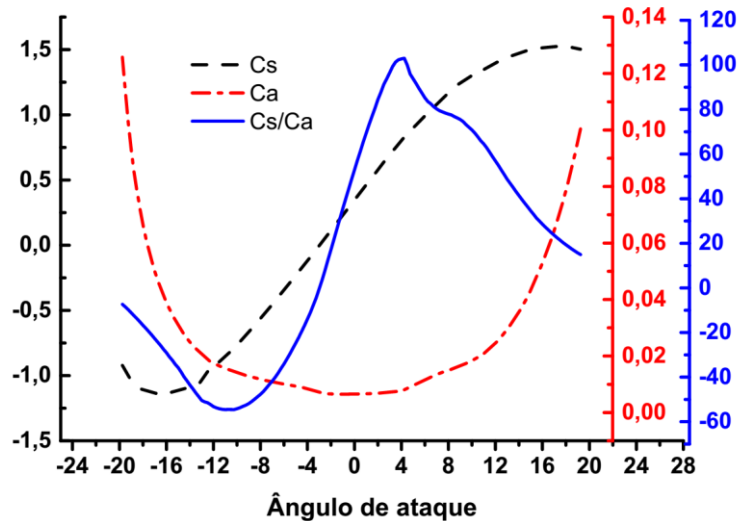


Gráfico 3.112 - C_s , C_a e C_s/C_a em função de α

FONTE: Adaptado de AIRFOILTOOLS, 2016

⁴ A NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics* – Comitê Nacional para Aconselhamento sobre Aeronáutica) foi a agência espacial norte – americana antecessora da NASA (PINTO, 2013).

Cada aerofólio tem um ângulo de ataque para o qual a relação entre os coeficientes de sustentação e arrasto (C_s/C_a) é máximo e esse ângulo resulta na eficiência máxima de uma turbina de eixo horizontal (FADIGAS, 2011).

Se um instrumento medisse a velocidade do vento e sua direção montado em uma pá estática, as leituras apresentariam dados relativos às velocidades reais; se o mesmo instrumento fosse montado em uma pá em movimento, dessa vez, as leituras iriam apresentar valores diferentes da primeira; isso ocorre devido a interação entre as velocidades de incidência do vento sobre a pá e a velocidade de rotação da mesma, originando a velocidade relativa. A relação é mostrada na Figura 3.7:

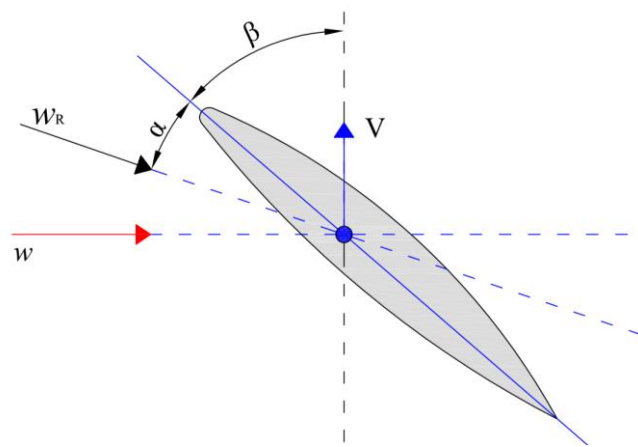


Figura 3.7 - Corte transversal de uma pá e seus parâmetros

FONTE: Adaptado de EL-SHARKAWI, 2015

Onde V é a velocidade no sentido da rotação das pás; w é o sentido da velocidade incidente do vento e w_R é a resultante da soma vetorial dos dois vetores, o vento relativo. Ambos os vetores são medidos em metros por segundo. Dessa forma, o vetor V é dado pela Equação 3.3:

$$V = \omega r \quad (3.3)$$

Sendo ω a velocidade angular (rad/s) e r a distância do centro do cubo até a ponta da pá.

O ângulo entre a corda e a linha que representa o sentido de rotação da pá é chamado de ângulo de *pitch* ou passo, e é representado por β . Observa-se ainda na Figura 3.7, que o β é função da posição da pá, não da velocidade e direção do vento, como o ângulo do ataque é. Dessa forma, o α pode ser controlado pelo ajuste do ângulo *pitch*.

Esse é um dos métodos de controle de potência mais usuais nos aerogeradores (EL-SHARKAWI, 2016).

3.3 Coeficiente e Curva de Potência em um Aerogerador

A conversão da energia cinética presente no vento em potência mecânica foi tratada no tópico 2.6 deste trabalho. Lá, foi possível estabelecer a quantidade em kW disponível nas massas de ar para aproveitamento. Porém, há um máximo de potência que a turbina eólica pode extrair do vento, em relação à disponível. A ideia de descobrir essa quantidade a ser aproveitada parte da análise das vazões de ar que entram e saem do aerogerador (Figura 3.8):

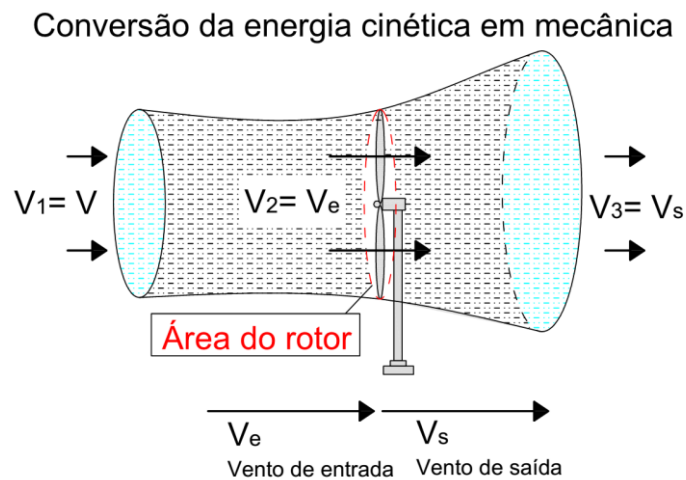


Figura 3.8 - Extração de energia cinética do vento

FONTE: Adaptada de PINTO, 2013

Onde a potência que se busca para o aproveitamento é P , e será resultante da diferença entre a potência de entrada e a potência de saída:

$$P = P_e - P_s \quad (3.4)$$

Segundo Pinto (2013), a velocidade de saída não pode ser inferior a $1/3$ da velocidade de entrada, ou seja, a turbina absorve $2/3$ da energia do vento na entrada, sobrando $1/3$ da energia na saída. Assim:

$$V_e = (2/3)v \quad (3.5)$$

$$V_s = (1/3)v \quad (3.6)$$

Tomando a massa específica (ou densidade) ρ do ar como constante, tem-se:

$$m = \rho A V_e \quad (3.7)$$

Dessa forma, as potências de entrada e saída do aerogerador tornam-se:

$$P_e = (1/3)\rho A (2/3)v^2 \quad (3.8)$$

$$P_s = (1/2)[\rho A (2/3)(v/3)]^2 \quad (3.9)$$

Para concluir qual a potência máxima extraída, substitui-se as Equações 3.9 e 3.8 na Equação 3.4, chegando a:

$$P_{max} = (16/27)[(1/2)\rho A v^3] = 59,3\%P \quad (3.10)$$

Assim, conclui-se que o valor máximo que o aerogerador pode extrair de potência disponível é de 59,3%. Este valor é conhecido como o Limite de Betz.

Conhecendo o limite de Betz como sendo a relação entre a potência extraída e a disponível do vento, pode-se nomear como Coeficiente de Potência (C_p) e defini-lo como a seguinte equação:

$$C_p = \frac{P_{ext}}{\frac{1}{2}\rho A v^3} \quad (3.11)$$

A relação entre a potência de uma turbina eólica e a velocidade do vento é mostrada na Figura 3.9. É a curva de potência de um aerogerador. A princípio, destacam-se três velocidades inerentes ao processo de geração. São elas:

- Velocidade de partida ($V_{cut\ in}$): velocidade mínima na qual a máquina gerará potência útil;
- Velocidade nominal (V_n): velocidade em que a potência nominal é alcançada;
- Velocidade de corte ($V_{cut\ off}$): máxima velocidade permitida. Limitada pelo design da engenharia e por restrições de segurança (PINTO, 2013).

As curvas de potência de cada aerogerador é conseguida normalmente pelos fabricantes e são obtidas por intermédio de testes de campo, usando métodos de testes.

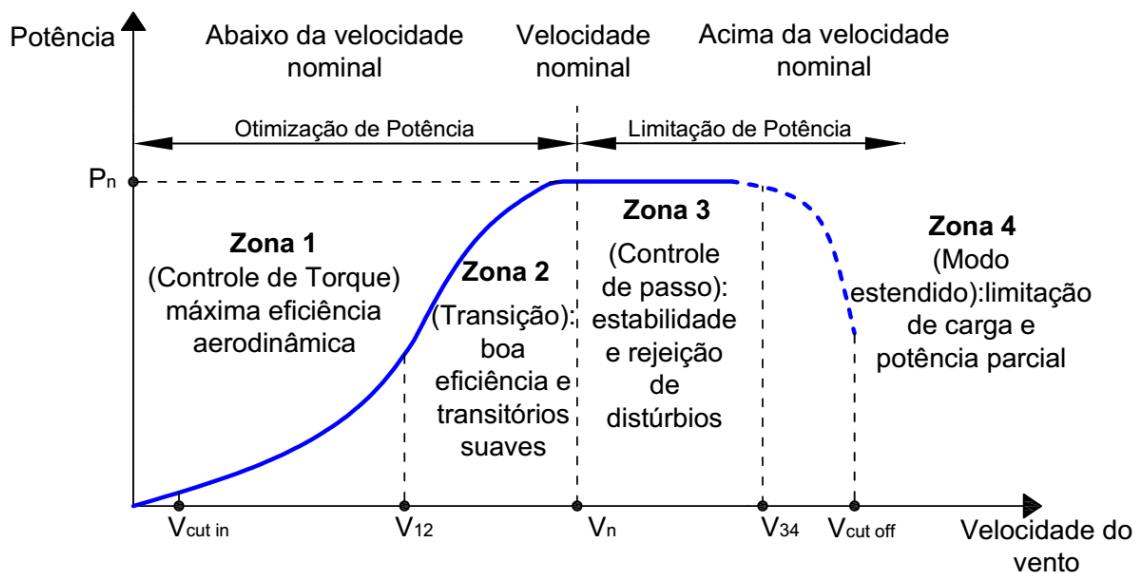


Figura 3.9 - Zonas da curva de potência do aerogerador

FONTE: Adaptado de PINTO, 2013

Na Figura acima, é possível visualizar 4 zonas bem definidas dentro da curva de potência de um determinado aerogerador que tem estratégia de controle de passo. Apresentam as seguintes características:

- Zona 1 – Controle de Torque: Ocorre nos ventos de menor velocidade. Objetiva-se nessa zona, obter a maior eficiência aerodinâmica possível. Isso é feito ao manipular o torque elétrico, a fim de se obter uma taxa entre a velocidade da pá e

a velocidade do rotor máxima. Desse modo, obtém-se o máximo coeficiente de potência.

- Zona 2 – Transição: velocidade média. Nela, não é possível alcançar a razão da velocidade desejada, pois a velocidade do rotor está próximo a sua velocidade máxima.
- Zona 3 – Controle de passo: Para ventos com velocidades mais altas, as pás tendem a mudar o ângulo de passo β objetivando limitar a absorção de potência, controlar a velocidade e minimizar suas cargas, ao mesmo tempo.
- Zona 4 – Modo estendido: ventos com valores muito altos. Limita-se a velocidade do rotor, e as cargas externas são reduzidas.

Pinto (2013) descreve essa relação entre a velocidade de rotação do eixo e a velocidade de incidência do vento na forma de uma analogia interessante: quando uma pá de uma turbina eólica gira, a velocidade na ponta da pá é maior que a velocidade no meio da pá; a eficiência de um rotor é associada à taxa na qual o rotor gira. Se o rotor girar muito vagarosamente, a eficiência cai, pois boa parte do vento passará por entre as pás, configurando um desperdício desta porção do vento; porém, se o rotor girar rápido demais, a eficiência cai, pois a área coberta pelas pás funcionará como uma “parede” contra o vento. Dessa forma, um bom caminho para se demonstrar a eficiência de rotação de um aerogerador é apresentar a razão entre as velocidades de giro do rotor e a velocidade na ponta da pá. Nomeia-se esta relação como o TSR (*Tip-speed ratio*, ou λ). Ela é dada, na forma da Equação 3.12:

$$\lambda = \frac{u}{v} \quad (3.12)$$

Onde u é a velocidade escalar na ponta da pá, medida em metros por segundo. Porém, é geralmente disponibilizada a velocidade angular em rpm do rotor. Assim:

$$u = \omega r \quad (3.13)$$

e

$$\lambda = \frac{\omega r}{v} \quad (3.14)$$

O coeficiente de potência assim, é dependente da condição aerodinâmica instantânea das pás (TSR e ângulo de passo β), sendo essa dependência, matematicamente representada por:

$$C_p(\lambda, \beta) \quad (3.15)$$

Assim, a potência elétrica gerada por um aerogerador torna-se:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (3.16)$$

3.4 Tipos de Máquinas

Nesta subseção, haverá a exploração das principais configurações de aerogeradores no que se refere ao conjunto maquinário envolvido nos aerogeradores, ressaltando topologias, configurações, vantagens, desvantagens e principais definições.

3.4.1 Tipo 1

A turbina do Tipo 1, é o aerogerador de velocidade fixa, ou seja, funciona com a mesma rotação de eixo para conexão com aerogerador. Seus principais componentes são mostrados na Figura 3.10. O modelo consiste nas pás montadas no cubo e são capazes de realizar o controle do ângulo de passo. O eixo do cubo é conectado à caixa de engrenagem para elevar a velocidade de rotação para acoplamento no gerador. Este, por sua vez, é do tipo gerador de indução gaiola de esquilo, por apresentar rotor com barras curto circuitadas. A velocidade de rotação é limitada pelo ângulo de passo da pá, e a potência reativa somente pode ser controlada externamente por capacitores externos chaveados no sistema, fazendo o papel de compensação reativa. Quando a velocidade do vento é favorável, o gerador é conectado à rede através de um *soft starter* com o objetivo de reduzir a tensão inicial nos terminais do gerador. As turbinas são conectadas a uma barra em comum denominada “barra de coleta do parque”. A tensão de geração é menor do que a de conexão à rede (690V), portanto, há necessidade do transformador para elevação da tensão. A maior parte dos custos relativos à esse tipo de aerogerador é devido a alguns componentes chave: o rotor da turbina representa cerca de 20% do custo total; o gerador

e a caixa de engrenagem levam 35% do investimento; o suporte estrutural representa 15% do custo total (EL-SHARKAWI, 2016).

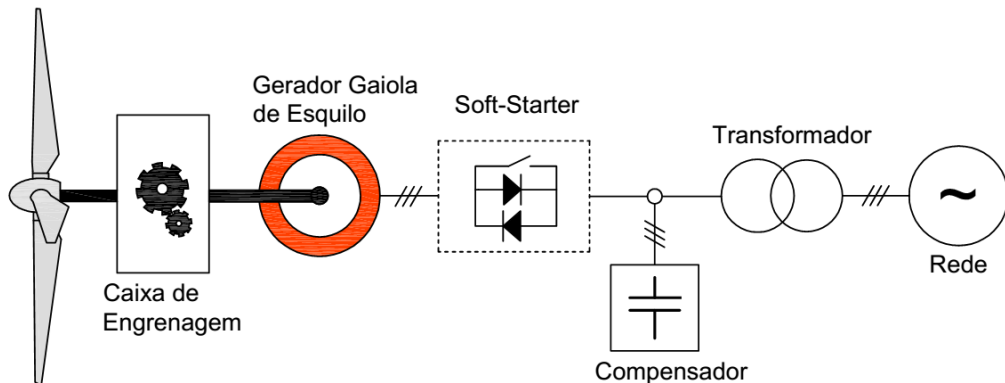


Figura 3.1016 - Máquina do Tipo 1

FONTE: Adaptado de WU et al., 2011

3.4.2 Tipo 2

As máquinas do Tipo 2 tem basicamente os mesmos componentes do Tipo 1 com uma exceção: o gerador é do tipo rotor bobinado. Esse gerador tem o circuito de seu rotor acessível externamente. Por esse fato, apresenta vantagem em relação ao Tipo 1, por abranger uma maior variedade de velocidades de operação, por seu rotor estar conectado a resistências externas, o que garante maior eficiência no processo. Essa combinação permite que a potência consumida pelas resistências seja regulada, sendo estas ultimas, as responsáveis pelo consumo do excesso de potência (EL-SHARKAWI, 2016). A máquina Tipo 2 é mostrada na Figura 3.11:

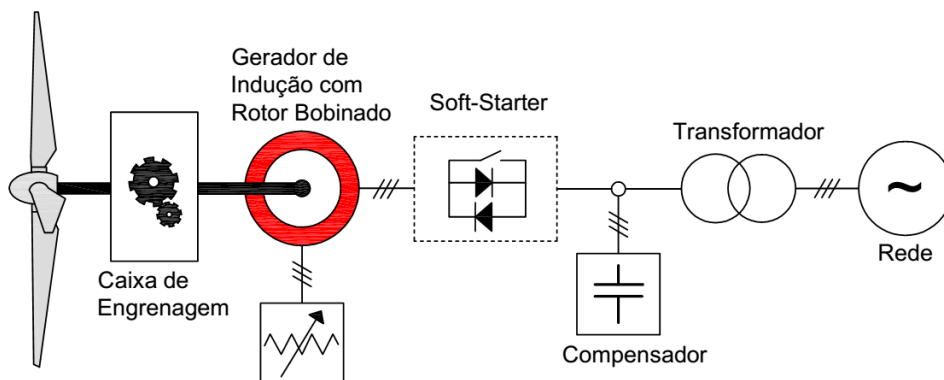


Figura 3.11 - Máquina do Tipo 2

FONTE: Adaptado de WU et al., 2011

3.4.3 Tipo 3

A máquina do Tipo 3 é provavelmente a de maior uso atualmente. Seus principais componentes são mostrados na Figura 3.12:

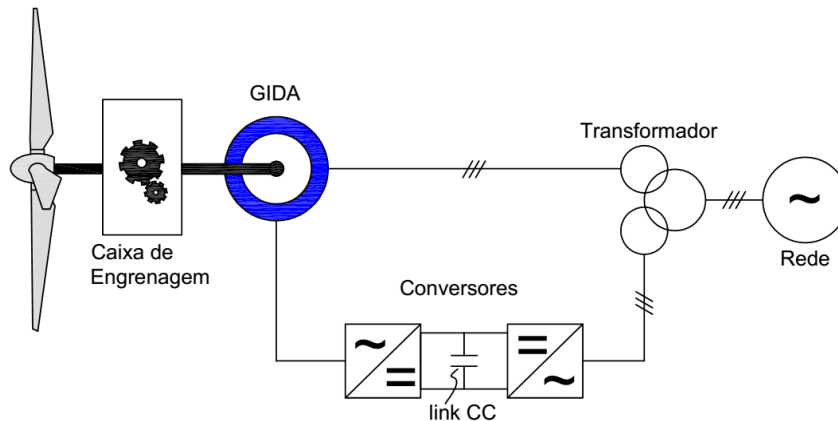


Figura 3.1217 - Máquina do Tipo 3

FONTE: Adaptado de WU et al., 2011

Ela consiste em um gerador de indução com rotor bobinado conectado à rede através de dois conversores: conversor do lado do rotor; e conversor do lado da rede. Devido aos terminais do gerador, assim como o rotor estarem conectados a rede, a máquina do Tipo 3 é denominada Gerador de Indução Duplamente Alimentado (GIDA). O barramento entre os dois conversores é em corrente contínua (link CC). Os conversores realizam as operações de retificação (AC/DC) e inversão de corrente (DC/AC) (EL-SHARKAWI, 2016). O GIDA apresenta algumas vantagens apresentadas a seguir:

- Tem uma faixa de operação de velocidades muito maior se comparadas com as máquinas do Tipo 1 e 2. Isso permite que a turbina capture muito mais energia disponível do vento.
- O fluxo de potência através do rotor é bidirecional, permitindo que o gerador opere nas condições super e sub síncronas.
- A potência reativa pode ser controlada e compensada pelos conversores;
- Permite que o parque alcance sua estabilidade;
- Os conversores processam no máximo 30% da capacidade do gerador. Ou seja, se comparado ao Tipo 4, o processo de conversão consome menos potência.

3.4.4 Tipo 4

As máquinas do Tipo 4 apresentam como principal diferença em relação as anteriores, a ausência da caixa de engrenagem, como é visto na Figura 3.13. No entanto, a falta do mecanismo que aumenta a velocidade de rotação do eixo das pás para a conexão junto ao gerador, faz com que este último se diferencie em algumas características. O gerador utilizado na máquina do Tipo 4 é o síncrono, e é acoplado diretamente ao eixo do cubo das pás.

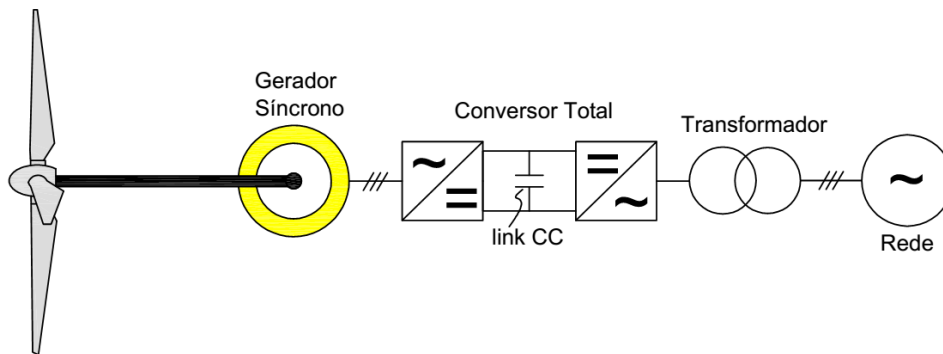


Figura 3.13 - Máquina do Tipo 4

FONTE: Adaptado de WU et al., 2011

Para entender melhor a operação do sistema, resalta-se que o gerador síncrono produz corrente alternada a frequência proporcional a velocidade (n) de rotação, visto na Equação 3.17:

$$f = \frac{n}{120} p \quad (3.17)$$

Devido à velocidade do gerador variar com as condições do vento, a frequência de geração de eletricidade varia tal qual. Assim, a frequência de geração não pode chegar a rede sem passar pela conversão, que fará o papel de igualar as frequências. Por conta da ausência da caixa de engrenagem, a velocidade de geração é muito lenta. Assim, o gerador da máquina Tipo 4 é feita com um grande número de pólos, semelhante às máquinas usadas na geração hidrelétrica (superiores a 40 pólos). Dessa forma, a frequência de geração se aproxima da frequência da rede a velocidades baixas de vento (EL-SHARKAWI, 2016).





A máquina do Tipo 4 apresenta algumas vantagens em relação aos demais tipos, listadas abaixo:

- Opera na maior faixa de velocidades em relação aos outros tipos. A variação ocorre desde quase zero até acima da velocidade síncrona.
- Potência reativa pode ser facilmente controlada pela excitação do gerador, ou através do conversor.
- Apresenta um gerador mais comum em processos de geração, portanto, ocasiona maior familiaridade no que se refere ao controle de geração, proteção e análise de estabilidade, por já se ter difundido através de outras plantas.

Apresenta como limitações, as grandes dimensões, se comparados aos outros tipos, devido ao grande número de pólos; e maior custo financeiros para construção e instalação (EL-SHARKAWI, 2016).

A Tabela 3.1 resume os principais parâmetros dos 4 tipos de máquinas anteriormente explanados através de exemplos e padrões técnicos de modelos utilizados nos parques eólicos do mundo.

Tabela 3.1 - Resumo exemplificando os 4 tipos de máquinas em aerogeradores

PARÂMETRO	MODELO			
	Vestas V82-1.65	Vestas V80-1.8US	Vestas V90	Enercon E-70
Potência	1,65 MW	1,8 MW	3 MW	2,3 MW
Diâmetro	82 m	80 m	90 m	71 m
Velocidade de rotação	14,4 rpm	15,5 ou 16,8 rpm	8,6 ~ 18,4 rpm	6 ~ 21,5 rpm
Velocidade do vento (<i>cut-in/nominal/cut-out</i>)	3,5/ 13/ 20 m/s	4/ 15/ 25 m/s	3.5/ 15/ 25 m/s	2,5 / 13.5/ 28-34 m/s
Gerador	Gaiola de Esquilo	Rotor Bobinado	Rotor Bobinado	Síncrono
Caixa de Engrenagem	Planetária	Planetário	Planetário	x
Layout				

FONTE: Adaptado de WU et al., 2011

3.5 Conceitos de Controle de Potência no Aerogerador

Nesta subseção, serão explanados os principais tipos de controle de potência a serem abordados e explorados na ferramenta de simulação didática no qual o trabalho trata. Serão trabalhados conceitos teóricos, o que não significa um retrato perfeito dos controles executados pelas fabricantes dos aerogeradores, haja visto que estas metodologias não são disponibilizadas. Serão trabalhadas ideias de controle para as modalidades de velocidade fixa dos aerogeradores, assim como as de velocidade variável.

Hoffman (2002) relata que há duas características principais independentes nas quais a escolha do tipo de controle a ser adotado na máquina podem ser divididas:

- No que se refere a capacidade da turbina eólica em adaptar a velocidade de rotação do seu eixo durante a captação de energia disponível no vento. Há algumas possibilidades dentro dessa característica, citadas abaixo:
 - Uma única velocidade, constante, que é mantida independente da velocidade do vento incidente, pois está conectada diretamente à rede e deve manter sua frequência constante. É denominado Aerogerador de velocidade fixa.
 - Duas velocidades de rotação alternativas, que permitem variação de acordo com a atual velocidade do vento. Tipicamente, a mudança entre as duas velocidades de rotação tem um tempo de procedimento, assim, a velocidade não pode ser alterada no caso de rajadas. Esse tipo de Turbina é denominada duas velocidades.
 - Velocidades continuamente variável, que irá se alterar via controle de acordo com a atual velocidade do vento ou a potência de saída da turbina eólica. É o Aerogerador de velocidade variável. A potência é então, transmitida para um conversor e assim, à rede.
- O método de limitar a potência adquirida do vento quando a potência disponível se torna maior do que a potência na qual o aerogerador é projetado, ou seja, quando a velocidade do vento é maior do que a velocidade nominal. Neste caso, há três possibilidades. Para a primeira, as pás do rotor estão montadas fixas no cubo, enquanto as outras duas precisam ser giradas em torno de seu eixo.
 - O aerogerador usa o fato de o ângulo de ataque crescer com o aumento da velocidade de vento de uma forma que o desenho da pá, bem como suas

características aerodinâmicas façam com que esta entre em estol, e as forças sobre ela sejam reduzidas com o aumento da velocidade. Nesta situação, as pás estão fixas no cubo. Isso significa que o aerogerador é completamente passivo à incidência de vento. Dessa forma, esse conceito é denominado Controle de Estol Passivo;

- É possível girar as pás em torno de seu eixo longitudinal de modo que o modo de estol das pás seja alcançado. Como esse conceito de turbina eólica usa a ação de ativar algo, é chamado de Controle de Estol Ativo;
- Finalmente, as pás podem ser giradas de forma a reduzir o ângulo de ataque e assim as forças aerodinâmicas, e por consequência, a potência gerada. Esse conceito é denominado Controle de passo.

Embora essas duas características sejam completamente independentes, elas podem ser combinadas, como mostra a Tabela 3.2. Nela, são relacionados cada um dos três subtópicos referentes a cada característica e relacionadas uma a uma, e numeradas para posterior análise comparativa.

Tabela 2.2 - Relação entre conceitos de controle de potência do aerogerador

	Estol passivo	Estol Ativo	Passo
Velocidade Fixa	1	3	5
Duas Velocidades	2	4	6
Velocidade Variável	7	-	8

FONTE: Adaptado de HOFFMAN, 2002

O conceito de Estol ativo com velocidade variável não tem numeração convencional porque se trata de uma combinação realizada por motivos de viabilidade técnica. Na Tabela 3.3, são traçados os conceitos mencionados acima e relacionados aos componentes das máquinas nas quais são utilizados.

Tabela 3.3 - Tipos de Máquinas nas quais os conceitos de controle são utilizados

Tipo de Controle	Atuadores (controle de passo)	Controle de Potência	Velocidade do rotor	Caixa de Engrenagem	Tipo de Gerador
1	-	Estol	1	Sim	Assíncrono
2	-	Estol	2	Sim	Assíncrono
3	Baixa potência	Estol Ativo	1	Sim	Assíncrono
4	Baixa potência	Estol Ativo	2	Sim	Assíncrono
5	Alta potência	Passo	1	Sim	Assíncrono
6	Alta potência	Passo	2	Sim	Assíncrono
7	-	Estol	Variável	Não	Síncrono
8	Alta potência	Passo	Variável	Não	Síncrono

FONTE: Adaptado de HOFFMAN, 2002

3.5.1 Controle de Estol Passivo

Wu et al. (2001) define o controle de Estol Passivo em aerogeradores, como a forma de controle onde a pá é fixa no rotor a um ângulo de ataque ideal. Quando a velocidade do vento está abaixo do valor nominal, as pás podem capturar o máximo possível da potência disponível do vento. Quando a velocidade do vento excede o valor nominal, este causará uma turbulência na superfície da pá. Como resultado, a força de sustentação (F_s) será reduzida e eventualmente irá desaparecer com o aumento da velocidade do vento, fazendo com que a rotação da turbina se torne lenta gradualmente. É o fenômeno do estol, que é indesejável em aviões, mas provém um meio efetivo de limitar a potência capturada em uma turbina para fins de segurança. O princípio do controle por estol passivo é ilustrado na Figura 3.14. Nela, é possível ver que o $F_{s,nominal}$ (força de sustentação na velocidade de vento nominal) é maior que o $F_{s,estol}$ (força de sustentação em velocidade de vento que excede a nominal, na região do estol).

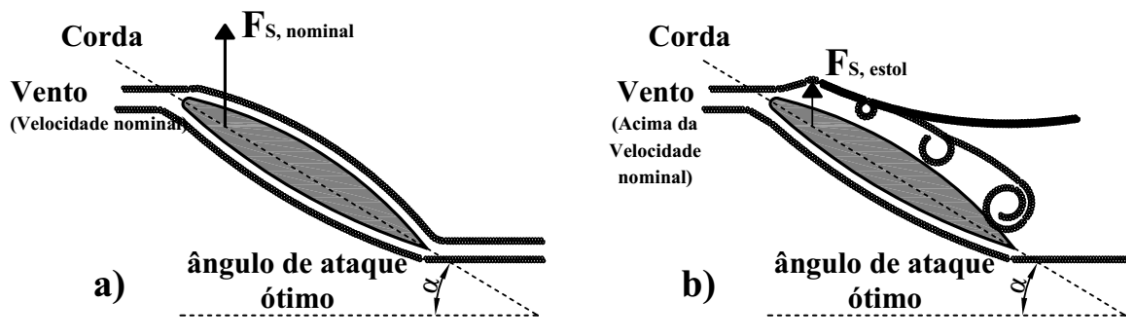


Figura 3.14 - Controle por Estol Passivo

FONTE: Adaptado de WU et al., 2011

Para Burton et al (2001), as máquinas reguladas por estol passivo sofrem a desvantagem de incertezas no comportamento aerodinâmico da pá na região de estol, que pode resultar em uma predição imprecisa dos níveis de potência e as cargas na pá na velocidade nominal ou acima desta.

As turbinas controladas por estol passivo não tem mecanismos complexos de passo, mas suas pás requerem um complexo desenho aerodinâmico. O estol passivo pode não ser capaz de manter a potência capturada em uma velocidade de vento constante, como mostrado na Figura 3.15. Uma máquina dotada desse controle, pode eventualmente exceder a potência nominal para algumas velocidades de vento, o que não é uma característica desejável (WU et al., 2001).

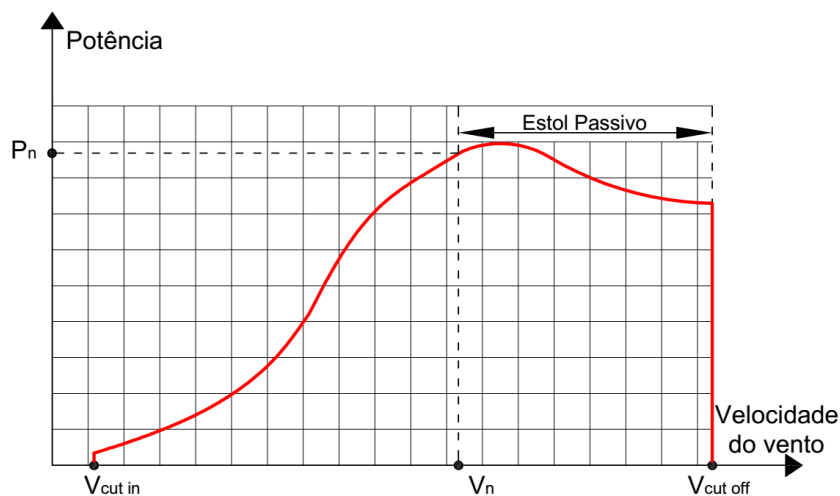


Figura 3.1518 - Potência desenvolvida em uma turbina controlada por Estol Passivo

FONTE: Adaptado de WU et al., 2011

Segundo Burton et al (2001) apud Gonzalez (2012), o ângulo de ataque α para o qual ocorre o efeito estol, situa-se entre os 10° e 16° aproximadamente para a grande maioria dos perfis utilizados para turbinas eólicas de eixo horizontal.

3.5.2 Controle por Estol Ativo

Segundo Ahlstrom (2002) apud Gonzalez (2012), a regulação ativa é a forma de controle mais utilizada pelos fabricantes de grandes turbinas eólicas. Wu, et al (2002) fala que nas turbinas que tem regulação de potência por estol ativo, o fenômeno do estol é induzido não somente pela incidência das altas velocidades de vento, mas também pelo incremento do ângulo de ataque da pá. Assim, aerogeradores de estol ativo podem ajustar suas pás com o mecanismo de controle de passo. Quando a velocidade excede a nominal, as pás recebem o comando de giro em torno de seu eixo, conduzidas ao objetivo de reduzir a potência capturada, que por sua vez, é mantida constante. Um exemplo qualitativo do princípio do estol ativo é ilustrado na Figura 3.16:

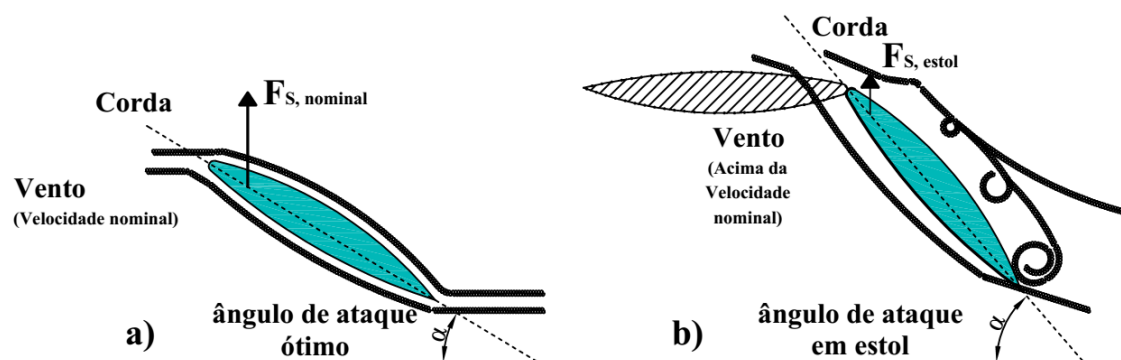


Figura 3.16 - Controle por Estol ativo

FONTE: Adaptado de WU et al., 2011

Quando a pá é girada completamente no sentido do vento, como mostrado no perfil hachurado em barras paralelas, na Figura 3.16 (b), faz com que a pá perca a interação com o vento, que causa a parada do rotor. Essa condição de operação é usada para situação acima da velocidade de *cut-in*, objetivando proteger a turbina de maiores danos (WU, et al, 2011).

Gonzalez (2012) diz que o controle por estol ativo ocorre quando o ângulo de passo β é reduzido e, por consequência, o ângulo de ataque α é aumentado para que a pá entre na região de estol.

Jauch (2004) separa a operação de uma turbina com controle ativo de estol em dois modos:

- Limitação de potência: A potência de saída é limitada até a potência nominal quando o vento está entre sua velocidade nominal e de parada; o ângulo de passo é ajustado para controlar o efeito estol.
- Otimização da potência: a potência gerada é maximizada nas primeiras velocidades de vento até a nominal. O ângulo de passo é ajustada para otimizar a aerodinâmica e a eficiência do coeficiente de potência C_p e consequentemente, a potência gerada.

Com o controle por estol ativo, é possível manter a potência gerada abaixo da potência nominal da máquina, como pode ser vista na Figura 3.17. Turbinas controladas por estol ativo são disponíveis comercialmente em modelos de grandes potências.

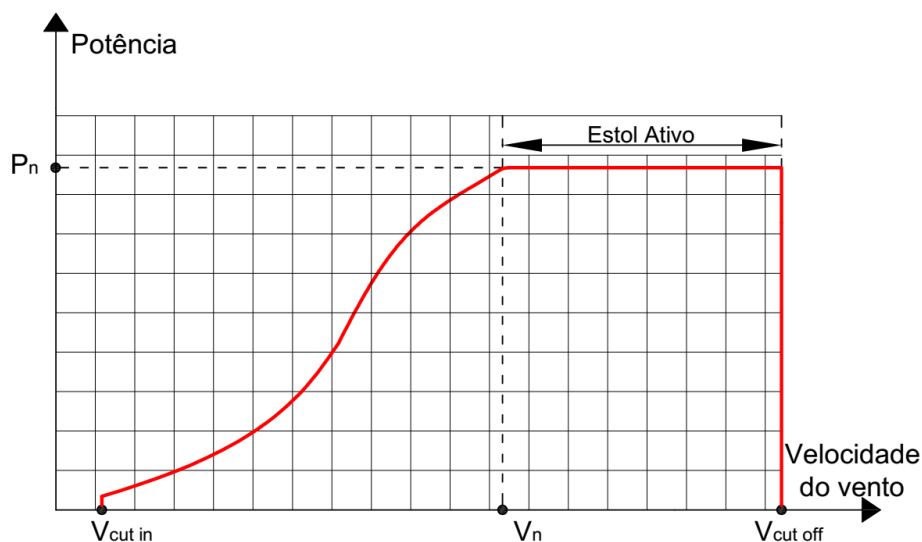


Figura 19.17 - Comportamento da Potência desenvolvida em uma turbina controlada por Estol Ativo

FONTE: Adaptado de WU et al., 2011

3.5.3 Controle de Passo

O controle de passo é semelhante ao estol ativo, no sentido de ajustar o ângulo de passo em relação ao eixo longitudinal da pá, acoplada no cubo. Quando a velocidade do vento excede um valor nominal, o controlado de passo irá reduzir o ângulo de ataque,

virando as pás gradualmente. A diferença de pressão entre a frente e a traseira da pá é reduzida, conduzindo a uma redução da força de sustentação na pá (WU et al., 2011).

O sistema de operação do controle de passo é ilustrado na Figura 3.19. Quando o vento incide abaixo da velocidade nominal, o ângulo de ataque é mantido no seu ponto ótimo. Com o aumento da velocidade, superando a nominal, o ângulo de ataque da pá é reduzindo, causando a redução da Força de Sustentação ($F_{S, \text{passo}}$). Quando a pá sofre o controle de passo total, o ângulo de passo da pá é alinhado com o vetor velocidade incidente do vento, e não há sustentação. A turbina irá parar de rotacionar e então o rotor será travado pela trava mecânica. A porção hachurada da Figura 3.18 mostra a situação onde o passo é ativo, onde a pá assume uma nova posição em relação ao seu eixo.

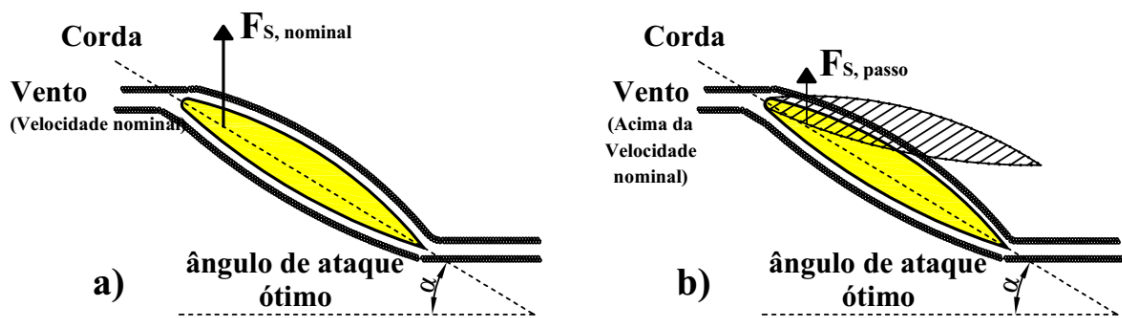


Figura 20.18 - Controle de Passo

FONTE: Adaptado de WU et al., 2011

Ambas as estratégias de controle, estol ativo e passo, são baseados na rotação de suas pás, mas em sentidos diferentes: o passo irá girar a pá contra o vento, reduzindo sua força de sustentação, enquanto o estol ativo gira a favor do vento, causando turbulências que reduzem também a força de sustentação. A Figura 3.19 mostra a situação onde dois aerogeradores estão no máximo de seu giro, cada uma com sua estratégia de controle.

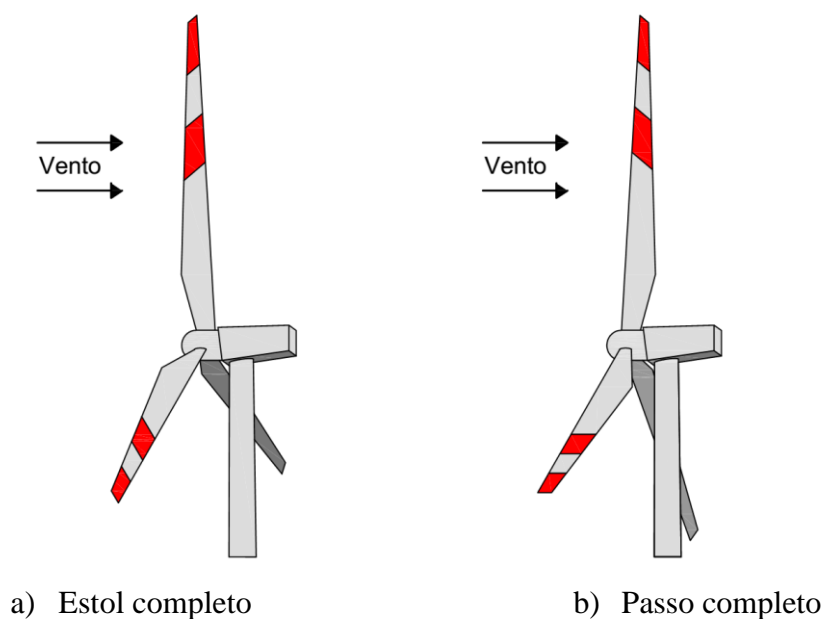


Figura 3.19 - Aerogeradores em condição de máximo estol e máximo passo

FONTE: Adaptado de WU et al., 2011

Gonzalez (2012) fala que, se comparados os dois tipos de regulação, o controle por estol ativo apresenta a característica de ser mais sensível, ou seja, uma pequena ação do controle gera uma mudança significativa nas forças aerodinâmicas atuantes. Burton et al. (2001) compara por meio da Figura 3.20, para um mesmo aerogerador, as duas ações de controle. A conclusão é que a atuação é menor no controle por estol ativo no que por ângulo de passo. No primeiro caso, o ângulo de trabalho tem um limite de aproximadamente -5° , enquanto no segundo, o ângulo varia de 0° até aproximadamente 35° , podendo atingir 90° para frenagem aerodinâmica.

3.5.4 Controle de Guinada (*Yaw*)

A maioria dos aerogeradores de eixo horizontal emprega o mecanismo de guinada para manter o perfil frontal da turbina face à direção predominante do vento, usando o mesmo mecanismo dos controles ativos citados nos tópicos anteriores. No entanto, há dois fatores que vão contra a rápida resposta do sistema de controle: o primeiro, se refere ao enorme momento de inércia que a nacela e o rotor sobre o eixo do aerogerador, e segundo, a relação cossenoidal entre o componente da velocidade do vento perpendicular

ao rotor e o ângulo de guinada⁵. Hemani (2012) denomina o controle de guinada, a condição onde uma turbina de eixo horizontal se orienta pela direção do vento. Isto é feito de maneira automatizada, para que o a turbina perceba a direção do vento a cada instante. O mecanismo de guinada é mostrado na Figura 3.21:

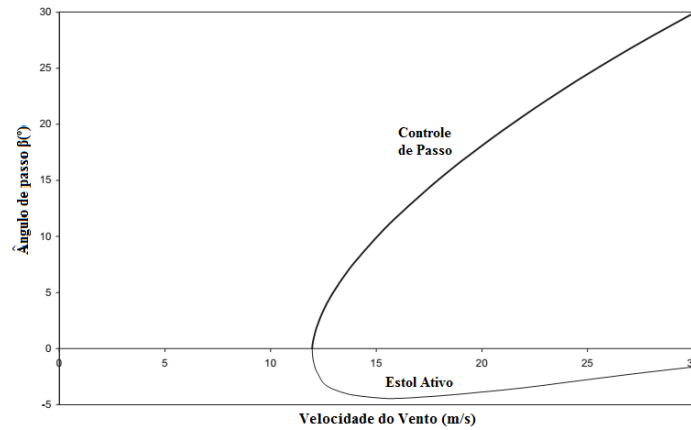


Figura 3.20 - Ações de controle de passo e estol ativo para um mesmo aerogerador
 FONTE: Adaptado de BURTON et al.,2001

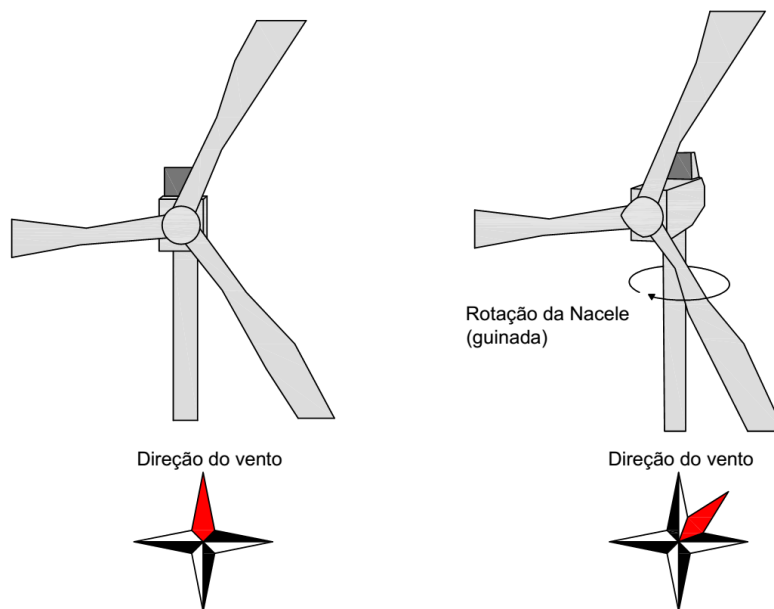


Figura 3.21 - Controle de guinada (yaw)

FONTE: Aatoria Própria

⁵ Este é o ângulo entre a direção normal da área de varredura e a direção do vento incidente (GONZALEZ, 2012)

3.6 Conexão com a rede

Nesta subseção, serão abordados aspectos referentes à etapa posterior a geração de energia: a conexão à rede. Pinto (2013) fala que a conexão de um parque eólico no sistema elétrico é um dos pontos mais importantes da concepção de um projeto eólico, onde há exigências a serem cumpridas no ponto de conexão, onde a principal é manter um limite de desvio de tensão.

Pinto (2013) estabelece as seguintes precauções a serem tomadas, para conexão de uma turbina eólica na rede elétrica:

- Rápida desconexão do gerador, no caso de a tensão ou frequência da rede exceder ou cair a certos limites;
- Compensação para potência reativa (isso exige capacitores no sistema elétrico. Além disso, os inversores emitem harmônicos que precisam ser filtrados).
- Conexão do gerador de indução apenas na faixa de aproximadamente 95 a 105% da velocidade síncrona. Além disso, há regulamentos que cobrem os sistemas de monitoramento

3.6.1 Qualidade de Energia

Atualmente, pesquisadores e cientistas objetivam resolver os problemas, primeiramente da estabilidade e operações do despacho dos sistemas de potência com grande quantidade de geração eólica, e em segundo lugar, os modelos dos sistemas de potência do futuro, que terão que incorporar uma penetração de energia eólica na ordem de dois dígitos. As rápidas flutuações de potências desenvolvidas por um conjunto de aerogeradores em um parque eólico tendem a não serem percebidas pelo operador do sistema de transmissão, porém, flutuações menores podem ser constatadas. Como a velocidade do vento sofre variações constantes, e a potência elétrica em um parque eólico varia com o cubo da velocidade, há, assim, variação na potência gerada pelo parque, levando assim, a necessidade de um controle no nível de tensão e frequência da energia elétrica que é entregue à rede. A magnitude é o que vem a determinar a qualidade da energia que é produzida (PINTO, 2013).

Silva et al. (2003) diz que os principais distúrbios causados na rede elétrica pela conexão de usinas eólicas, afetando a qualidade de energia, são:

- Consumo excessivo de potência reativa;
- Variações no perfil de tensão fornecida aos consumidores próximos;
- Sobretensões e sobrefrequências em situações de ilhamento;
- Injeção de harmônicos;
- Flutuações de tensão.

Tratando especificamente dos parâmetros tensão e frequência, a Tabela 3.4 traz os requisitos operacionais das variações permitidas em alguns países e regiões.

Tabela 3.4 - Requisitos operacionais da variação de tensão permitida

País	Requisitos operacionais de tens
Reino Unido	132 kV e 275 kV \pm 10% 400 kV – 10% a + 5%
Escócia	132 kV e 275 kV \pm 10% 400 kV \pm 5%
Irlanda	110 kV – 10% a + 12% 220 kV – 9% a + 12% 400kV – 8% a + 10%
Alemanha	110 kV – 13% a + 12% 220 kV – 13% a + 12% 400 kV – 8% a + 10%
Dinamarca	132 kV – 5% a + 10% 150 kV – 3% a + 13% 400 kV – 10% a – 5%
Espanha	132 kV \pm 10%
Suécia	\pm 10% a \pm 5%
Estados Unidos	\pm 10%
Canadá	\pm 10%
China	–3% a + 7%
Austrália	\pm 10%
Brasil	Entre 138 kV e 440 kV \pm 5%

FONTE: WU, (2010) apud Pinto (2013)

A reação da rede devido a sistemas eólicos se apresenta de diferentes formas. As turbinas eólicas são responsáveis por variações de tensão devido a rajadas e a efeitos de sombreamento na torre⁶. Em um sistema de potência real, aparelhos conectados à rede fazem com que a tensão se desvie do seu valor ideal. Basicamente, qualquer incompatibilidade entre a geração e a carga causa desvio de frequência, visto que as perdas da linha causam desvios de amplitude da tensão. Define-se essa variação de tensão como a mudança no valor RMS da tensão durante um curto período de tempo, geralmente poucos minutos. As variações na rede são causadas principalmente por variações na carga e nas unidades de geração de potência. Se a energia eólica é introduzida, as variações de tensão também são emitidas da potência produzida pela turbina (PINTO, 2013).

Para calcular essas variações de tensão, um método eficiente é o cálculo do fluxo de carga. Ele tem função de prever as variações de tensão causadas por variações de carga, sendo útil no cálculo das variações de tensão causadas por turbinas eólicas (PINTO,2013). O método analítico usa um modelo simples de impedância, conforme mostrado na Figura 3.22:

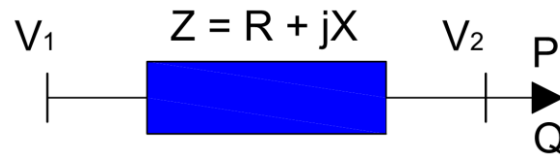


Figura 3.22 - Modelo simplificado de impedância do sistema elétrico

FONTE: Adaptado de PINTO, 2013

Segundo Borges (2005), o fluxo de carga é o mais frequente estudo feito nos sistemas elétricos de potência. Fornece a solução de uma rede elétrica, em regime permanente, para uma dada condição de operação, como carga e geração, sujeitas a restrições operativas e à ação de dispositivos de controle. Dados da rede elétrica, como resistência e reatância dos elementos, além da geração e cargas ativas e reativas do sistema são dados de entrada necessários para o estudo. Os métodos de solução são descritos a seguir:

- Métodos baseados em Y_{BARRA}

⁶ Segundo Fernandes (2010), o efeito de sombreamento da torre é a interferência aerodinâmica que ocorre quando a pá passa em frente da torre, provocando um *déficit* na velocidade de vento, causado pela obstrução da torre três vezes por rotação, causando perda de potência e vibrações na estrutura.

Possuem a vantagem de formulação simples e pouca necessidade de memória devido a esparsidade de Y_{BARRA} ser maior que 95%. Uma estratégia a ser utilizada para esse contexto, é o método de *Gauss-Seidel*.

- Métodos baseados em Z_{BARRA}

Convergem mais rápido, devido à matriz ser cheia, porém necessita de muita memória, além de custo de montagem elevado.

- Método de *Newton – Raphson*

Tem como vantagem ser robusto, pois converge quase sempre e com poucas iterações.

- Métodos desacoplados

Tem como vantagem ser rápido e usar pouca memória. É uma forma particular do método de *Newton-Raphson*.

A formulação do problema de fluxo de carga pode ser entendida ao observar um sistema que contenha a geração, carga e linhas de transmissão de energia, representado na Figura 3.23:

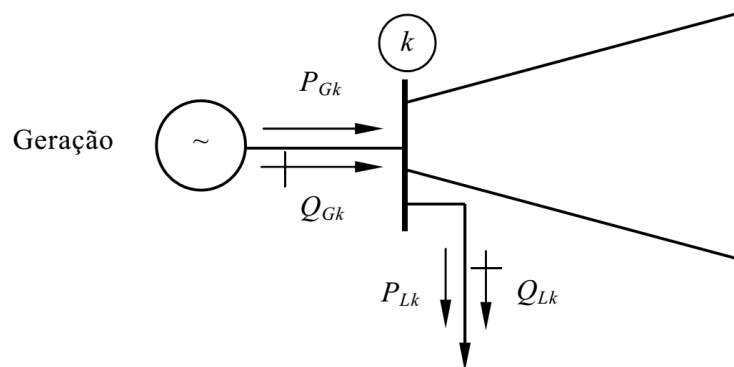


Figura 3.23 - Barra com geração, carga e linhas

FONTE: BORGES, 2005

Na Geração, são vistos os valores da potência ativa (P_{Gk}) e da potência reativa (Q_{Gk}) geradas nas barras ou o valor da potência ativa (P_{Gk}) e módulo da tensão gerada (V), no caso de barras de tensão controlada. Para a carga são considerados valores de potência ativa (P_{Lk}) e potência reativa (Q_{Lk}) consumidas em cada barra do sistema onde a carga existir, consideradas constantes, onde:

$$P_k = P_{Gk} - P_{Lk} \quad (3.18)$$

$$Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} \quad (3.19)$$

$$\dot{S}_k = P_k + jQ_k \quad (3.20)$$

Adotando o modelo da Equação 3.21, é possível estabelecer as relações entre corrente \dot{I}_k e \dot{V}_k com as variáveis descritas anteriormente:

$$\dot{I} = Y_{BARRA} \dot{V} \quad (3.21)$$

$$\dot{S} = \dot{V}_k \times \dot{I}_k^* = P_k + jQ_k \rightarrow \dot{I}_k^* = \frac{P_k + jQ_k}{\dot{V}_k} \rightarrow \dot{I}_k = \frac{P_k - jQ_k}{\dot{V}_k} \quad (3.22)$$

Generalizando, obtém-se a Equação 3.23:

$$\dot{S}_k = P_k + jQ_k = \dot{V}_k \times \dot{I}_k^* = \dot{V}_k \times \left(\sum_{m=1}^n \dot{Y}_{km} \times \dot{V}_m^* \right), k = 1, n \quad (3.23)$$

Que representa a injeção líquida de potência na barra k em função dos parâmetros da rede e das tensões nas barras (BORGES, 2005).

Borges (2005) trata da especificação dos tipos de barras utilizadas nos modelos de fluxo de potência, sendo estas:

- Barra flutuante ou *swing* ou *slack* ou $V\theta$

Sua condição de existência é suprir as perdas do sistema, conhecidas somente com a solução da rede. Só existe uma em todo o sistema.

Dados de entrada: V_k, θ_k ,

Calculados: P_k, Q_k .

- Barra de carga ou PQ

Não há controle de tensão nesta. Representa a grande maioria das barras dos sistemas, com cerca de 95% do total.

Dados de entrada: $P_k, Q_k,$

Calculados: $V_k, \theta_k.$

- Barra de tensão controlada ou PV.

Contém dispositivos de controle que permitam manter o módulo da tensão e a injeção de potência ativa em valores especificados. Representam cerca de 5% do total de barras de um sistema.

Dados de entrada: $P_k, V_k,$

Calculados: $Q_k, \theta_k.$

Um método bastante didático⁷ utilizado para solução de sistemas elétricos é o método de Gauss-Seidel. Este, apresenta-se da forma mostrada na Equação 3.24:

$$x_k^{(i+1)} = \frac{1}{a_{kk}} x \left(b_k - \sum_{m=1}^{k-1} a_{km} \times x_m^{(i+1)} - \sum_{m=k+1}^n a_{km} \times x_m^{(i)} \right), k = 1, n \quad (3.24)$$

As variáveis são calculadas por meio de iterações, seguindo o padrão:

$$\begin{aligned} x_1^{(1)} &= \frac{1}{a_{11}} x (b_1 - a_{12} \times x_2^0 - a_{13} \times x_3^0 - a_{14} \times x_4^0 - \dots - a_{1n} \times x_n^0) \\ x_2^{(1)} &= \frac{1}{a_{22}} x (b_2 - a_{21} \times x_1^1 - a_{23} \times x_3^0 - a_{24} \times x_4^0 - \dots - a_{2n} \times x_n^0) \\ &\vdots \\ x_n^{(i+1)} &= \frac{1}{a_{nn}} x (b_n - a_{n1} \times x_1^{(1)} - a_{n2} \times x_2^{(1)} - \dots - a_{nn-1} \times x_{n-1}^{(i)}) \end{aligned} \quad (3.25)$$

⁷ O método de Gauss-Seidel teve maior destaque nesse trabalho pelo seu aspecto didático de resolução de um sistema elétrico, embora essa não seja a estratégia de cálculo de fluxo de carga mais comum, por ter convergência lenta.

Este método usa formulação das equações do sistema elétrico de potência em números complexos, resultando em uma equação por barra, exceto a barra flutuante. Tomando como exemplo o sistema mostrado na Figura 3.24, obtêm-se o sistema de Equações 3.26:

$$\begin{aligned}
 P_2 - jQ_2 &= \dot{V}_2^* \times (Y_{21} \times \dot{V}_1 + Y_{22} \times \dot{V}_2 + Y_{23} \times \dot{V}_3), \\
 \dot{V}_2 &= \frac{1}{Y_{22}} \times \left(\frac{P_2 + jQ_2}{\dot{V}_2^*} - Y_{21} \times \dot{V}_1 - Y_{23} \times \dot{V}_3 \right), \\
 \dot{V}_3 &= \frac{1}{Y_{33}} \times \left(\frac{P_3 + jQ_3}{\dot{V}_3^*} - Y_{31} \times \dot{V}_1 - Y_{32} \times \dot{V}_2 \right)
 \end{aligned}
 \tag{3.26}$$

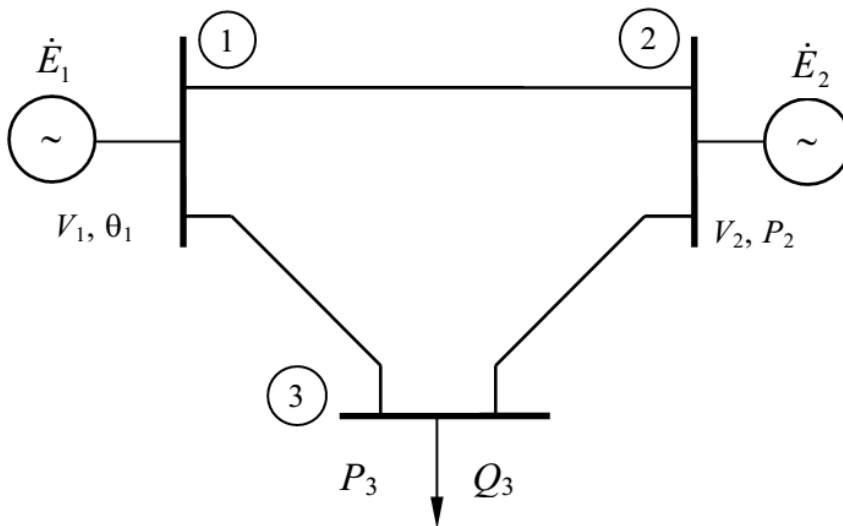


Figura 3.2421 - Exemplo de Sistema elétrico
 FONTE: BORGES, 2005

Deste sistema, são conhecidas:

V_1, θ_1 : constantes durante todo o processo, pois pertencem à barra flutuante,

P_2, Q_2, P_3, Q_3 : constantes durante todo o processo, pertencentes à barra PQ

São calculadas as variáveis: $V_2, \theta_2, V_3, \theta_3$

Como critério de convergência, o método de Gauss-Seidel apresenta a Equação 3.27:

$$\Delta V_k = \left| \dot{V}_k^{(i)} - \dot{V}_k^{(i-1)} \right| \leq \varepsilon, \text{ onde } \varepsilon \text{ está entre } 10^{-4} \text{ e } 10^{-6} \quad (3.27)$$

A tensão calculada no ponto de conexão para diferentes valores de X/R é mostrada na Figura 3.25.

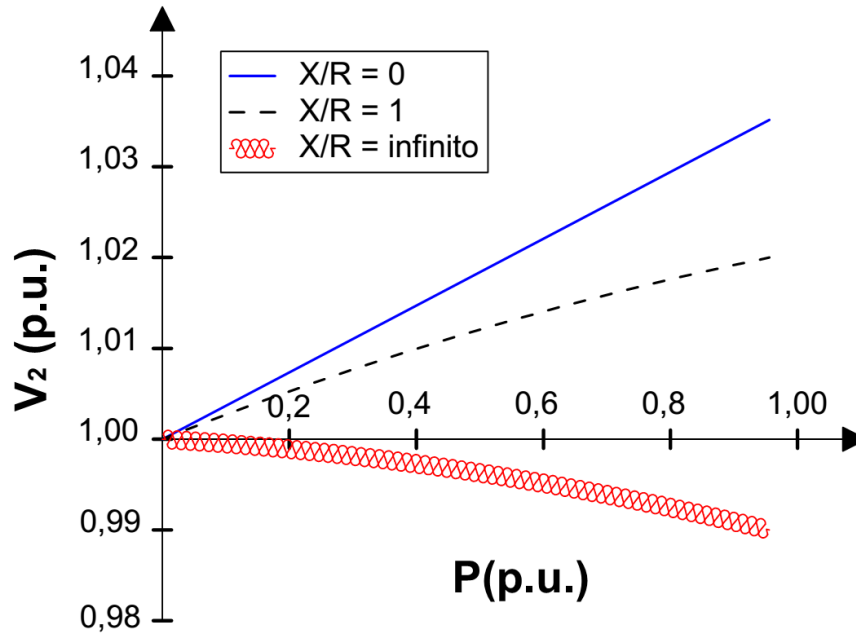


Figura 3.25 - Comportamento da Tensão para diferentes taxas de X/R

FONTE: Adaptado de PINTO, 2013

Como verificado na Figura 3.26, uma baixa razão de reatância por resistência (X/R) aumentará a tensão no ponto de conexão (V_2 , ver Figura 3.24), enquanto uma alta taxa de X/R diminuirá a tensão. Taxas baixas são encontradas em redes fracas nas áreas rurais, onde são por vezes usadas longas linhas sobrecarregadas (PINTO, 2013).

CAPÍTULO 4

REALIDADE VIRTUAL: UM RECURSO PARA ENSINO E TREINAMENTO

Com o passar dos anos, torna-se evidente a evolução da tecnologia: máquinas mais potentes, internet mais acessível e com maiores velocidades, aparelhos de telefone com recursos antes nunca imaginados, e muito mais. Há de se observar que, concomitante ao avanço da tecnologia, deve estar também a progressão das técnicas de ensino utilizadas em sala de aula, objetivando otimizar o aprendizado dos alunos desta geração que é imersa num mundo tecnológico sem precedente.

Esta sessão destina-se a mostrar as definições, características e utilidades de um recurso tecnológico a ser explorado na confecção deste trabalho: a realidade virtual. Será tratada também a sua relação e benefícios no contexto da educação.

4.1 Realidade Virtual

A Realidade Virtual (RV) é definida por Tori e Kirner (2006), como uma “interface avançada do usuário” para acessar aplicações executadas em um computador, apresentando características como a visualização e movimentação em ambientes tridimensionais em tempo real, além da interação com elementos deste ambiente virtual. Lá, é possível ver, ouvir, sentir, acionar e viajar além das capacidades humanas como: muito longe, muito perto, muito forte, muito fraco, muito rápido ou lento, pode-se ser tão grande ou pequeno quanto se queira, entre muitos recursos. Para isso, são utilizadas técnicas de modelagem tridimensional na elaboração dos objetos e montagem do cenário virtual, por onde o usuário irá navegar.

Bowman (2004) *apud* Santos (2013), diz que a interação do usuário com o ambiente virtual é um dos aspectos importantes da interface e está relacionada com a capacidade do computador detectar e reagir às ações do usuário, promovendo alterações na aplicação. O usuário que está interagindo com um ambiente virtual tridimensional realista proposto, em tempo real, observando as cenas serem modificadas como resposta aos seus comandos, tornando a interação mais rica, natural e atraente à utilização, gerando mais engajamento à operação o ajudando em operações complexas e como resultado a eficiência no procedimento.

Pode-se concluir que a Realidade Virtual é uma técnica avançada de interface, na qual o usuário realiza imersão (estar dentro do ambiente), navegação e interação em um ambiente tridimensional gerado pelo computador por intermédio de vias multi-sensoriais (PIMENTEL; SANTOS E MATTOS, 1998 apud BRAGA, 2002).

A Realidade Virtual pode ser classificada, em função do senso de presença do usuário, em imersiva ou não imersiva, sendo especificada por Tori e Kirner (2006) da seguinte forma:

- Imersiva: quando o usuário é transportado predominantemente para o domínio da aplicação, através de dispositivos multissensoriais, que capturam seus movimentos e comportamento e reagem a eles, como exemplo: capacete, caverna e seus dispositivos; provocando uma sensação de presença dentro do mundo virtual.
- Não Imersiva: o usuário é transportado parcialmente para o mundo virtual, através de uma janela (monitor ou projeção), mas continua a sentir-se predominantemente no mundo real.

Cabe ainda ressaltar o que é e o que não é categorizado RV: filmes, desenhos animados ou efeitos especiais não podem ser considerados, por se tratarem de uma gravação que não permite nem a navegação nem a interação do usuário em tempo real. Já videogames, possuem uma proximidade maior com RV, por priorizarem a interação. A Figura 4.1 mostra por meio de um diagrama simplificado, o processamento e as etapas de um sistema de Realidade Virtual:

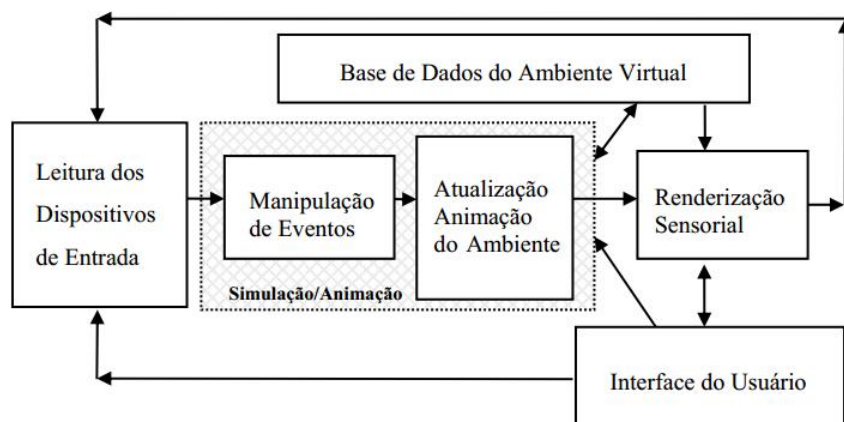


Figura 4.1 - Processamento do sistema de RV

FONTE: TORI; KIRNER, 2006

São algumas aplicações de Realidade Virtual, segundo Tori e Kirner (2006):

- Aplicações Industriais: importância da visualização em 3D, permite inspeção em tempo real, e alto grau de interação com o objeto sob análise; são exemplos: protótipos, treinamentos, simulações de montagem, técnicas de engenharia, planejamento, etc.
- Aplicações médicas e em saúde: treinamentos cirúrgicos em cadáveres virtuais, ensino de anatomia, tratamento de deficientes, etc.
- Aplicações em arquitetura e projeto: complementada com RV para: projeto de artefatos, planejamento da obra, inspeção tridimensional em tempo real, decoração, etc.
- Aplicações científicas: exposição de conceitos abstratos, comportamento de elementos muito grandes, como galáxias, ou pequenos, como estruturas moleculares, etc.
- Aplicações em educação: laboratórios virtuais, encontros remotos de alunos e professores, consulta a bibliotecas virtuais, etc.
- Aplicações em visualização e controle da informação: visualização financeira, informação virtual, visualização de simulações de sistemas complexos.
- Aplicações em entretenimento: turismo virtual, esportes virtuais, cinema virtual, etc.
- Outras aplicações: treinamentos, cidades virtuais, comércio eletrônico, modelagem, simuladores, estúdios virtuais, etc.

4.2 Realidade Virtual e Educação

A prática do educar, pode ser vista como um processo de exploração e de eterna construção do conhecimento. Diante disso, as características da Realidade Virtual podem transformar a educação num poderoso instrumento a serviço de todos que buscam a evolução da educação (BRAGA, 2002).

Meiguins e Behrens (1999) apud Braga (2002) vê o grande potencial da Realidade Virtual na educação, a possibilidade de descobrir, explorar, construir conhecimento (aprender) sobre lugares jamais pensados, tudo isso, não somente através de aulas ou

objetos físicos, mas através da manipulação virtual do alvo a ser explorado, analisado e estudado.

Pinho (2007) apud Braga (2002) acredita que a Realidade Virtual dará um grande salto em todas as áreas existentes, mas sobretudo na educação, por permitir experiências com o conhecimento de forma imersiva e interativa, ou seja, permite que ocorra aprendizagem sobre um assunto inserido no contexto desse assunto, e com isso, a cada ação do fazer, haverá um *feedback* desse contexto.

Segundo Machado, (2003) apud Santos (2003), a principal vantagem do uso de sistemas baseados em Realidade Virtual sobre métodos tradicionais de ensino, treinamento e assistência relaciona-se à exploração dos sentidos aliada à imersão do usuário ao tema apresentado. Graças aos efeitos tridimensionais, o espectador tem acesso a um novo tipo de experiência mais duradoura e impactante mesmo após a sessão de uso da RV.

Ainda no contexto da utilização de ferramentas de realidade virtual no objetivo de otimizar o processo de educação, torna-se válido a análise da Figura 4.2, que mostra de maneira hierárquica o grau de concretização de informações do ser humano.



Figura 4.2 - Cone de experiência de Edgar Dale

FONTE: Adaptado de (Dale,1969)

Destaca-se o posicionamento do termo: “Simulando uma experiência real”, ressaltando que o indivíduo, se assim executada uma prática, terá uma maior eficácia na memorização daquilo que foi dito ou feito. Pode-se assim, afirmar que a presença de ferramentas computacionais que objetivem simular conteúdos didáticos ao aluno, o propiciam uma experiência ativa e podem elevar seus níveis de memorização e aprendizado do conteúdo ministrado.

De forma conclusiva, Bell e Foglerl (1995), Pinho (2000) e Meiguins (1999) apud Cardoso e Júnior (2006), apontam como principais vantagens da utilização de técnicas de Realidade Virtual para fins educacionais, os itens a seguir:

- Motivação de estudantes e usuários em geral, baseado na experiência de 1ª pessoa vivenciada;
- Maior capacidade de ilustrar características e processos, em relação a outros meios multimídia;
- Visualização de detalhes de objetos;
- Visualização de objetos que estão a grandes distâncias;
- Permite experimentos virtuais;
- Permite o usuário refazer experimentos de forma atemporal, fora do âmbito da aula clássica
- Exige que o participante se torne ativo dentro de um processo de visualização;
- Encoraja criatividade;
- Provê igual oportunidade de comunicação para estudantes de culturas diferentes, a partir de representações;
- Ensina habilidades computacionais e de domínio de periféricos.

CAPÍTULO 5

PROJETO DE CONFECÇÃO E MODELAGEM DO SIMULADOR DE CONTROLE, ENERGIA E CONEXÃO A REDE – SiConErCo

O Capítulo 5 mostra o processo de criação do SiConErCo – Simulador de Controle, Energia e Conexão à rede. Tem esse nome, pois é um simulador que aborda 3 contextos distintos em sua plataforma, comum ao contexto de energia eólica. Sob a forma de cenários distintos, o simulador é organizado:

- Controle de passo: Faz referência ao controle ativo de passo (*pitch control*). O usuário é imerso em no ambiente de parque eólico, e terá as opções de variar a velocidade do vento e poder observar as variações do sistema através da estratégia de controle e regulação de potência. É possível também variar a direção do vento, e verificar a atuação do controle de guinada (*yaw*).
- Controle por estol ativo: Apresenta a mesma metodologia do controle de passo, porém, utiliza a estratégia de controle de estol ativo (*active stall*).
- Produção de Energia: Nesse cenário, são disponibilizados 3 modelos de aerogeradores à escolha do usuário, para cálculo da produção de energia teórica daquela máquina para uma localidade determinada pelo usuário. É calculado também o Fator de carga do aerogerador.
- Parque Eólico: Nesse módulo, o foco é o conjunto de aerogeradores que compõem um parque eólico. Características como controle de potência e guinada, além da visualização do *layout* do parque são trabalhadas nesse cenário.
- Conexão à rede: No ultimo cenário do SiConErCo, são trabalhados os conceitos de conexão à rede do parque eólico e as variações de tensão nas barras através do método de fluxo de carga.

5.1 Construção do Ambiente – *Softwares* utilizados

Para a criação dos 5 módulos principais de simulação de atividades inerentes à energia eólica, seria necessário estabelecer qual o ambiente que contivesse recursos que pudessem satisfazer os requisitos de interatividade que a proposta didática da ferramenta possui. Para tal, foram determinados dois *softwares* principais: O *Unity 3D* - com suas

diversas funções e ferramentas, ele facilita a criação de ambientes, objetos e personagens, e também controla a interação entre estes objetos no mundo; e o *Blender* – objetivando a criação e modelagem de objetos em 3D para uso no ambiente *Unity 3D*.

5.1.1 Unity 3D

O *Unity 3D* é um ambiente para desenvolvimento de jogos com funções e ferramentas que facilitam a criação de ambientes, objetos e personagens, além do controle e interação entre estes objetos no mundo, de maneira intuitiva (PIETSCH JUNIOR, 2013).

Uma ferramenta de interface gráfica de fácil uso e edição para animação, controle e interação com objetos, capacidade de comunicação com *hardware* externo, o fato de ser grátis e disponível para fins de pesquisa e educação, além de oferecer suporte para múltiplos sistemas, são requisitos descritos por Bartneck et al, (2015) para afirmar que o *Unity 3D* forma uma comunidade potencial desenvolvidora de seu progresso.

Santos, (2013), classifica o *Unity 3D* como de fácil uso, que permite inserir elementos pré-fabricados ao ambiente, facilitando a concepção realística de cenários de treinamento. Ele se enquadra tanto para iniciantes quanto para usuários avançados na programação de jogos, além de permitir o desenvolvimento com facilidade de aplicações que podem funcionar em ambientes *online* ou *off-line*, sendo exportadas como produto final para as plataformas Mac, PC, iPhone e IPAD, TV e consoles de jogos, como mostra a Figura 5.1:

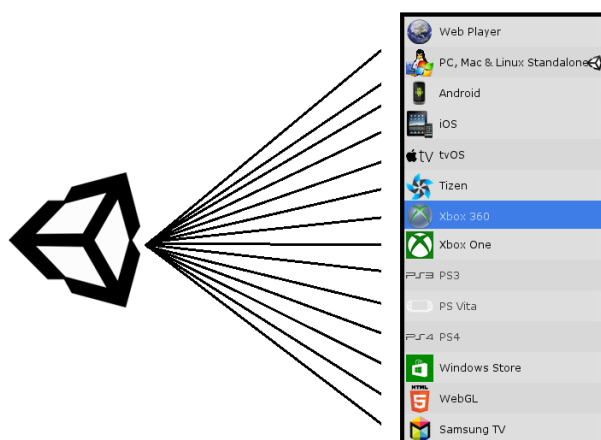


Figura 5.1 - Plataformas disponíveis exportação do projeto desenvolvido no Unity 3D

FONTE: *UNITY 3D*, 2016

A linguagem de programação base a ser utilizada na confecção do SiConErCo via *Unity 3D*, será o *C#* ou *C sharp*, explanada por Hirata (2011), como uma linguagem de programação orientada a objetos desenvolvida pela Microsoft como parte da plataforma NET, A sintaxe dessa linguagem teve como suporte o C++, porém inclui muita influência de outras linguagens de programação, como *Delphi* e *Java*. Para edição, compilação e criação dos códigos, é utilizado o *Microsoft Visual Studio 2015*. A Figura 5.2 exibe uma amostra do ambiente de programação orientada ao objeto:

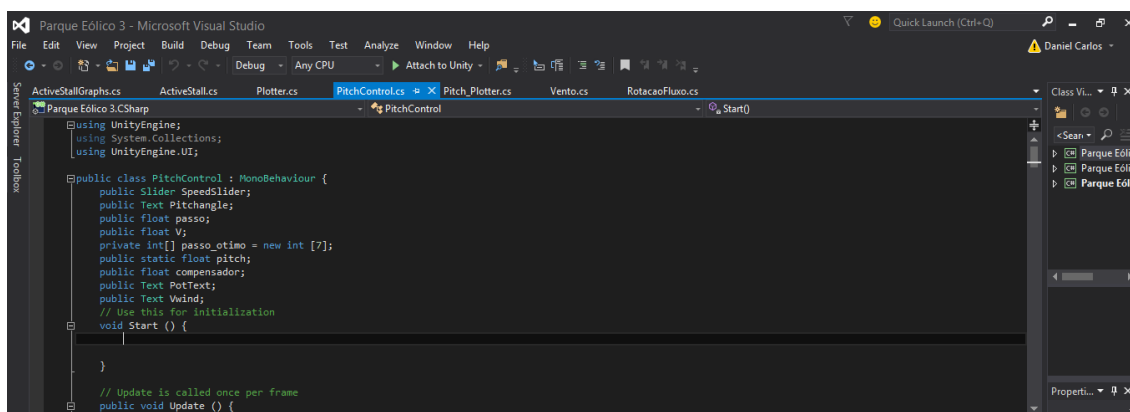


Figura 5.2 - *Microsoft Visual Studio 2015* em edição

FONTE: *MICROSOFT VISUAL STUDIO*, 2016

O *Unity 3D* possui uma loja virtual chamada *Asset Store*, onde é possível encontrar uma série de itens como scripts e objetos para serem comercializados e se manterem acessíveis aos demais usuários da ferramenta. Além disso, o *Unity* possui uma comunidade amigável que compartilha seus projetos em busca de melhorar cada vez mais os projetos realizados neste ambiente, o que, facilita bastante a aquisição de habilidades para a consolidação objetivo de confecção da ferramenta voltada para a difusão do conhecimento sobre energia eólica.

5.1.2 *Blender*

O *Blender* é um *software* de código aberto, desenvolvido pela *Blender Foundation*, com função de modelagem em três dimensões, animação, texturização, composição, renderização, edição de vídeo e criação de aplicações interativas em 3D, como jogos, apresentações e outros. O programa é multiplataforma, estando disponível para diversos sistemas operacionais.

A principal utilidade do *Blender* para o desenvolvimento do SiConErCo, é a de modelagem dos objetos a serem utilizados no ambiente de parque eólico proposto no simulador. Esses objetos modelados irão ser exportados em formato adequado e compatível para o *Unity 3D* e, imerso na plataforma, objetivando responder às ações a serem desenvolvidas no *software* para contemplar o que se planeja para eles. A Figura 5.3 mostra um objeto criado no *Blender* e exportado no formato *.fbx* no ambiente *Unity 3D*:

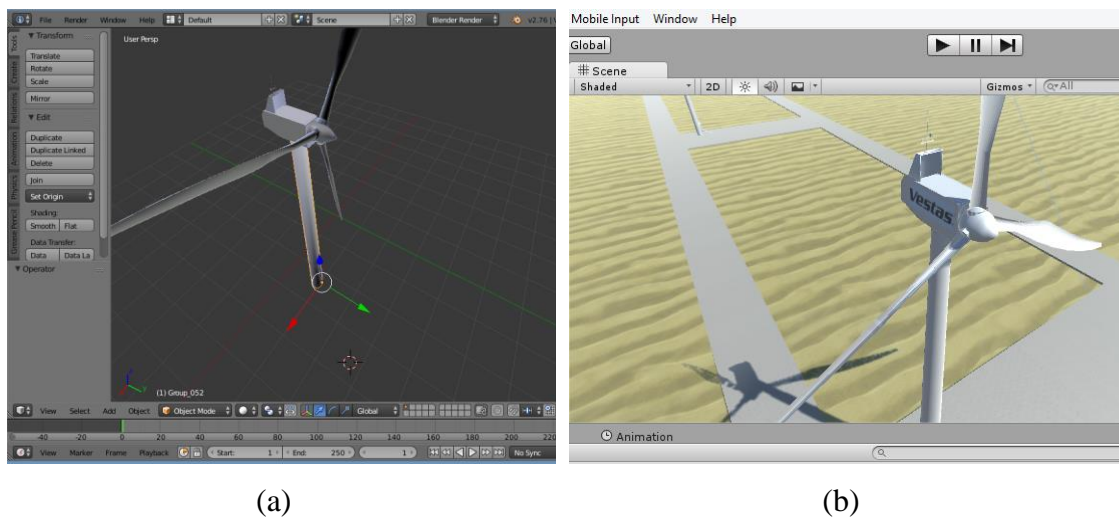


Figura 5.3 - Modelo de Aerogerador confeccionado no *Blender*; (b) Aerogerador no formato *.fbx* exportado e imerso no ambiente *Unity 3D*

FONTE: A autoria Própria

5.2 Módulo – Controle de Passo e Estol Ativo

O conteúdo a ser descrito nesta subseção abordará a metodologia adotada na confecção da proposta de duas seções específicas do Simulador de Controle, Energia e Conexão à rede: o controle de passo e de estol ativo do aerogerador. Para tanto, é lembrado que esta foi a primeira proposta do simulador, sendo os outros módulos, resultantes de adaptações e modificações desta primeira, onde ocorreram as modelagens mais básicas dos objetos, assim como toda a construção do ambiente no *Unity 3D*.

No intuito de tornar a experiência de simulação real não somente em aspectos técnicos, mas também físicos e geográficos, o SiConErCo teve toda a sua estrutura baseada no Parque Eólico Alegria, em termos de sua geografia e disposição das torres, além das especificações dos aerogeradores que o compõem. O Parque Eólico Alegria está

localizado no município de Guamaré, no estado do Rio Grande do Norte. Com capacidade instalada total de 151,9MW, Alegria ocupa uma área total de cerca de 1.900 hectares, na Praia do Minhoto, a aproximadamente 170 km de Natal (Parque Eólico Alegria, 2016). Além das informações contidas no *website* do parque eólico de Alegria, dados precisos de localização e quantidade de aerogeradores foram tomados a partir do *Google Earth*. As Figuras 5.4 (a e b) e 5.5 ilustram, respectivamente, a disposição geográfica do parque eólico Alegria em animação disponível no site e sua reprodução no SiConErCo; além da metodologia adotada para mapeamento das máquinas via *Google Earth*.

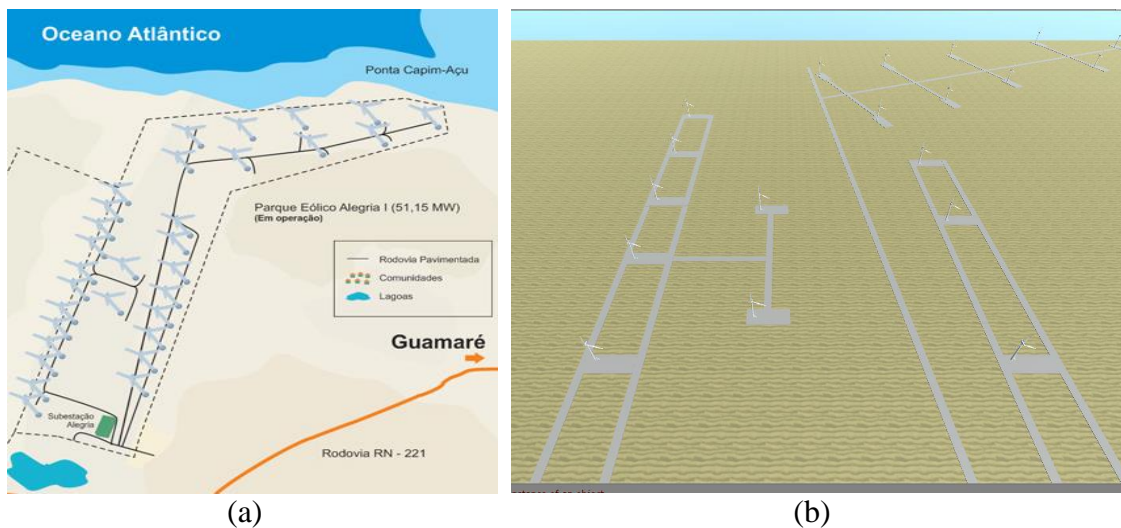


Figura 5.4 - (a) Arte da disposição geográfica das torres no parque eólico Alegria; (b) Reprodução do layout do parque eólico de Alegria no SiConErCo

FONTE: Autoria Própria

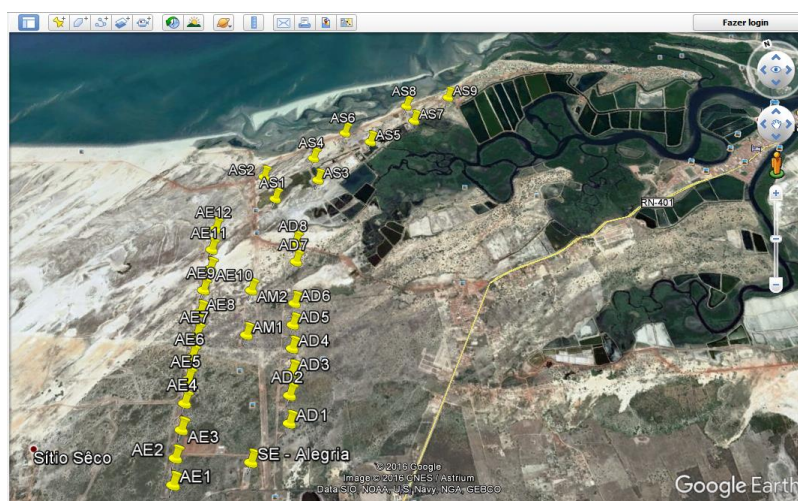


Figura 5.5 - Imagem base retirada do Google Earth para alocação exata dos aerogeradores no SiConErCo

FONTE: GOOGLE, 2016

Os aerogeradores que estão instalados no parque são do modelo *Vestas V82-1.65*. Assim, toda a modelagem da torre eólica será realizada a partir da ficha técnica de seu modelo, descrita de forma completa, no Anexo I. Abaixo, a Tabela 5.1 sintetiza as principais informações sobre as dimensões e formato do aerogerador, a serem aproveitadas para fins de modelagem 3D. A Figura 5.6 reflete o formato do modelo:

Tabela 5.1 - Dados técnicos dimensionais do aerogerador Vestas 1.65 MW

Diâmetro do rotor (D)	82 m
Área varrida (A)	5281 m ²
Altura do cubo	70 m
Orientação do rotor	Upwind
Comprimento das pás	40 m
Cor Padrão	RAL 7035 (cinza luminoso)
Perfil das pás	FFA – W3, NACA 63.4
Número de pás	3
Tipo de Cubo	Esférico

FONTE: (VESTAS, 2005)

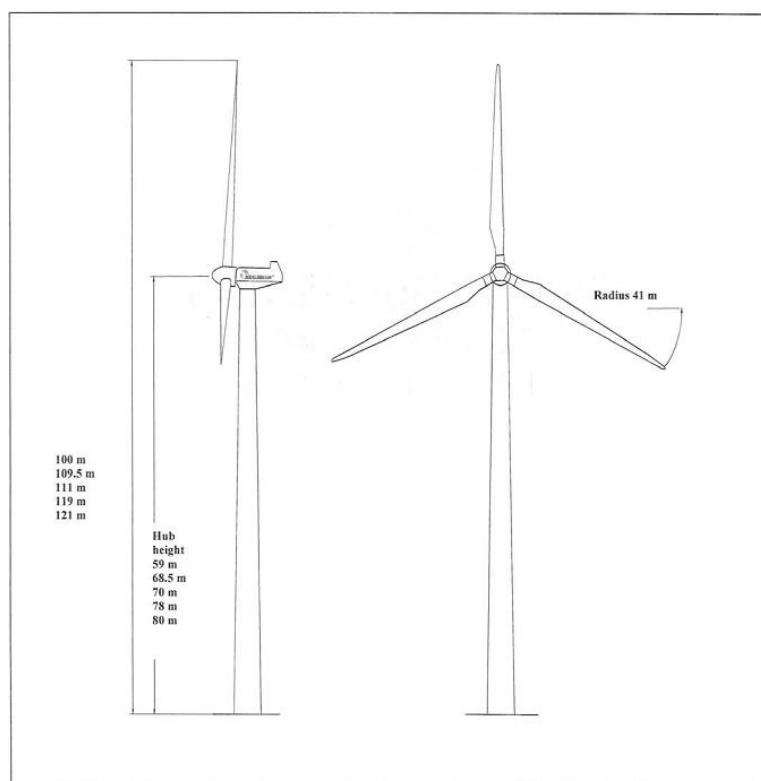


Figura 5.6 - Modelo Vestas V82-1.65 visto em sua ficha técnica

FONTE: VESTAS, 2005

Com os dados em mãos, foi dado início a modelagem da turbina eólica no *software Blender*. O aerogerador foi dividido em 4 partes distintas para modelagem em separado, e posterior união e objetivo de se assemelhar com o modelo original, descrito na Figura 5.6. Os 4 constituintes da máquina para efeitos de modelagem, são mostrados nas Figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10, sendo, respectivamente, nas vistas superior, inferior, perspectiva e frontal: Pá, Conjunto Nacele, Cubo e Torre:



Figura 22.7 - Modelagem da Pá do aerogerador

FONTE: Aatoria Própria

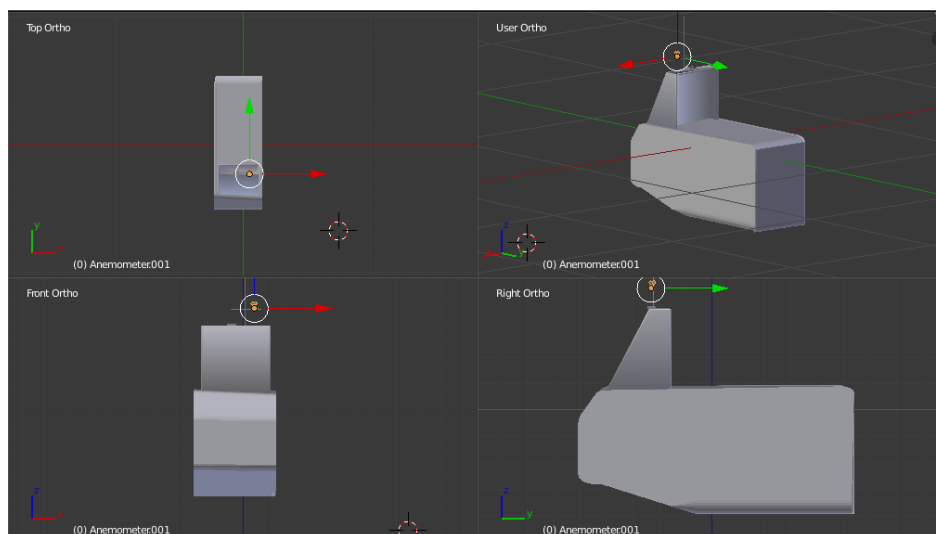


Figura 5.8 - Modelagem do conjunto Nacele do aerogerador

FONTE: Aatoria Própria

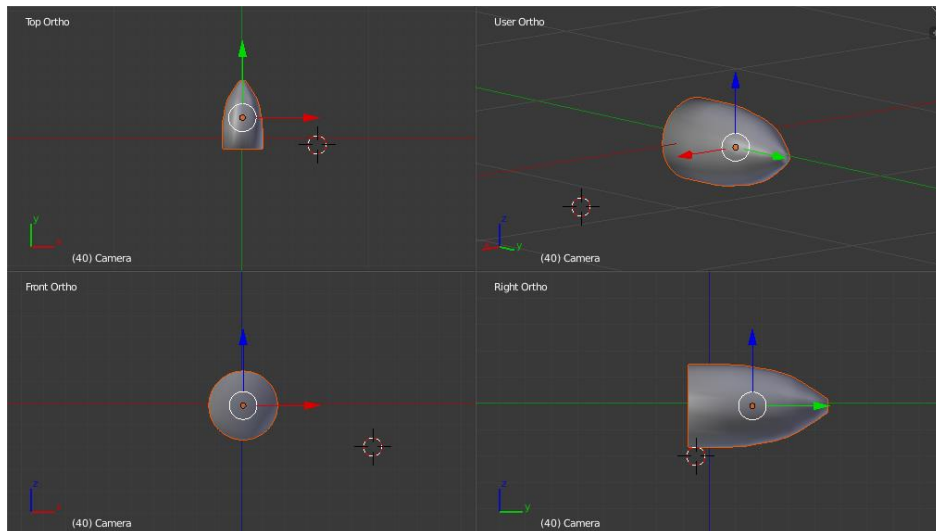


Figura 5.9 - Modelagem do cubo do aerogerador

FONTE: Autorial Própria

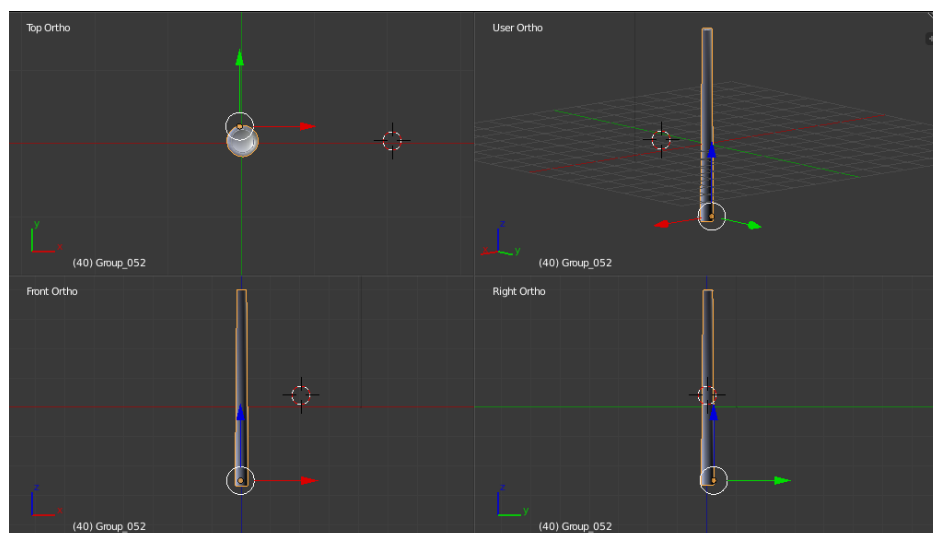


Figura 5.1023 - Modelagem da torre do aerogerador

FONTE: Autorial Própria

Terminadas as modelagens de cada peça em separado, foram então unidas para formar o conjunto aerogerador. O resultado é mostrado na Figura 5.11, nas vistas frontal e lateral esquerda, tal qual a Figura 5.6, do modelo real da máquina. O próximo passo foi a exportação do modelo trabalhado no *Blender* para o *Unity 3D*. Para isso, o objeto foi transformado para o formato *.fbx*, e então, carregado no *software* encarregado pela criação do simulador.

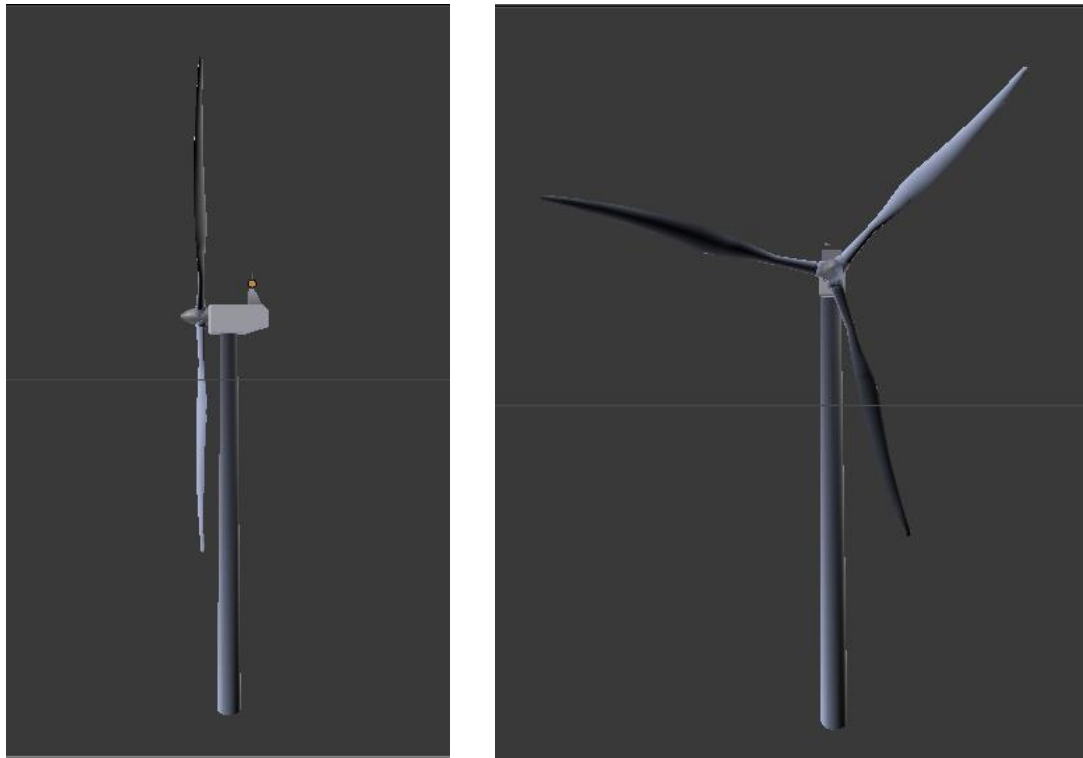


Figura 5.11 - Modelagem do Aerogerador

FONTE: Aatoria Própria

Ressalta-se que, embora fosse possível realizar e edição visual do aerogerador, como pintura e adição de logomarca, no *Blender*, optou-se por fazer isso no próprio *Unity 3D*, por razões de conveniência. O resultado é mostrado na Figura 5.12.



Figura 24.12 - Aerogerador no Unity 3D

FONTE: Aatoria Própria

Até o momento, o resultado era um ambiente que retratava um parque eólico, com as máquinas dispostas, porém sem função nem interatividade alguma. Estava então, encerrada a etapa de modelagem 3D, assim como a participação do *Blender*. O próximo passo então, foi a implementação da animação e interatividade do simulador, através da confecção dos códigos para realizar a programação orientada ao objeto, e o desenvolvimento da interface gráfica para o usuário ter a ação livre no simulador, onde este possa obter respostas imediatas aos estímulos gerados por ele próprio.

A primeira ação nessa fase, por se tratar de uma proposta de atividades em um parque eólico, foi a definição do vento como a grandeza principal a ser abordada no trabalho: será ele, o elo entre o usuário e o simulador, a variável central a ser modificada e da qual originarão as ações de controle provocadas pelos sensores de magnitude e direção. Porém, o vento, no ambiente de simulação, não é nada senão uma força que fará com que os objetos imersos no simulador reajam à sua força. Para tanto, foi criada uma barra deslizante com um cursor que varia de um valor mínimo até um máximo, correspondente à variação da magnitude do vento, a ser modificada livremente pelo usuário, como mostrado na Figura 5.13:

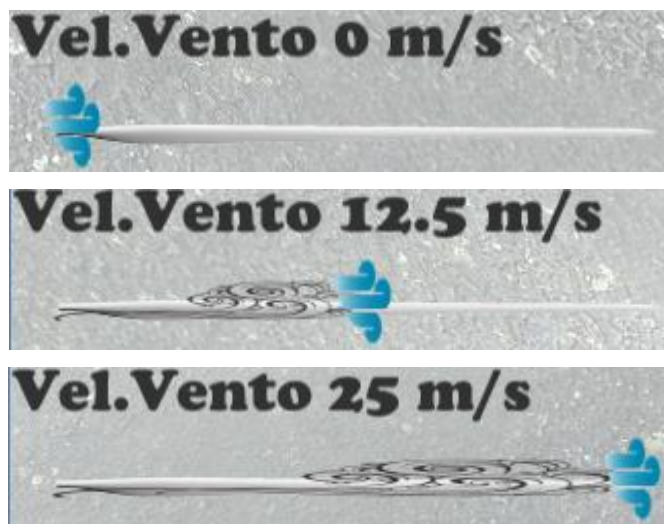


Figura 5.13 - Barras deslizantes interativas

FONTE: Aatoria Própria

Portanto, a partir de então, o vento é controlado pelo usuário. O que se observa na prática, é que, ao variar as velocidades na barra, haverá uma rotação do conjunto das pás proporcional a velocidade do vento escolhida. Esta rotação seguiu os parâmetros fornecidos pela especificação técnica, onde informa que as velocidades nominais de

incidência de vento e rotação, respectivamente, são 13 m/s e 14,4 rpm, estando assim, na simulação, devidamente calibradas. Objetivando um realismo na simulação, foi trabalhado um *script*⁸ que destaca a inércia das pás, fazendo com que, por exemplo, a redução brusca de velocidade do vento não signifique numa parada total nas pás, mas sim, uma diminuição gradativa.

Por se tratar de um ambiente amplo, com várias máquinas rodeando o parque, optou-se por dar ao usuário uma experiência em 1ª pessoa: este, transitará pelo parque pelo toque dos botões do teclado referentes às direções frente, trás, esquerda e direita, simulando passos; além de poder visualizar todo o ambiente em 360° através da movimentação do mouse. Para este módulo, serão disponibilizadas 3 visualizações diferentes para o usuário, na forma de câmeras posicionadas em 3 localizações diferentes:

- A primeira, ao nível do solo, simulará o usuário pelo parque visualizando os aerogeradores de baixo pra cima;
- A segunda, na linha de altura da nacele, permite uma visão frontal detalhada das pás, cubo e conjunto nacele.
- A terceira, na mesma altura da segunda, permite uma visão traseira dos itens do topo do aerogerador. Todas as câmeras podem ser movimentadas.

É possível alternar entre as câmeras através de abas na interface gráfica interativa. As Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 mostram as vistas disponíveis para cada câmera.

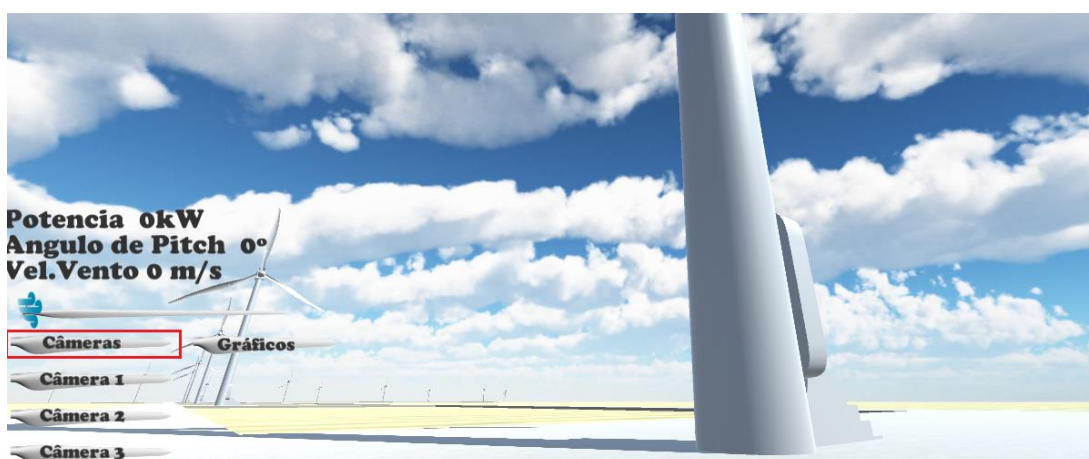


Figura 5.14 - Vista da Câmera 1

FONTE: Autoria Própria

⁸ *Script* será o termo utilizado para cada conjunto de linhas de código de programação em *c#* que objetivem orientar um objeto a determinados comandos específicos no simulador.

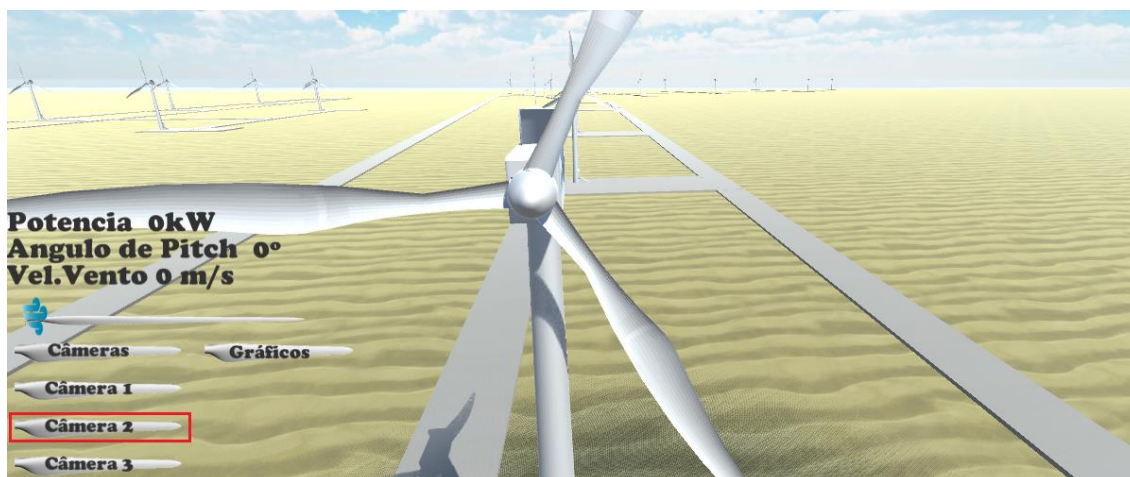


Figura 5.1525 - Vista da Câmera 2

FONTE: Aatoria Própria

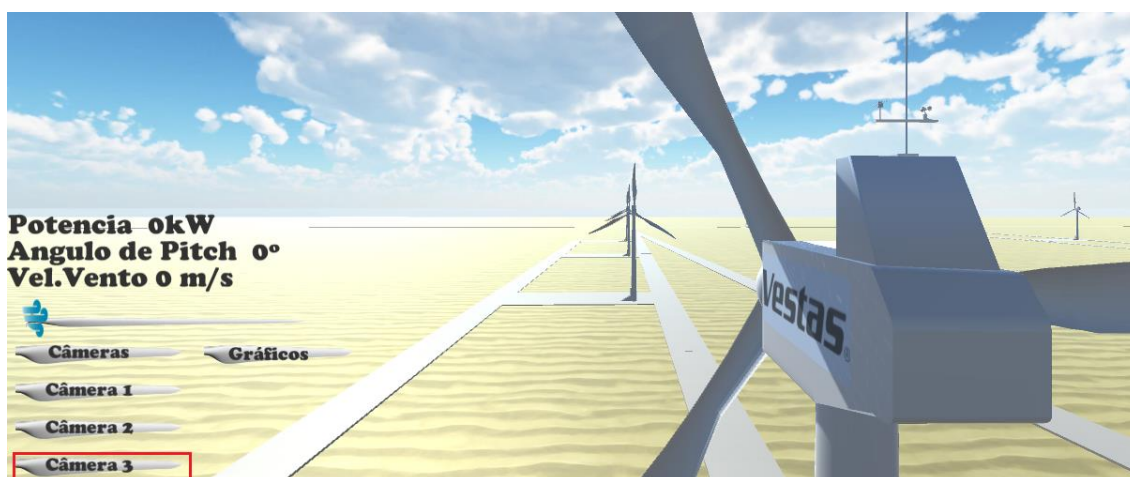


Figura 5.16 - Vista da Câmera 3

FONTE: Aatoria Própria

Estando em funcionamento a parte de visualização e interação da simulação, o passo seguinte é o estabelecimento do controle de passo da máquina. Para sua realização, foram retiradas do manual de informações gerais do modelo *Vestas V82-1.65*, as informações pertinentes, tais como as mostradas na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Dados técnicos pertinentes ao controle de potência do aerogerador Vestas V82-1.65 MW

Potência nominal (P)	1650 kW
Diâmetro do rotor (D)	82 m
Área varrida (A)	5281 m ²
Altura do cubo	70 m
Velocidade de rotação (Ω)	14.4 rpm
Velocidade na ponta (V_p)	61.8 m/s
Regulação de Potência	ActiveStall®
Velocidade de corte inferior do vento (v_w)	3.5 m/s
Velocidade nominal do vento (v_w)	13 m/s
Velocidade de corte superior do vento (v_w)	20 m/s

FONTE: VESTAS, 2005

Além desta, foram recolhidas informações das Tabelas de Curva de potência e C_p (14 e 15 do Anexo I), contendo os valores de Potência (P) e coeficiente de potência (C_p) em função da velocidade do vento, cujos valores podem ser sintetizados no Gráfico 5.1. Uma informação importante é de que a estratégia de controle atuante do modelo é o *ActiveStall*®. Porém, para tornar mais didática a ferramenta, serão trabalhados e expostas situações com controle de passo e o próprio estol (*stall*) ativo.

Neste momento, haveria a necessidade de trabalhar cada pá do aerogerador para que esta respondesse às variações de velocidade a partir de um determinado valor. Essa resposta deve ser em forma de giro em torno de seu eixo longitudinal, caracterizando o aumento ou diminuição do ângulo de passo β , e conseqüente redução das forças de sustentação, necessárias para a geração de energia a partir do aerogerador (ver sessão 3.2).

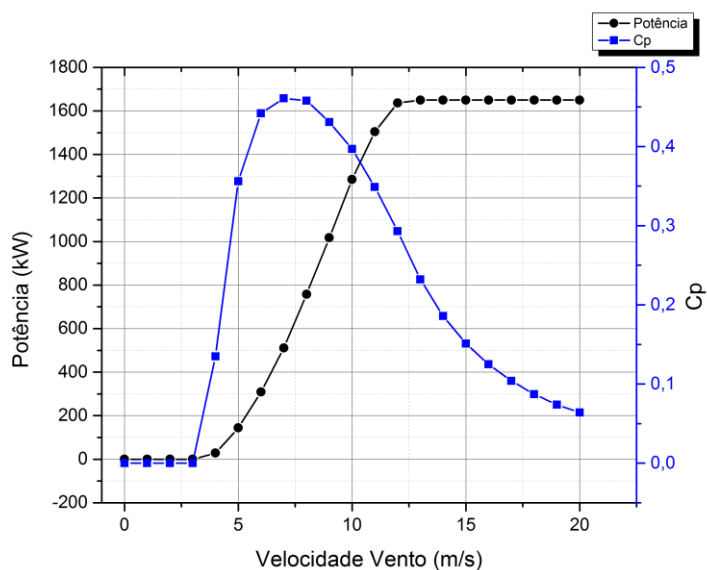


Gráfico 5.1 - Potência (P) e Coeficiente de Potência (C_p) do aerogerador Vestas V82-1.65 MW

FONTE: VESTAS, 2005

Assim, seria necessário elaborar um *script* que simule um controle de rotação dessas pás em torno de seu eixo, respondendo às variações de velocidade e direção do vento. Os sensores responsáveis pela leitura desses dados são o anemômetro e o leme, mostrados em detalhe na Figura 5.17:

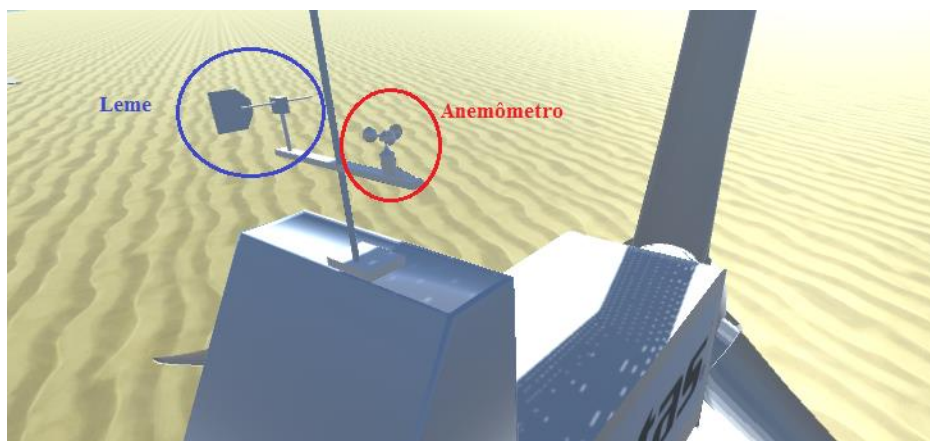


Figura 5.17 - Leme e Anemômetro: Sensores de direção e velocidade do vento.

FONTE: Autoria Própria

O *script* de controle tem a função de rastrear o ângulo de passo β ótimo para a situação adequada. Os critérios estabelecidos estão na Tabela 5.3. O diagrama de blocos

esquematisando a regulação de potência na saída com o vento e a rotação do rotor como variáveis de entrada é mostrado na Figura 5.18.

Tabela 5.3 - Critérios para o controle de Estol Ativo e de Passo

Estol Ativo				
Condições	P < 1650 kW		P = 1650 kW	
	$v_w < 13 \text{ m/s}$	$v_w > 13 \text{ m/s}$	$v_w > 13 \text{ m/s}$	$v_w > 20 \text{ m/s}$
Ações	Rastrear passo ótimo $\frac{d\beta}{dt} = 1^\circ/\text{s}$ Passo ótimo 0°	Rastrear passo ótimo $\frac{d\beta}{dt} = 1^\circ/\text{s}$ Passo ótimo variável	Rastrear passo ótimo $\frac{d\beta}{dt} = -1^\circ/\text{s}$ Passo ótimo variável	$\frac{d\beta}{dt} = 5^\circ/\text{s}$ Passo ótimo 90°
Controle de Passo				
Ações	Rastrear passo ótimo $\frac{d\beta}{dt} = 1^\circ/\text{s}$ Passo ótimo 0°	Rastrear passo ótimo $\frac{d\beta}{dt} = 1^\circ/\text{s}$ Passo ótimo variável	Rastrear passo ótimo $\frac{d\beta}{dt} = 1^\circ/\text{s}$ Passo ótimo variável	$\frac{d\beta}{dt} = 5^\circ/\text{s}$ Passo ótimo 90°

FONTE: Adaptado de HOFFMAN, 2002

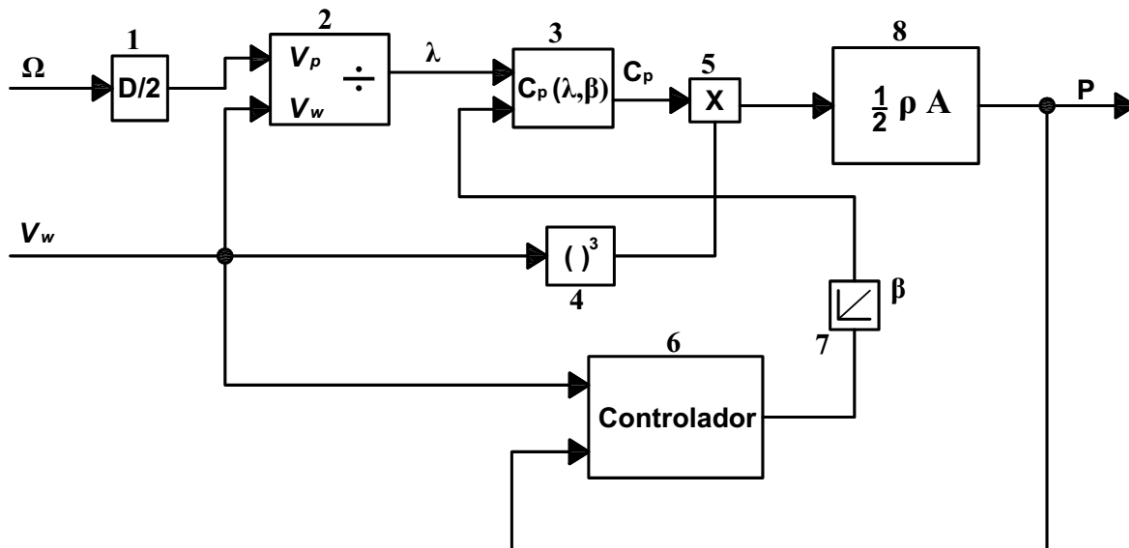


Figura 5.18 - Diagrama de blocos para os controles de passo e estol ativo

FONTE: Autoria Própria

O diagrama de blocos da Figura 62 resume como foi realizado o controle de passo e estol do aerogerador: os dados de entrada são a velocidade de rotação Ω (rpm) e a velocidade do vento incidente V_w (m/s), e a saída é a potência gerada. O bloco 2 receberá as informações de raio da pá ($D/2$) e V_w , passando a informação de do TSR (λ) para o bloco 3, que por sua vez, receberá também a informação do ângulo de passo (β), e a repassará para o cálculo exato da Potência gerada P (conforme a Equação 3.16), juntamente com a velocidade do vento elevada ao cubo, feita no bloco 4.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (3.16)$$

O bloco 6, o controlador, é de fundamental importância para a interação requerida no simulador: o *script* que o representa, monitora os valores de potência gerada e velocidade de vento, os compara com os critérios de tolerabilidade, e age, enviando o comando para a alteração do ângulo de passo, em um ciclo constante.

O controle de guinada (*yaw*) é realizado de maneira semelhante aos controles de passo e estol. O sensor de direção (leme) capta a direção atual do vento. Este, repassa o ângulo de incidência do vento ($\Phi_{\text{incidente}}$) para o controlador, que por sua vez, envia o comando para atualização do ângulo de guinada (Φ_{yaw}), posicionando a nacele então, face à incidência do vento. O diagrama de blocos do sistema é mostrado na Figura 5.19. A Tabela 5.4 mostra de critérios para o controle de guinada. A Figura 5.20 ilustra a alteração do ângulo de guinada através de uma rosa dos ventos. No SiConErCo, a variação do sentido do vento é de responsabilidade do usuário, estando à ele disponível, uma rosa dos ventos com direções alteráveis, também vista na Figura 5.20.

Tabela 5.4 - Critérios para o controle de guinada

Controle de guinada (<i>yaw control</i>)		
Condições	$\Phi_{\text{incidente}} > 0^\circ$	$\Phi_{\text{incidente}} < 0^\circ$
Ações	<i>Rastrear Φ_{yaw} ótimo</i> $\frac{d\Phi}{dt} = 1^\circ/s$ <i>ângulo ótimo = $+\Phi_{\text{incidente}}$</i>	<i>Rastrear Φ_{yaw} ótimo</i> $\frac{d\Phi}{dt} = -1^\circ/s$ <i>ângulo ótimo = $-\Phi_{\text{incidente}}$</i>

FONTE: Adaptado de HOFFMAN, 2002

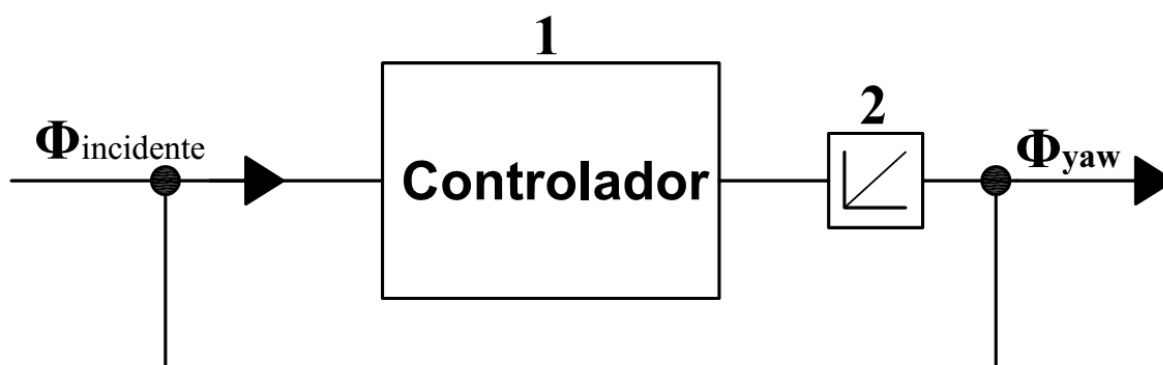


Figura 5.19 - Diagrama de blocos para o controle de guinada.

FONTE: Aatoria Própria

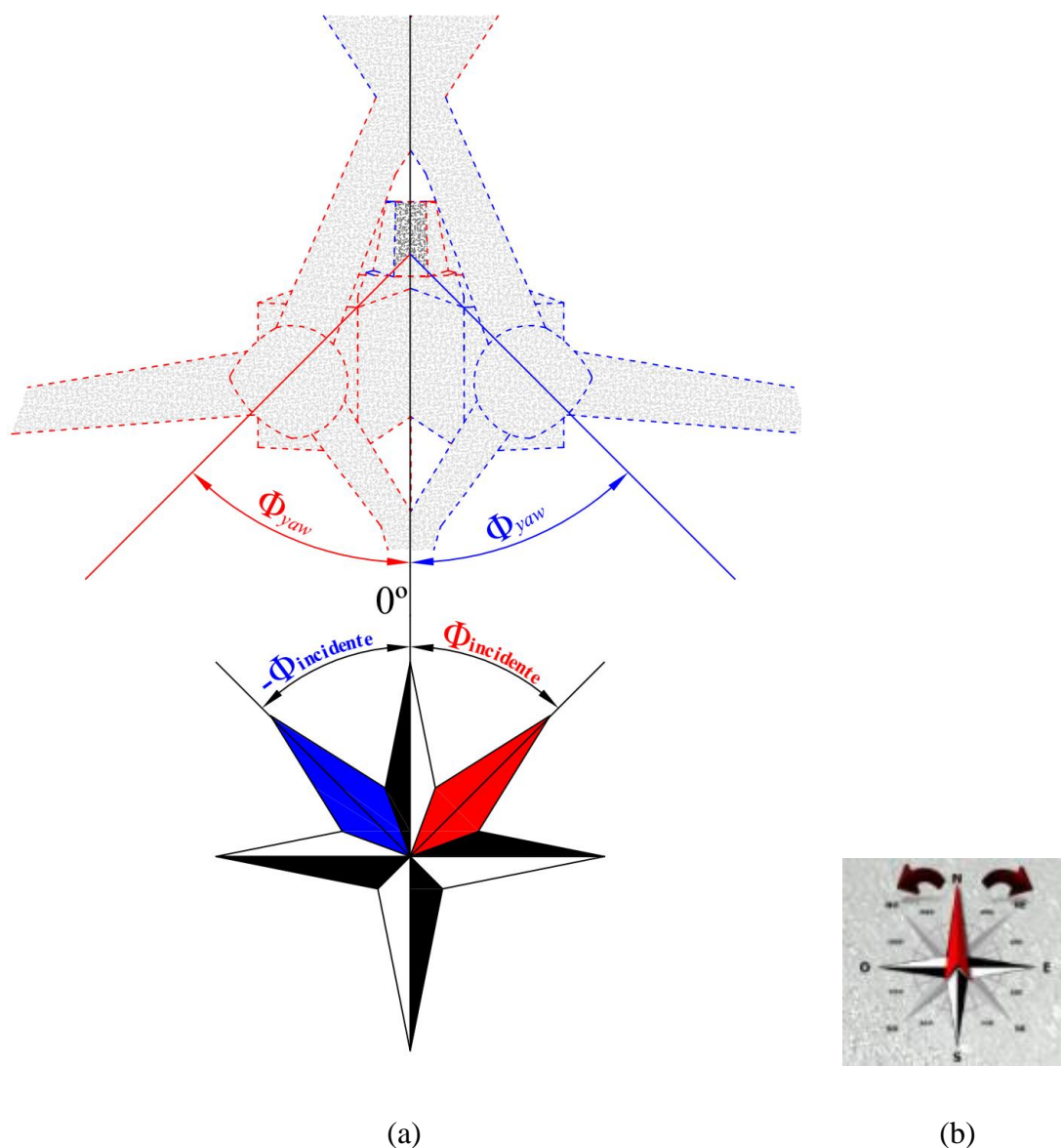


Figura 5.20 - (a) Representação gráfica das alterações dos ângulos de incidência do vento e de guinada; (b) Rosa dos ventos interativa, disponível no SiConErCo

FONTE: Aatoria Própria

Como última proposta para o módulo que aborda o controle de passo e estol ativo do SiConErCo, está a confecção de gráficos para acompanhamento visual das alterações realizadas no simulador e as respectivas respostas fornecidas pelos controles. Assim, resume-se da seguinte forma os recursos de visualização de controle de passo e estol ativo:

- Visualização numérica: os valores de velocidade do vento, ângulo de passo e potência gerada, são mostrados numericamente na interface;

- Visualização gráfica: para melhor interpretação, 3 gráficos (velocidade do vento, ângulo de passo e potência gerada) são criados para acompanhamento da variação dos parâmetros em tempo real;
- Visualização física: Esse recurso é presente na variação de passo. Ao comando do controlador para variação do ângulo de passo, as 3 pás do aerogerador giram em torno do seu eixo na proporção e velocidades requeridas.

Os detalhes dos gráficos inseridos serão melhor apresentados na sessão 6, que apresentará os resultados e discussões das simulações.

5.3 Módulo – Produção de Energia

Esta sessão trata da construção do módulo Produção de Energia do SiConErCo, tendo como informações base, aquelas contidas na sessão 2.5 deste trabalho, referentes à estatística e estimativa de potencial eólico de uma determinada localidade a partir de um aerogerador.

Este módulo difere do anterior, em aspectos de interatividade, pela ausência da movimentação do usuário em primeira pessoa no ambiente. Objetiva o processo de informações inseridas pelo usuário para determinar a potência eólica gerada por uma turbina eólica, tomando como referência um local determinado livremente. A tela do módulo Produção de Energia é mostrada na Figura 5.21. A seguir, serão explanados cada um dos itens do módulo, no que se refere aos aspectos de criação e uso.

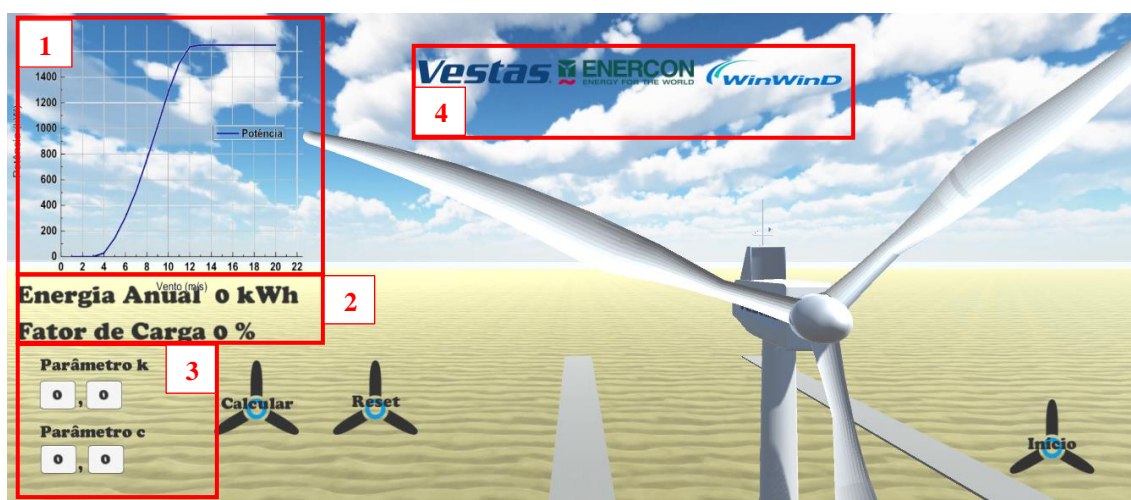


Figura 5.2126 - Módulo Produção de Energia do SiConErCo

FONTE: Autoria Própria

Serão disponibilizados 3 modelos de aerogeradores, com suas respectivas e distintas especificações técnicas. São destacados, na Tabela 5.5, os dados relevantes para o cálculo da estimativa de potência do aerogerador, incluindo suas respectivas curvas de potência, e imagens dos modelos referentes.

Tabela 5.5 - Especificações relevantes dos 3 modelos de aerogeradores trabalhados no módulo Produção de Energia do SiConErCo

Vestas V82-1.65 W		
Potência	1650 kW	
$v_{cut\ in}$	3.5 m/s	
v_n	13 m/s	
$v_{cut\ out}$	20 m/s	
Enercon E-70		
Potência	2300 kW	
$v_{cut\ in}$	2,5 m/s	
v_n	13,5 m/s	
WWD-3		
Potência	3000 kW	
$v_{cut\ in}$	4 m/s	
v_n	12,5 m/s	
$v_{cut\ out}$	20 m/s	

FONTE: Autoria Própria

As curvas de potência de cada modelo encontram-se na posição 1, da Figura 5.21. Para alteração do modelo, recorre-se aos botões em forma das respectivas logomarcas dos aerogeradores, na posição 4. Na posição 3, está uma sessão fundamental para o módulo: é lá, onde são inseridos, pelo usuário, os parâmetros de forma e escala (k e c , respectivamente), necessários para a aquisição dos dados referentes à Função Distribuição de *Weibull*, que estimará a incidência de ventos durante o ano. Para isso, é necessário que o usuário colete estes dados, disponíveis no *website* do CRESESB, na sessão referente ao Atlas eólico, inserindo dados de latitude e longitude de uma localidade à escolha. Sendo assim, é possível, a partir dos dados cruzados entre a potência de um aerogerador com as coordenadas de um local, obter a potência anual gerada pela máquina, e seu fator de carga. São mostrados os valores, na posição 2.

Os *scripts* realizados para este módulo, tiveram como base as Equações 2.3, 2.14 e 2.15. Exemplos de funcionamento do módulo de Produção de Energia serão melhor abordados no Capítulo 6.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} EAG &= \sum [f(v)P(v)] \times 365 \text{ dias} \times 24 \text{ horas} \\ &= \sum [f(v)P(v)] \times 8760 \text{ (kWh)} \text{ (kWh)} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$F_c = \frac{(EAG)}{8760 \times P_n} \quad (2.15)$$

5.4 Módulo – Parque Eólico

O módulo Parque Eólico do Simulador de Conexão, Energia e Controle, leva esse nome pela proposta generalista na qual se difere dos módulos anteriores: nele, serão abordados temas relativos ao conjunto de todas as torres presentes no sítio, não somente

uma. Diante disso, logo de início, o usuário irá se deparar com a tela ilustrada na Figura 5.22. Nela, é possível perceber que a visualização disponível é somente uma, e em uma perspectiva superior, onde é permitido percorrer todo o parque, explorando-o.

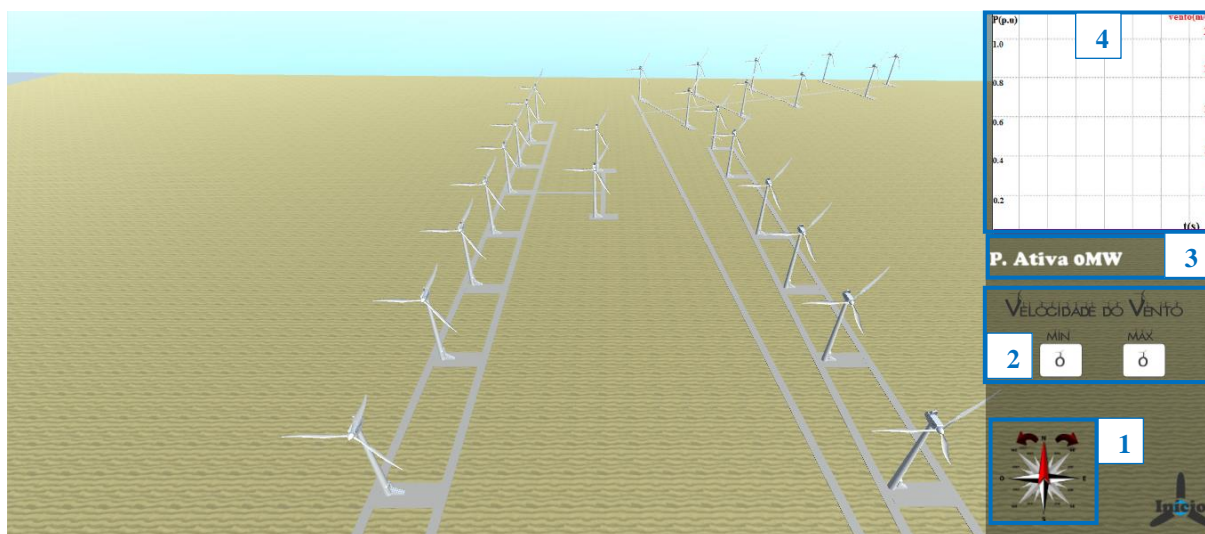


Figura 5.2227 - Módulo Parque Eólico do SiConErCo

FONTE: Autoria Própria

A metodologia de criação do módulo Parque Eólico em muito se assemelha com a utilizada nos Controles de Passo e Estol Ativo: visualizações físicas, gráficas e numéricas da potência gerada em detrimento da variação da velocidade do vento. Portanto, todos os *scripts* seguiram o mesmo modelo dos módulos 1 e 2 deste simulador. As principais diferenças são descritas a seguir, pontuadas segundo a numeração em destaque na Figura 5.22:

1. A rosa dos ventos com botões laterais de movimentação também indicam a direção de vento incidente nos aerogeradores. O diferencial deste módulo é poder acompanhar todo o parque executando o controle de guinada simultaneamente.
2. A variação de velocidade do vento ainda é papel do usuário do simulador, porém, de uma forma diferente, neste módulo: são disponibilizados dois espaços para que neles, respectivamente, sejam inseridos os valores máximos e mínimos de incidência do vento para os quais se deseja analisar o controle de potência das máquinas; nesse intervalo, o *script* criado irá criar valores aleatórios entre o máximo e mínimo, e os atribuirão como as variações de magnitude de vento.
3. A potência ativa é mostrada numericamente, variando em tempo real junto à variação da velocidade do vento. A diferença deste módulo é que, é levada em

consideração a potência ativa total gerada por todos os aerogeradores, resultando na potência gerada pelo parque eólico.

4. É disponibilizado para análise e interpretação do usuário, um gráfico, contendo os eixos de velocidade do vento (em vermelho) e potência gerada (em preto). A opção por unir duas grandezas no mesmo ambiente objetivou contrapor as variações em tempo real de ambas, e facilitar a compreensão da atuação do controle, estabilizando a potência gerada, embora houvesse alterações na magnitude do vento

As discussões e simulações deste módulo serão melhor abordadas na sessão 6 deste trabalho.

5.5 Módulo – Conexão à rede

Este módulo objetiva, de modo interativo e didático, mostrar os efeitos de variação de tensões nas barras, quando constatadas alterações na potência ativa injetada nelas. Esta última, variante com a magnitude do vento sobre o parque naquele momento.

Sob o ponto de vista de modelagem de objetos, este foi o único módulo no qual não houve exploração direta de um aerogerador, seja de forma individual (módulos 1,2 e 3) ou coletiva (módulo 4). Aqui, o objetivo é a representação de todo um parque conectado a uma barra do sistema elétrico através do destaque 1 dado na Figura 5.23. Ou seja, à esse item, graficamente, está atribuída toda a geração vinda do conjunto de aerogeradores do parque eólico.

O modelo de 3 barras (E_1 , E_2 e E_3), conectados através das impedâncias mostradas na Figura 5.23 foram baseadas no modelo contido em Borges, (2005). Portanto, todas as simulações partirão destes valores pré-definidos.

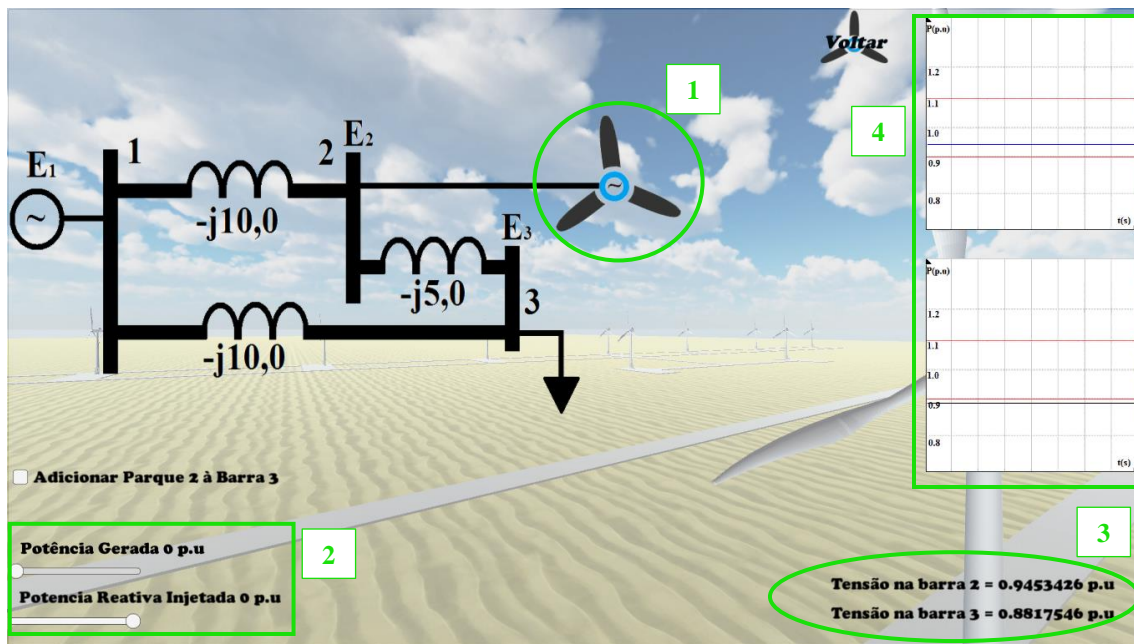


Figura 5.23 - Módulo Conexão à rede do SiConErCo

FONTE: Autoria Própria

A principal ferramenta para viabilização das simulações que mostrariam as variações de tensão nas barras segundo a injeção de potência ativa nas mesmas, é o cálculo do fluxo de potência, descrito em maiores detalhes na seção 3.6. Todo equacionamento foi incluído no *script* de execução do módulo, seguindo premissas e critérios, baseando – se principalmente, nas Equações 3.21, 3.22, 3.23 e o conjunto 3.26.

$$\dot{I} = Y_{BARRA} x \dot{V} \quad (3.21)$$

$$\dot{S} = \dot{V}_k x \dot{I}_k^* = P_k + jQ_k \rightarrow \dot{I}_k^* = \frac{P_k + jQ_k}{\dot{V}_k} \rightarrow \dot{I}_k = \frac{P_k - jQ_k}{\dot{V}_k} \quad (3.22)$$

$$\dot{S}_k = P_k + jQ_k = \dot{V}_k x \dot{I}_k^* = \dot{V}_k x \left(\sum_{m=1}^n \dot{Y}_{km}^* x \dot{V}_m^* \right), k = 1, n \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned}
P_2 - jQ_2 &= \dot{V}_2^* \times (Y_{21} \times \dot{V}_1 + Y_{22} \times \dot{V}_2 + Y_{23} \times \dot{V}_3), \\
\dot{V}_2 &= \frac{1}{Y_{22}} \times \left(\frac{P_2 + jQ_2}{\dot{V}_2^*} - Y_{21} \times \dot{V}_1 - Y_{23} \times \dot{V}_3 \right), \\
\dot{V}_3 &= \frac{1}{Y_{33}} \times \left(\frac{P_3 + jQ_3}{\dot{V}_3^*} - Y_{31} \times \dot{V}_1 - Y_{32} \times \dot{V}_2 \right)
\end{aligned} \tag{3.26}$$

Há de se ressaltar que, na biblioteca de operações matemáticas para implementação do fluxo de potência, não havia a opção de uso de números complexos. Então, foi necessário criar, no próprio código, uma classe que tivesse a capacidade de ler, operar e converter números complexos nas suas formas polar e cartesiana. A justificativa para o uso do método de *Gauss-Seidel* para cálculo do fluxo de carga se dá por ter menor complexidade e exigir menor memória nas etapas de iterações, se comparados aos métodos mais complexos. Justifica-se seu uso nesse aspecto, pelo simulador não ser somente para cálculo, mas sim de demonstração gráfica, também exigente no aspecto de memória. Em outras palavras, o método *Gauss-Seidel* permitirá que o programa execute suas funções mais levemente. A matriz Y_{barra} que representa o sistema é:

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} -j20,0 & j10,0 & j10,0 \\ j10,0 & -j15,0 & j5,0 \\ j10,0 & j5,0 & -j15,0 \end{bmatrix} \tag{5.1}$$

O termo $P_2 + jQ_2$ presente no sistema de equações refere-se à Potência total na barra, tanto reativa quanto ativa. Ela pode ser decomposta da seguinte forma, para denotar injeção ou consumo das potências ativa e reativa:

$$S_2 = (P_{G2} - P_{L2}) + j(Q_{L2} - Q_{L2}) \tag{5.2}$$

Onde:

S_2 é a potência total na barra 2

P_{G2} é a potência ativa gerada na barra 2

P_{L2} é a potência ativa consumida na barra 2

Q_{G2} é a potência reativa gerada na barra 2

Q_{L2} é a potência reativa consumida na barra 2

Verificando a Figura 66, constata-se que a barra 2 é somente de geração, enquanto a barra 3, é somente de carga. Portanto, as Equações que representam as potências nessas barras são:

$$S_2 = P_{G2} + jQ_{G2} \quad (5.3)$$

$$S_3 = -P_{L3} - jQ_{L3} \quad (5.4)$$

Nesse momento, foi necessário atribuir quais seriam as potências geradas e consumidas no modelo. Para a barra 2, foram novamente tomados, dados técnicos dos aerogeradores do Parque Eólico Alegria. A Tabela 5.6 especifica os dados pertinentes:

Tabela 5.6 - Especificações relativas às potências ativas e reativas do aerogerador modelo Vestas V82-1.65 MW

Fator de Potência - Compensação	
Potência nominal	1650 kW
Tensão nominal	3 x 600 V
Consumo de Potência Reativa na potência ativa nominal	740 kvar

FONTE: VESTAS, 2005

Sendo assim, cada aerogerador tem potência nominal P_{G2} de 1650 kW e reativa Q_{G2} de 740 kvar. Como o módulo de conexão à rede trata do parque como um todo, e este parque, refletido do Alegria, contém 31 aerogeradores, as potências ativas e reativas

injetadas por todas as máquinas conectadas na forma de parque eólico na barra 2 são, respectivamente:

$$S_2 = 51,15MW + j22,94 MVar \quad (5.5)$$

Porém, é neste momento onde são inseridos os recursos de interatividade do simulador: Toda a potência ativa injetada na barra é dependente da velocidade do vento incidente nos aerogeradores do parque. Para tanto, foi disponibilizado na interface, assim como nos módulos 1 e 2, uma barra deslizante, onde, o usuário terá a opção de variar a potência ativa injetada, indiretamente, pelo aumento ou diminuição das velocidades de vento no parque incidentes. As barras deslizantes estão ilustradas no destaque 2, na Figura 5.23. Observa-se que são em duas: uma para a variação da potência ativa, e outra para a inserção de potência reativa, na figura de bancos de capacitores. Os valores são dados em p.u, e a base do sistema é 10 MVA. Portanto, os valores descritos na Equação 5.5 não são fixos, mas sim, variáveis segundo o comando do usuário. Em p.u, são descritos como:

$$S_2 = 5,1 + j2,3 (p.u) \quad (5.6)$$

Para a barra 3, convencionou-se que nela, estariam conectados apenas cargas, ou seja, consumidores de potência ativa e reativa, com valores fixos descritos na Equação 5.7:

$$S_3 = -4,5 - j0,5 (p.u) \quad (5.7)$$

Com os valores definidos, o próximo passo é a execução do fluxo de carga para o cálculo das tensões V_2 e V_3 nas barras 2 e 3 respectivamente, e posterior análise e interpretação dos resultados, descritos de forma numérica (destaque 3 da Figura 5.23) e gráfica (destaque 4 da Figura 5.23). Para cada variação de potência ativa injetada (pela ação do vento, controlado pelo usuário), ou potência reativa injetada (pela ação do banco de capacitores, controlado também pelo usuário), haverão novos valores de tensão em

cada uma das barras. Sobre estas, há de se considerar os critérios de tolerabilidade na conexão à rede, descritos na Tabela 5.7:

Tabela 5.7 - Especificações relativas a conexão à rede do aerogerador modelo Vestas V82-1.65 MW

Requisitos para conexão à rede	
Máxima tensão	+10% (60 segundos)
Mínima tensão	-10% (60 segundos)
Máxima tensão	+12,5% (0,1 segundos)
Mínima tensão	-15% (0,1 segundos)

FONTE: VESTAS, 2005

Nesse aspecto, os gráficos do módulo de conexão a rede apresentam duas linhas que demarcam os limites estabelecidos na Tabela 5.7. Os detalhes do gráfico em questão, são mostrados na Figura 5.24:

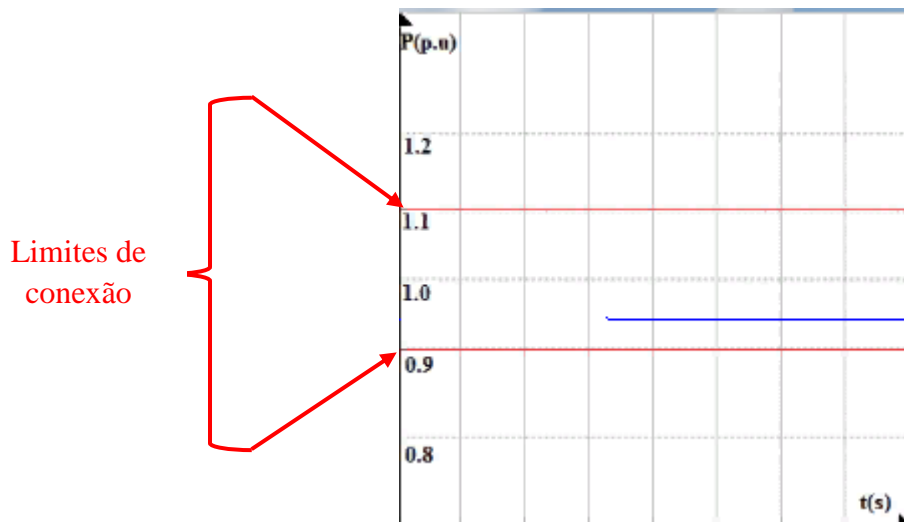


Figura 5.24 - Limites de tensão para conexão à rede

FONTE: Aatoria Própria

Um último recurso do módulo de conexão à rede do SiConErCo, é de adição de um novo parque eólico⁹ no sistema: este irá atuar na barra 3. O sistema com adição de geração na barra é mostrado na Figura 5.25:

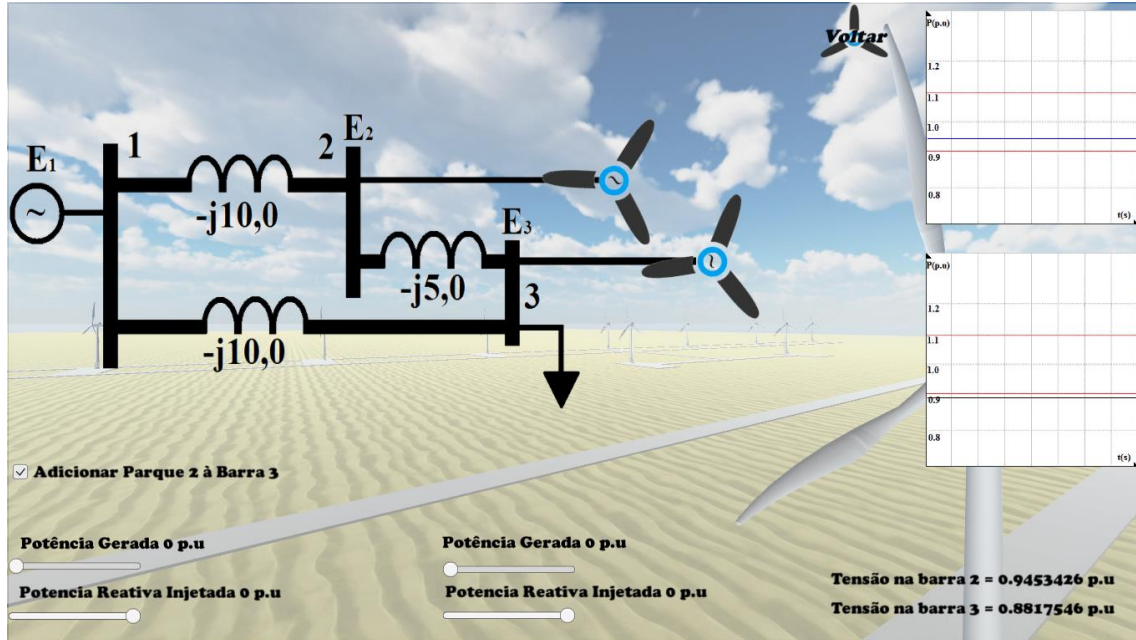


Figura 5.25 - Módulo Conexão à rede do SiConErCo – duas gerações

FONTE: Autoria Própria

A mesma metodologia do novo parque é usada no já existente, ou seja, duas barras rolantes são disponibilizadas para variação das potências ativas e reativas injetadas, sendo, nominalmente descritas na Equação 5.8:

$$S_3 = 4,0 + j0,75 (p.u) \quad (5.8)$$

Dessa forma, a barra 3 apresenta comportamento de geração e consumo, estando, a partir da inserção do novo parque, representada por:

$$S_3 = (P_{G3} - 4,5) + j(Q_{G3} - 0,5) (p.u) \quad (5.9)$$

⁹ Os valores de potência ativa e reativa atribuídos ao novo parque à ser incluído no sistema foram estabelecidos por conveniência, sem embasamento técnico do primeiro, baseado nas máquinas tipo Vestas V82-1.65 MW.

Onde P_{G3} e Q_{G3} são variáveis, a critério do usuário.

CAPÍTULO 6

SIMULAÇÕES

Este capítulo trará, na forma de simulações propostas em cada módulo do SiConErCo, os resultados e discussões da pesquisa e modelagem da ferramenta que objetivou trazer de forma interativa e didática, assuntos correlatos à atividades de geração eólica, controle de potência e conexão à rede em um aerogerador, com foco na exploração dos recursos oferecidos pelo *Unity 3D* em consonância com toda a teoria envolvida e abordada no trabalho.

Na forma de subseções referentes à cada módulo, o Capítulo 6 está dividido em 5 partes, sendo elas, respectivamente: Controle de Passo, Controle de Estol Ativo, Produção de Energia, Parque Eólico e Conexão à rede, como mostrado na tela de apresentação do SiConErCo, ilustrada na Figura 6.1:



Figura 286.1- SiConErCo – Tela de Apresentação

FONTE: Aatoria Própria

Ainda na tela de apresentação, há, no canto inferior esquerdo, um botão de informações, onde o usuário é redirecionado à um conjunto de telas, contendo uma descrição resumida de cada um dos módulos. As telas são alternáveis ao toque dos botões localizados na linha mediana, laterais extremas, conforme visto na Figura 6.2.



Figura 6.2 - SiConErCo – Informações

FONTE: Aatoria Própria

6.1 Controle de Passo – Simulações

Esta sessão é destinada a apresentar na forma de todos os recursos disponíveis, as simulações relativas ao controle de potência, utilizando a estratégia de passo (*pitch*) nos aerogeradores do parque eólico. Para isso, será ativado o módulo Controle de Passo, na tela de apresentação.

A Figura 6.3 mostra o simulador em execução com variação de velocidade do vento em etapas posteriormente descritas. A Figura 6.4 é um corte dos 3 gráficos (passo em preto (a), velocidade do vento em vermelho (b), potência em azul (c)) para análise separada do comportamento do aerogerador e correlação entre eles.

A simulação compreende um curto espaço de tempo, mas é possível realizar algumas observações pertinentes:

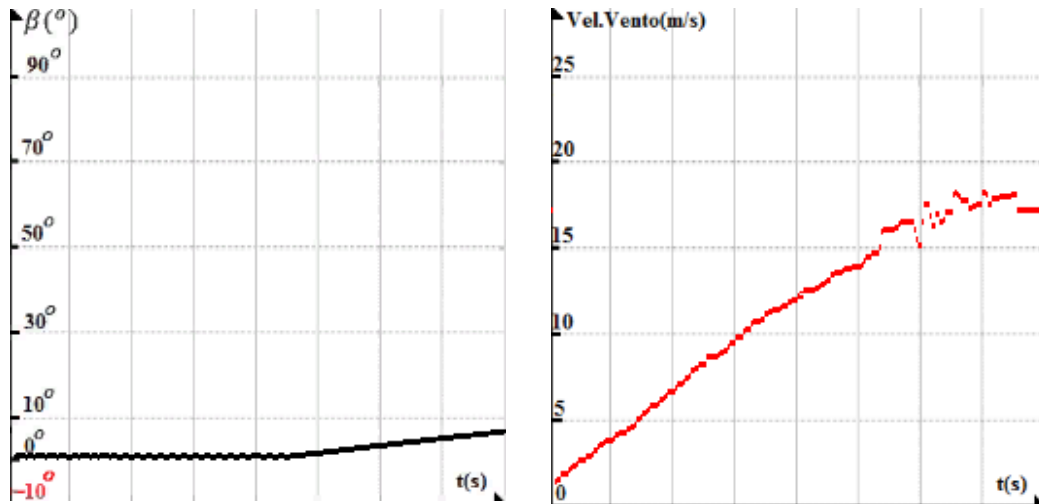
- Durante o início da simulação, percebe-se que a potência só é produzida a partir da velocidade de vento 3,5 m/s. Antes disso, permanece zerada; nula também é a movimentação do passo;
- Em um segundo momento, quando a velocidade do vento aumenta, percebe-se também o aumento da potência, porém, de forma exponencial cúbica, como a Equação (2.13) e as Figuras 2.11 e 3.9, já adiantaram;



Figura 6.3 - Simulação de Controle de Passo

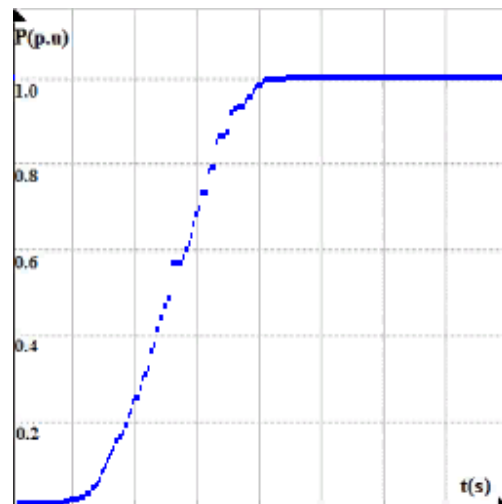
FONTE: Autoria Própria

- A partir do momento em que os sensores detectam a velocidade de 13 m/s, o controle de potência atua: percebe-se, no gráfico presente em 6.3 (c), que a potência não sofre alterações, embora isso aconteça com a velocidade do vento (6.3 (b)). Há também a alteração do ângulo de passo, no sentido positivo, crescente, com objetivo de reduzir as forças de sustentação na pá, e por consequência, também o torque mecânico enviado ao gerador, para geração de energia elétrica.
- Destaca-se, em 6.3 (b), depois de ultrapassada a velocidade de 15 m/s do vento, é realizada, propositalmente, uma série de variações, simulando uma turbulência, ou propriamente, refletindo a comum alternância de velocidades que o vento apresenta. Para estes valores, acima de 15 m/s, também de 13 m/s portanto, o controle atua de forma a tornar constante a geração à potência nominal, o que de fato é evidenciado, no mesmo intervalo, em 6.3 (c).



(a)

(b)



(c)

Figura 6.4 - Gráficos no momento da simulação do controle de passo: (a) Gráfico de ângulo de passo β ; (b) Gráfico de velocidade do vento; (c) Gráfico de Potência gerada

FONTE: Autorial Própria

- Em um outro momento da simulação, eleva-se a velocidade do vento até que esta provoque a atuação do controle de passo, enviando o comando de giro das pás em torno de seu eixo, à um valor de 16° . Na situação, vista na Figura 6.5, é perceptível a alteração da angulação da pá, em relação à referência, tomada quando o aerogerador está parado.

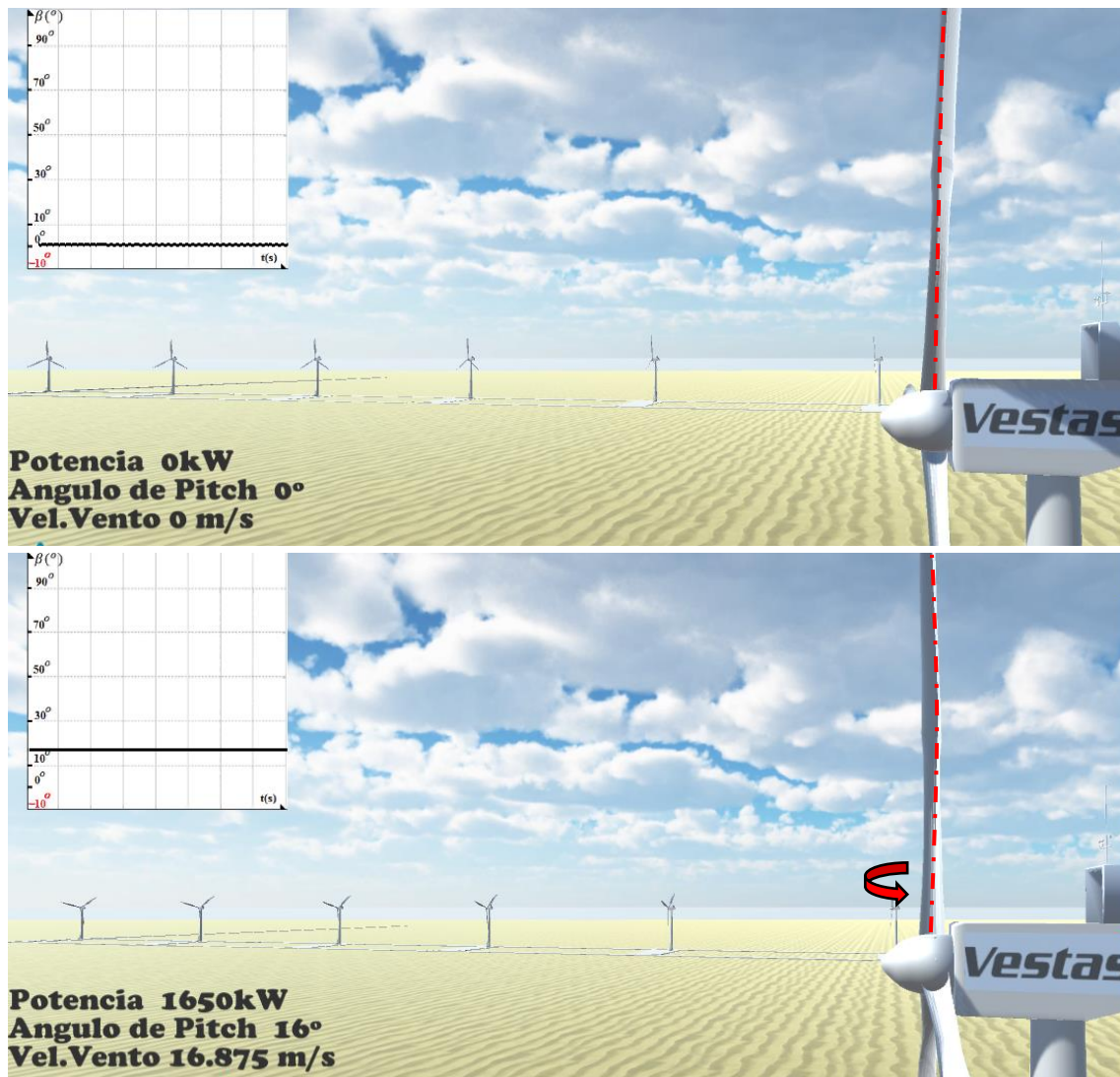
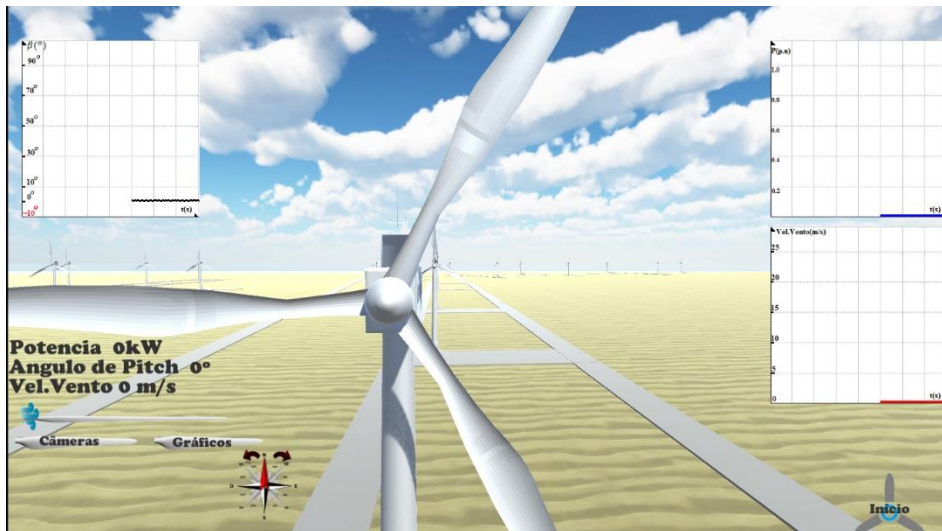


Figura 6.5 - Alteração do ângulo de passo β , perceptível na análise individual das pás do aerogerador

FONTE: Aatoria Própria

Para tornar melhor a visualização da mudança de ângulo de passo, foi simulada a situação de freio aerodinâmico, ou embandeiramento (ver seção 3.2), ou seja, quando o vento ultrapassa 20 m/s, e as pás se inclinam 90°, cujos critérios para tal são estabelecidos na Tabela 5.3. A Figura 6.6 ilustra, de forma gradativa, a ação do controle de passo quando a velocidade do vento ultrapassa os 20 m/s, havendo também, o desligamento da máquina da rede, configurando potência zero.



(a)



(b)

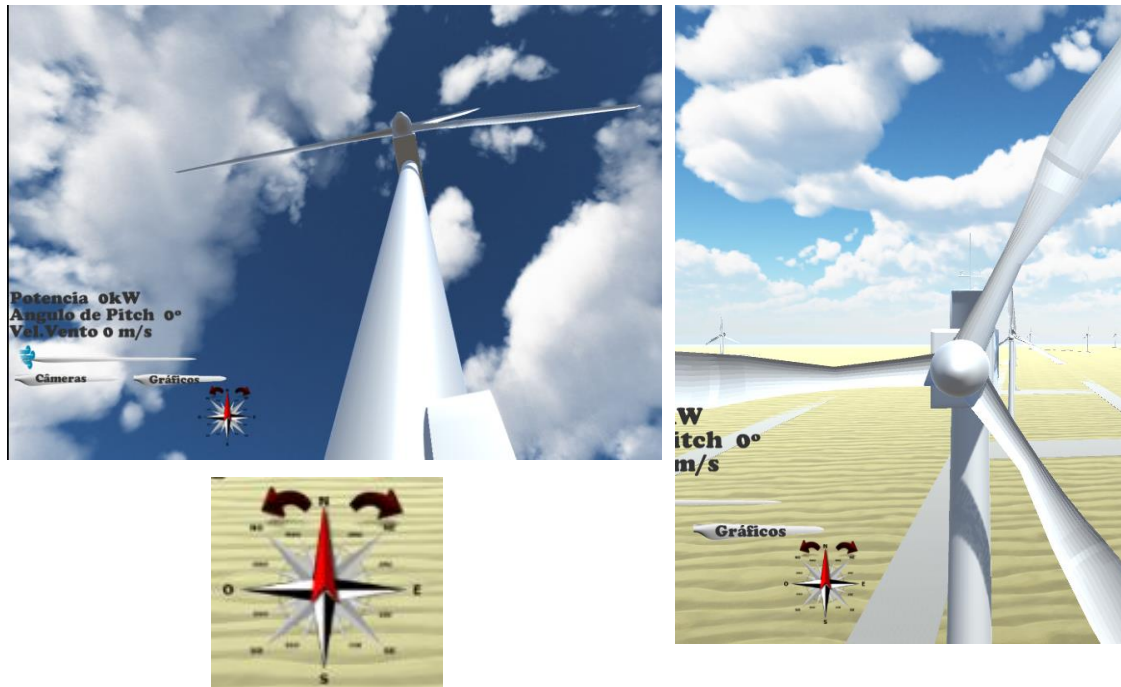


(c)

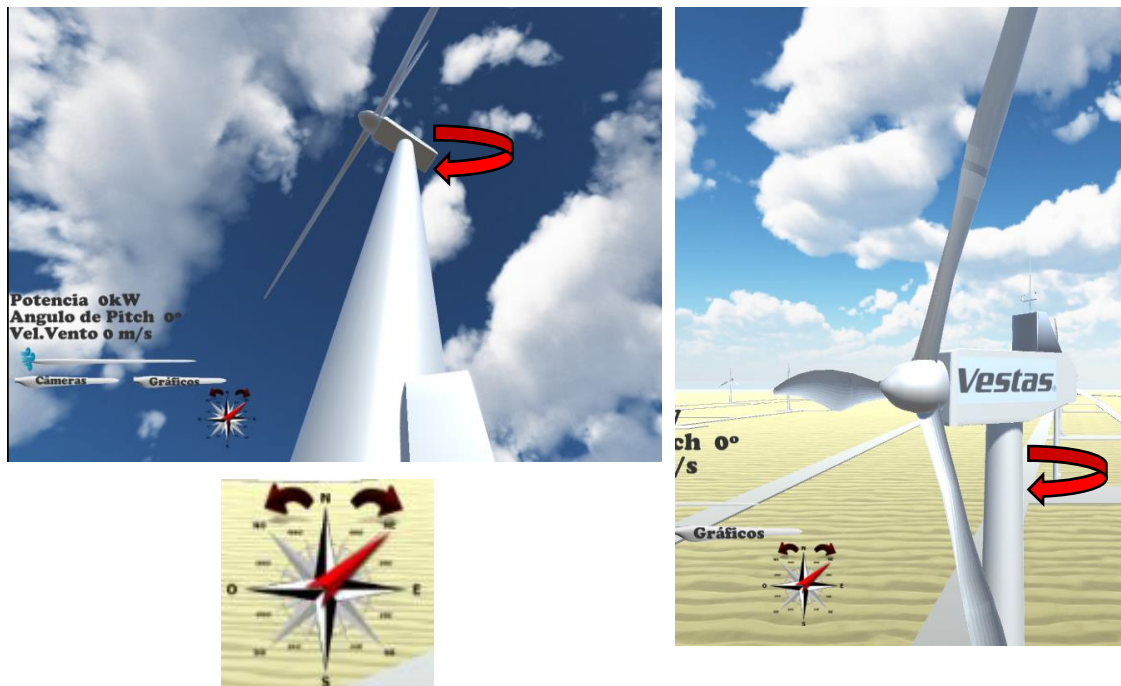
Figura 6.6 - Freio dinâmico do aerogerador

FONTE: Autoria Própria

Uma outra simulação pertinente no módulo controle de passo do SiConErCo, é o controle de guinada (*yaw*), mostrado na Figura 6.7:



(a)



(b)

Figura 6.7 - Controle de guinada (*yaw*)

FONTE: Aatoria Própria

Na Figura 6.7, é mostrada, sob duas opções de câmeras, as perspectivas da situação do aerogerador na posição inicial, com direção de vento incidente indicado na rosa dos ventos de 6.7 (a). Quando alterada, a rosa dos ventos serve atua como o sensor que indica a mudança de direção do vento, enviando prontamente o comando para rotação da nacelle para posição adequada, como visto em 6.7 (b).

Portanto, na simulação de controle de passo, foi mostrado, de forma gráfica, numérica e física, todas as alterações decorrentes da mudança de velocidade de vento, objetivando transmitir o conhecimento relativo às formas de controle de passo e guinada presentes na tecnologia de geração de energia eólica.

6.2 Controle de Estol (*Stall*) – Simulações

Para as simulações descritas nesta sessão, fez-se necessário o acesso ao módulo Controle *Stall* Ativo do SiConErCo. Lá, será possível simular e conhecer a ação de controle que tem como princípio o estol ativo das pás do aerogerador.

De início, foi realizada a mesma simulação proposta para o controle de passo, ou seja, aumento gradativo da velocidade do vento até alcance da velocidade nominal e consequente atuação do sistema de controle de potência. Os comentários referentes ao intervalo de velocidade de 0 a 13 m/s do vento são os mesmos da simulação da seção anterior. A Figura 6.8 mostra a execução da simulação, e a Figura 6.9, os gráficos de potência, ângulo de passo e velocidade do vento, em detalhe. As observações subsequentes são listadas a seguir:

- Constatando a velocidade de 13 m/s, o controle de potência atua: percebe-se que a potência gerada não sofre alterações, embora isso aconteça com a velocidade do vento. Há também a alteração do ângulo de passo, no sentido negativo, forçando as pás do aerogerador entrarem na condição de estol (seção 3.5.2), perdendo sua sustentação e transmitindo menos torque para a geração de potência, mantendo as forças constantes.

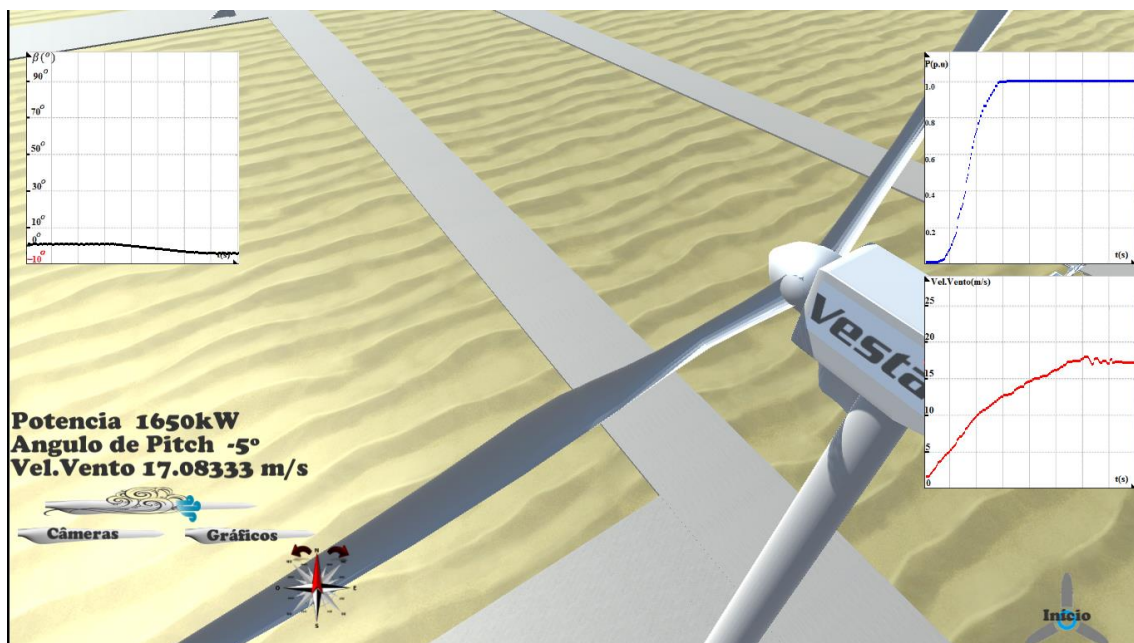
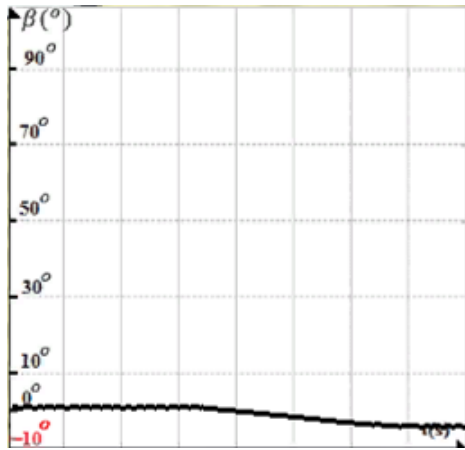


Figura 6.829 - Simulação de Controle de Estol Ativo

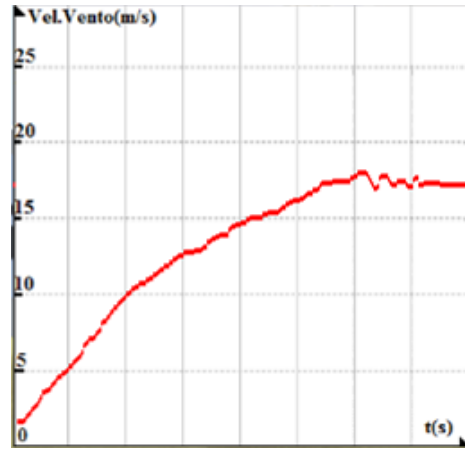
FONTE: Autoria Própria

- A alteração do ângulo de passo, nesta estratégia de controle, é negativa, ao contrário da vista na sessão anterior. A Figura 6.9 (a) ilustra essa variação, decrescente. Há de se destacar também, um aspecto quantitativo em referência à comparação dos controles de estol ativo e passo: para velocidades de vento incidentes semelhantes, o primeiro executa comando de giro das pás com menores angulações do que o segundo. Basta comparar¹⁰ as Figuras 6.5 (passo) e 6.8 (Estol Ativo): a primeira, girando 16° sua pá, enquanto a segunda, -5°, ou seja, um menor valor. A seção 3.5.3 detalha as razões dessa diferença;
- O controle de guinada (*yaw*) é possível de ser visualizado também neste módulo, tal qual o anterior.

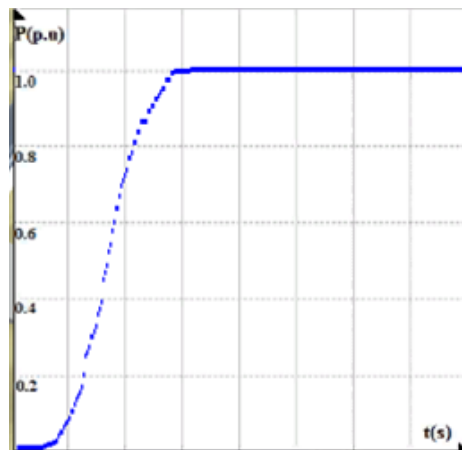
¹⁰ O senso comum induziria uma comparação entre as Figuras 71 e 76, ao invés da proposta 73 e 76. A explicação é que, como descritos na Tabela 8, a variação de ângulo de passo ocorre 1° a cada segundo. Ou seja, embora a Figura 71 exprima, para uma velocidade de 17 m/s – 6° de variação de passo, na verdade, o processo estava em andamento. Se mantida aquela velocidade, a pá iria se estabelecer nos 16°. Por isso, a comparação é feita com a Figura 73 que está com passo estabilizado para aquela velocidade.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.930 - Gráficos no momento da simulação do controle de estol ativo: (a) Gráfico de ângulo de passo β ; (b) Gráfico de velocidade do vento; (c) Gráfico de Potência gerada

FONTE: Autoria Própria

- Ainda no contexto da variação de ângulo de passo no controle de estol ativo, é realizado um comparativo, tal qual o feito na sessão anterior, objetivando estabelecer visualmente, a diferença da rotação transversal das pás em relação ao seu eixo, conforme mostrado na Figura 6.10. Observa-se, como já adiantado pela interface numérica, uma sutil variação, quase que imperceptível, se considerado o fato de as 3 pás estarem efetuando o movimento de rotação em torno do eixo principal. Portanto, nesse módulo, a visualização da variação de passo física, é comprometida.

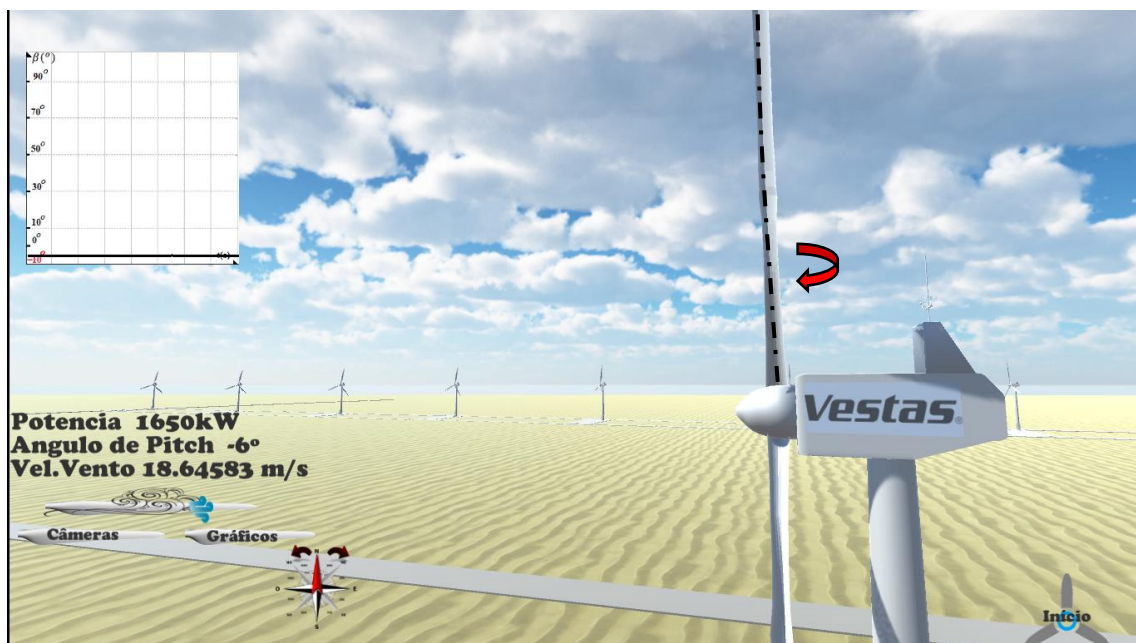
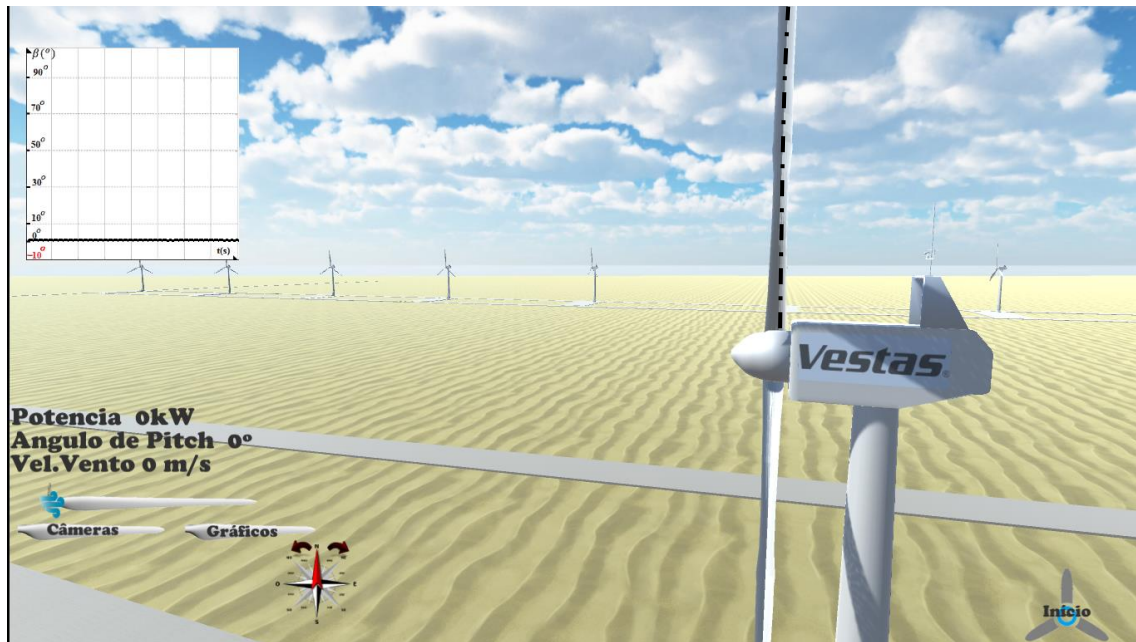


Figura 6.10 - Alteração do ângulo de passo β , quase imperceptível na análise individual das pás do aerogerador

FONTE: A autoria Própria

Destaca-se assim, o controle de estol ativo como uma variação do controle de passo descrito na sessão anterior, com mudança no sentido de giro individual das pás em torno de seus respectivos eixos. Na simulação, a visualização desta alteração física na rotação é quase imperceptível.

6.3 Produção de Energia – Simulações

Os objetivos e instruções referentes ao módulo Produção de Energia do SiConErCo, estão descritos na sessão 5.3. Cabe à esta sessão, explorar suas funcionalidades através de simulações, cujos critérios e dados iniciais são fornecidos a seguir:

- Antes de iniciar qualquer execução no programa, é necessário conseguir os parâmetros de forma e escala (k e c). Estes, como já explanado, variam com a localidade escolhida e é coletada junto à sessão do Atlas Eólico Brasileiro, no site do Cresesb;
- Serão escolhidas duas localidades distintas, tomando em consideração o potencial eólico de cada uma. O primeiro local, será o município de Tibau, localizado no litoral norte do Rio Grande do Norte, aproximadamente 3700 habitantes, de coordenadas geográficas especificadas em: **Latitude: -4.83519, Longitude: -37.2666 ou 4° 50' 7" Sul, 37° 15' 60" Oeste** (DB-CITY, 2017). A propósito, em Tibau, estão sendo construídos os parques Famosa I, com potência instalada prevista de 22.500 kW; e Rosada, com 30.000 kW (Aneel, 2016). O segundo local, é Mossoró, cidade não litorânea, também do Rio Grande do Norte, com aproximados 260.000 habitantes, com coordenadas geográficas especificadas em: **Latitude: -5.18804, Longitude: -37.3441 ou 5° 11' 17" Sul, 37° 20' 39" Oeste** (DB-CITY, 2017).
- Escolhidas as cidades parâmetros para a simulação e posterior comparação, com a ajuda do *website* do Cresesb, e as coordenadas geográficas de cada local, foi possível obter os parâmetros de forma e escala. Os dados são mostrados nas Tabelas 6.1 e 6.2.
- Percebe-se que, nas Tabelas, para cada grandeza (velocidade do vento, c, k e densidade de potência), são fornecidos valores trimestrais bem definidos, além de um valor anual. Para as simulações referidas nesta sessão, serão tomados os valores c e k anuais de cada lugar. Porém, torna-se um exercício interessante, a comparação entre os valores de energia elétrica gerada e fator de carga com base nos dados trimestrais, utilizando o SiConErCo.

Tabela 6.13 - Dados Eólicos de Tibau - RN

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro		Dados de vento a 50 m de altura				
Grandeza	Unidade	Dez – Fev	Mar – Mai	Jun – Ago	Set – Nov	Anual
Velocidade média do vento	m/s	6,94	5,08	6,64	8,34	6,75
Fator c	-	7,78	5,74	7,37	9,33	7,6
Fator k	-	2,95	2,26	3,55	3,06	2,63
Densidade de Potência	W/m ²	290	137	232	494	288

FONTE: CRESESB, 2017

Tabela 6.2 - Dados Eólicos de Mossoró - RN

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro		Dados de vento a 50 m de altura				
Grandeza	Unidade	Dez – Fev	Mar – Mai	Jun – Ago	Set – Nov	Anual
Velocidade média do vento	m/s	4,95	3,5	4,32	5,81	4,65
Fator c	-	5,58	3,95	4,84	6,54	5,25
Fator k	-	2,51	2,09	2,98	2,58	2,31
Densidade de Potência	W/m ²	117	48	70	185	105

FONTE: CRESESB, 2017

Assim, são coletados os seguintes dados, para inserção no módulo Produção de Energia do simulador:

- Tibau: $c = 7,6$; $k = 2,63$
- Mossoró: $c = 5,25$; $k = 2,31$

Finalmente, os dados são inseridos no SiConErCo. Abaixo, as Figuras 6.11, 6.12 e 6.13 referem-se à simulação dos dados coletados de Tibau, para 3 modelos de aerogeradores diferentes. O mesmo acontece nas Figuras 6.14, 6.15 e 6.16, porém, com os dados de Mossoró.



Figura 6.11 - Simulação de Produção de Energia em Tibau-RN com aerogerador modelo Vestas.

Fonte: Aatoria Própria

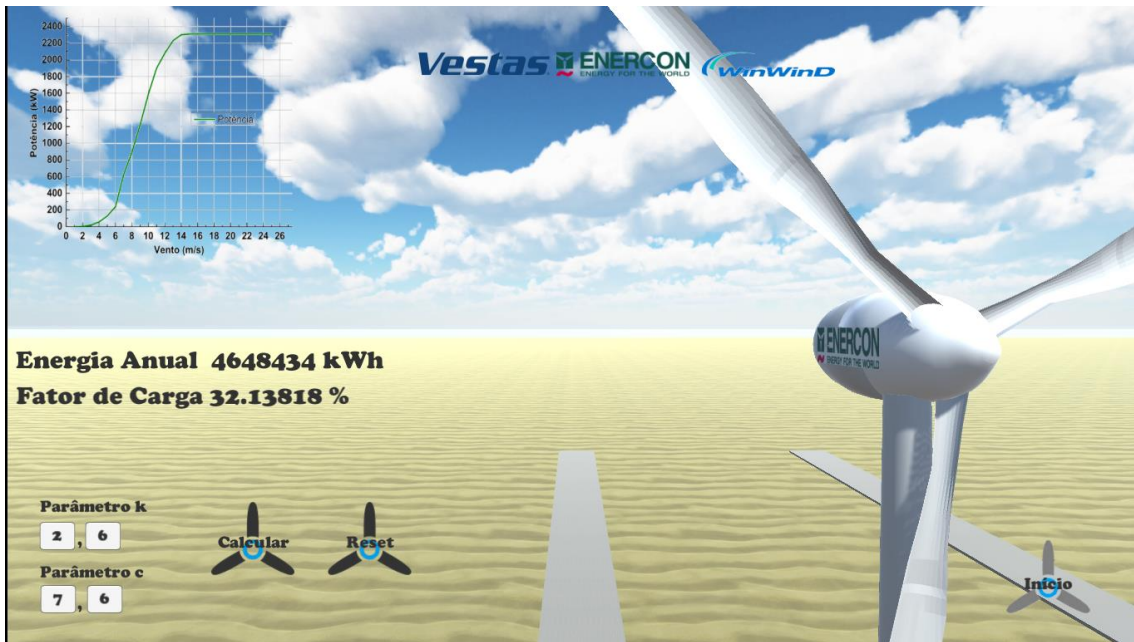


Figura 31 - Simulação de Produção de Energia em Tibau-RN com aerogerador modelo Enercon.

Fonte: Autoria Própria



Figura 6.13 - Simulação de Produção de Energia em Tibau-RN com aerogerador modelo WinWind.

Fonte: Autoria Própria

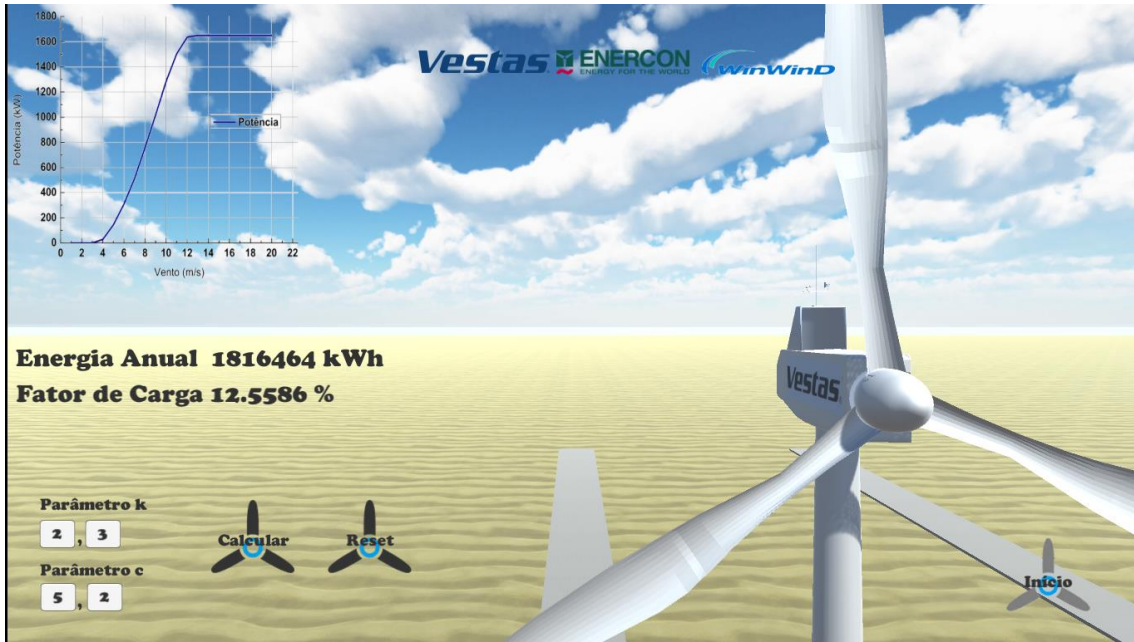


Figura 6.14 - Simulação de Produção de Energia em Mossoró-RN com aerogerador modelo Vestas.

Fonte: Autoria Própria



Figura 6.15 - Simulação de Produção de Energia em Mossoró-RN com aerogerador modelo Enercon.

Fonte: Autoria Própria









Figura 6.16 - Simulação de Produção de Energia em Mossoró-RN com aerogerador modelo Enercon.

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 6.3 traz um resumo comparativo entre as duas cidades tomadas como exemplo nas simulações executadas:

Tabela 6.3 - Quadro comparativo: Valores de Energia anual e Fator de carga para as cidades de Tibau e Mossoró

	Mossoró			Tibau		
						
Energia Anual Gerada (kWh)	1.816.464	1.608.880	2.472.156	4.911.600	4.648.434	7.049.000
Fator de Carga (Fc)	12,55%	11,12%	17,09%	33,96 %	32,14%	48.73%

FONTE: Autoria Própria

Ao ver os resultados dispostos na Tabela 6.3, é possível concluir, em termos de viabilidade, qual a melhor localidade para a implantação de aerogeradores para geração, em função de energia elétrica gerada durante o ano e o fator de carga. É necessário lembrar que, embora o módulo Produção de Energia trabalhe com os cálculos que exprimem os resultados acima citados, estes são estimativas baseadas nas informações de parâmetros locais e calculadas pelas Equações 2.14 e 2.15, trabalhadas na seção 2.7, mas que a análise completa envolve mais variáveis e situações.

$$\begin{aligned}
 EAG &= \sum [f(v)P(v)] \times 365 \text{ dias} \times 24 \text{ horas} \\
 &= \sum [f(v)P(v)] \times 8760 \text{ (kWh) (kWh)}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

$$F_c = \frac{(EAG)}{8760 \times P_n}
 \tag{2.15}$$

6.4 Parque Eólico – Simulações

As ações dentro do módulo Parque Eólico do SiConErCo objetivam uma visão geral do ambiente, tomando o conjunto de aerogeradores como as principais variáveis do sistema, não somente um deles, como os módulos anteriores. Para tanto, serão propostas duas simulações para este tópico: a primeira, irá trabalhar a capacidade de geração total do parque, junto com o controle de potência e sua performance mediante a variação da velocidade do vento; a segunda, será sobre o controle de guinada, dessa vez, com destaque à movimentação de todos os aerogeradores do parque e sua aptidão em se posicionar frente à incidência do vento, elevando seu rendimento.

Para início da primeira simulação, foi necessário estipular dois valores para representarem os intervalos inferior e superior da velocidade de vento. Lembra-se que, o simulador irá trabalhar com valores aleatórios entre os máximos e mínimos, em um curto espaço de tempo. Os valores escolhidos foram 13 e 19 m/s como sendo o menor e o maior valor, respectivamente. A simulação é ilustrada na Figura 6.17:

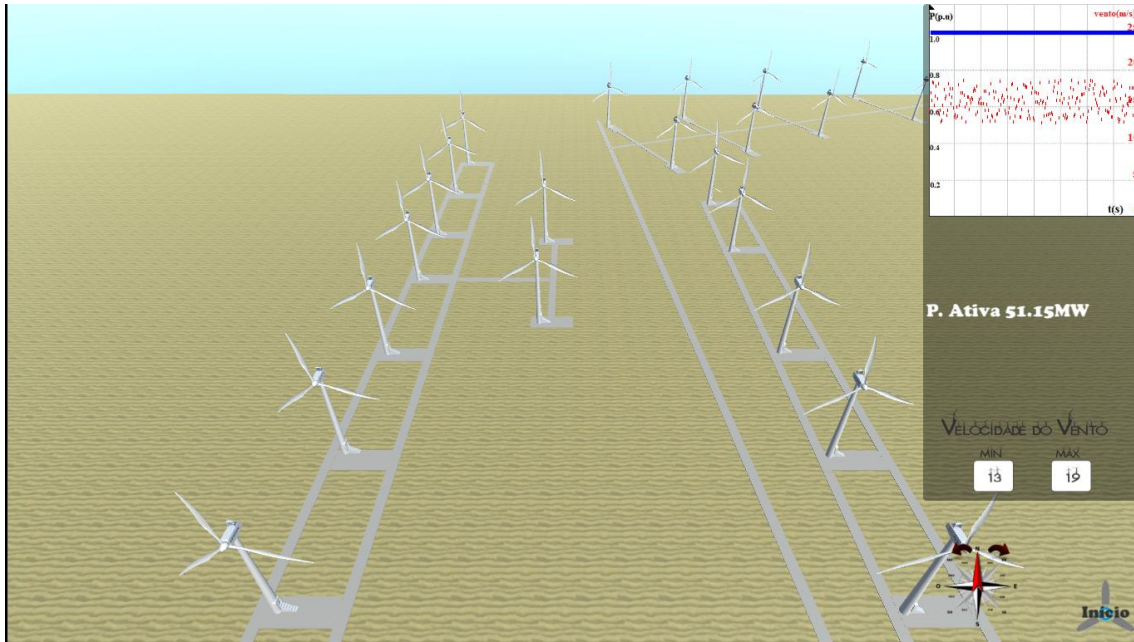


Figura 6.17 - Simulação no módulo Parque Eólico para as velocidades 13 e 19 m/s

Fonte: Autoria Própria

A escolha dos valores de 13 e 19 m/s tiveram um propósito: explorar e demonstrar a capacidade de controle de potência dos aerogeradores mediante as rápidas e constantes variações de velocidade de vento. Para melhor análise, a Figura 6.18 destaca o gráfico resultante:

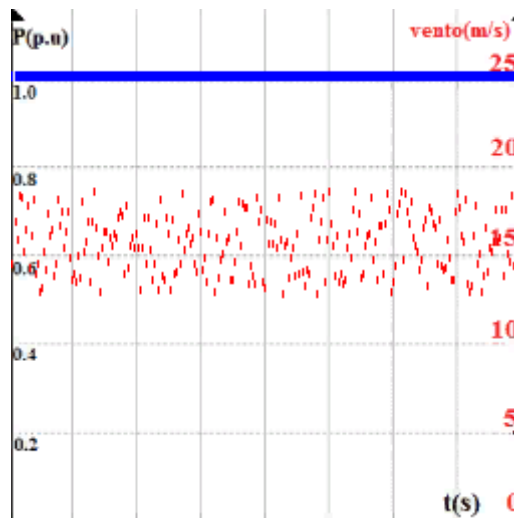


Figura 6.18 - Gráfico da simulação no módulo Parque Eólico para as velocidades 13 e 19 m/s

Fonte: Autoria Própria

Das sessões anteriores, foi visto que, para o aerogerador em questão, a velocidade nominal é de 13 m/s. Acima disto, o controle de potência atual, reduzindo as forças de sustentação nas pás, e transmitindo menor torque ao eixo de geração, objetivando assim, manter o valor de potência nominal constante. De fato, é o que se observa no gráfico da Figura 6.18: em vermelho, os pontos refletindo as variações de velocidade do vento, no intervalo dado; em azul, a estática linha que representa a potência nominal alcançada pelo sistema. No texto, abaixo do gráfico, na Figura 6.17, a representação numérica da potência total gerada pelos aerogeradores.

Na segunda simulação, foi proposta a mudança de direção do vento, mediante a alteração da posição do ponteiro vermelho da rosa dos ventos, disponível também neste módulo. A Figura 6.19 ilustra a diferença do posicionamento das naceles quando da alteração da rosa dos ventos. Para efeito de comparação, pode ser verificada a situação dos aerogeradores na Figura 6.17.

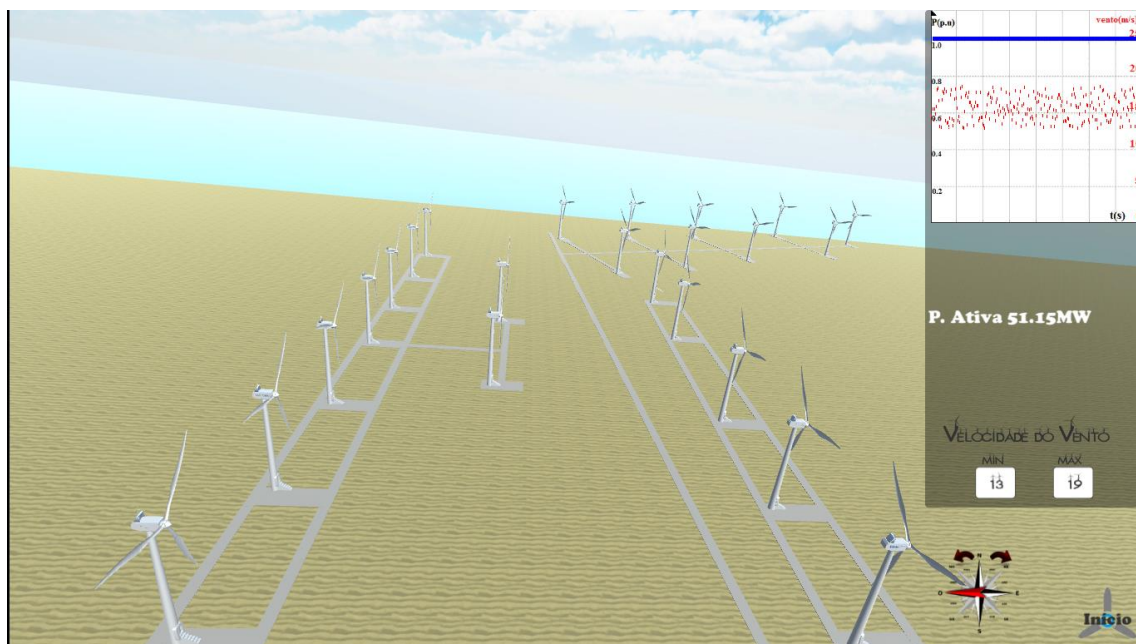


Figura 6.19 - Controle de guinada no módulo Parque Eólico

Fonte: Autoria Própria

6.5 Conexão à rede – Simulações

Para a execução da simulação no módulo Conexão à rede do SiConErCo, há de se conhecer as variáveis a serem controladas pelo usuário, que são: potência ativa injetada

na barra, pela movimentação da barra de rolagem, simulando também o aumento ou decréscimo da velocidade do vento, por consequência; e a entrada de potência reativa injetada na mesma barra, na forma de banco de capacitores que compensem o reativo indutivo dos aerogeradores. Assim, outros parâmetros do sistema, como as impedâncias do sistema, são constantes para todos os casos.

São propostas simulações no intuito de aferir mudanças e encaixe nos parâmetros de conexão estabelecidos pela máquina (ver Tabela 5.7). Para tanto, os passos seguirão pré-estabelecidos para cada caso, tendo como objetivo a avaliação das tensões nas barras E_1 e E_2 nos seguintes casos:

- Injeção máxima de potência ativa na barra 1 sem compensação reativa;
- Injeção máxima de potência ativa na barra 1 com compensação reativa máxima;
- Injeção máxima de potência ativa nas barras 1 e 2 sem compensação reativa;
- Injeção máxima de potência ativa nas barras 1 e 2 com compensação reativa em ambas;

A primeira simulação é mostrada na Figura 6.20:

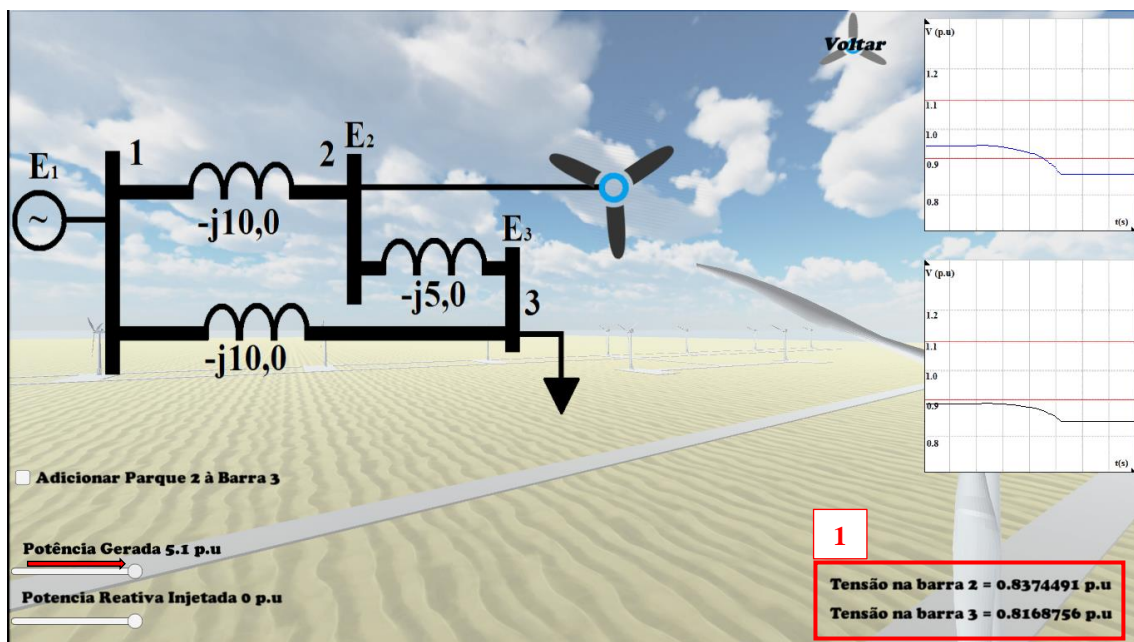


Figura 6.20 - Simulação 1 do módulo Conexão à rede: P máximo; Q_c mínimo

Fonte: Autorial Própria

Nesta simulação, foi injetada na barra E₂ a máxima potência possível, ou seja, os 51,15 MW resultantes da contribuição dos 31 aerogeradores de 1650 kW cada. Os valores numéricos de tensão em ambas as barras são representados no destaque 1 da Figura 6.20. A Figura 6.21 traz os gráficos de variação de tensão nas barras E₁ e E₂, para melhor análise:

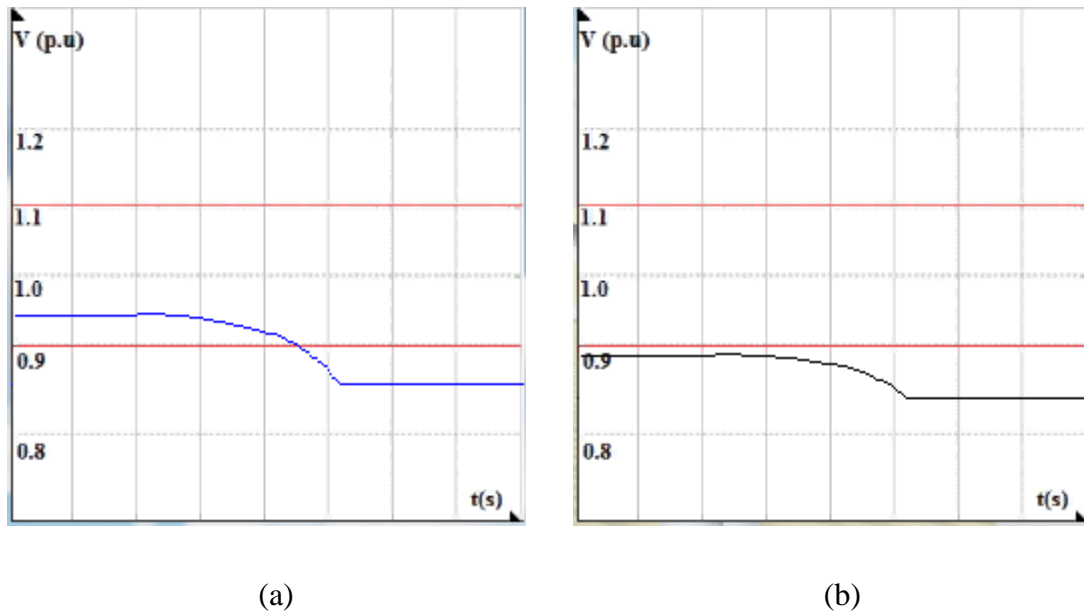


Figura 6.2132 - (a) Variação de tensão na barra E₂; (b) Variação de tensão na barra E₃

Fonte: Autoria Própria

Com a adição de potência reativa advinda da geração do parque eólico conectado na mesma, percebe-se um decréscimo da tensão em ambas as barras, estando elas abaixo do limite permitido, que é de -10%. Portanto, será necessária a compensação reativa pela inserção de bancos de capacitores. Esta ação é evidenciada na segunda simulação, quando da injeção de reativo capacitivo, mostrado na Figura 6.22.

Da mesma forma da simulação anterior, serão destacados os gráficos, expostos na Figura 6.23. Neles, percebe-se um aumento do nível de tensão em ambas as barras, adentrando assim, no limite de tolerância aceitável da conexão.

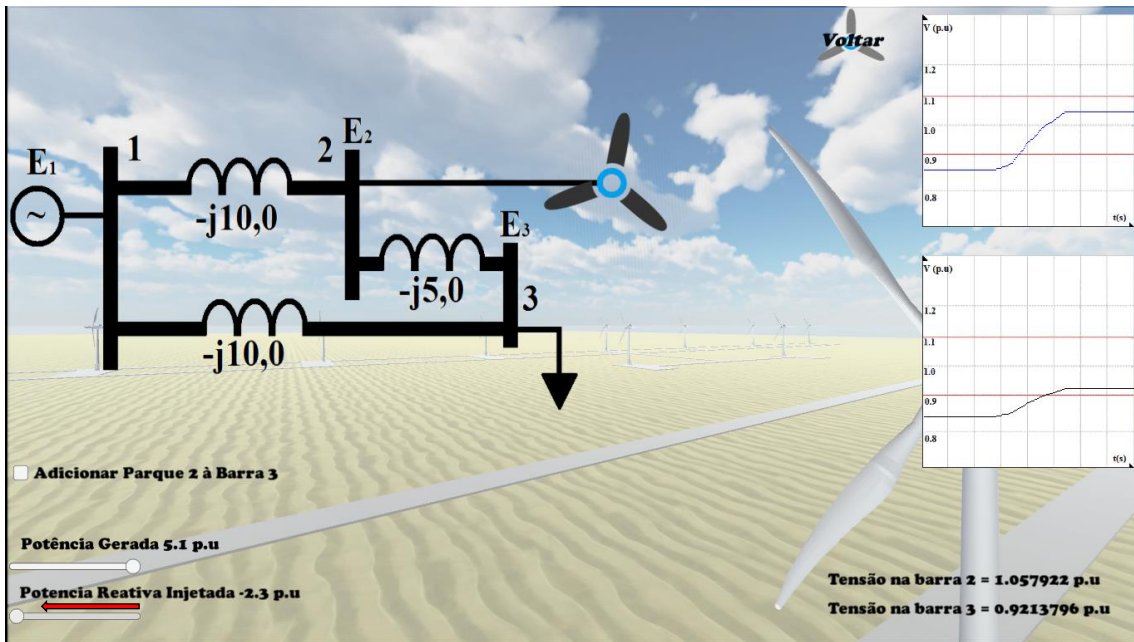


Figura 6.22 - Simulação 2 do módulo Conexão à rede: P máximo; Q_c máximo

Fonte: Autoria Própria

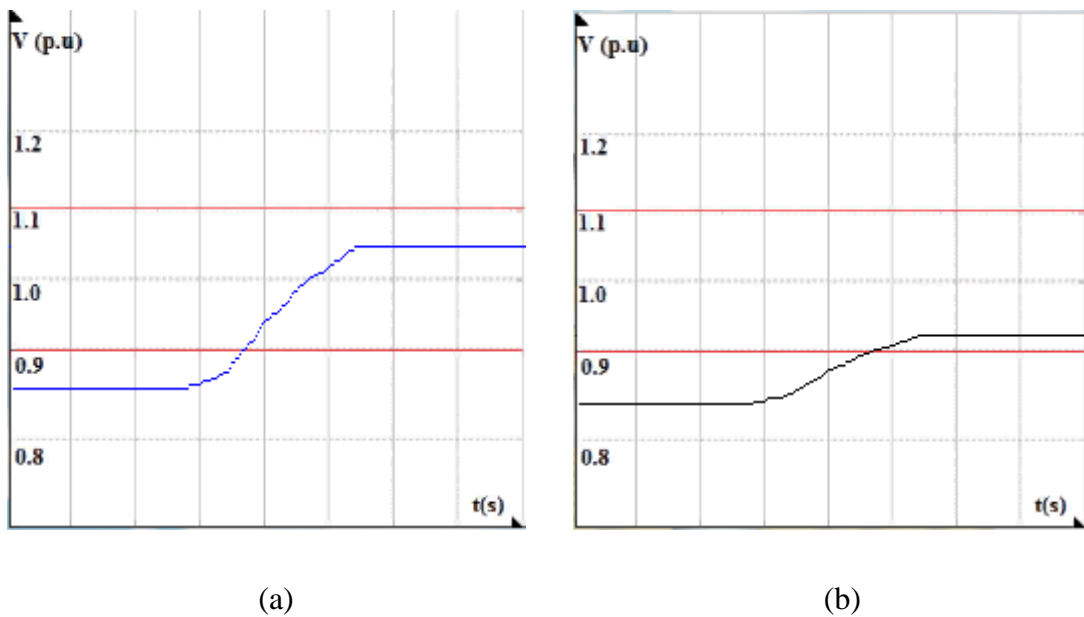


Figura 6.23 - (a) Variação de tensão na barra E2; (b) Variação de tensão na barra E3

Fonte: Autoria Própria

Na terceira simulação, haverá a entrada de outro parque eólico na barra E_3 , antes vista no sistema apenas como consumidora de potência, agora, com injeção de potência ativa e reativa advinda do conjunto de máquinas nela conectados. Nessa etapa, a simulação será configurada pela injeção de potência ativa de ambos os parques, porém apenas no primeiro, haverá compensação reativa. A simulação é mostrada na Figura 6.24.

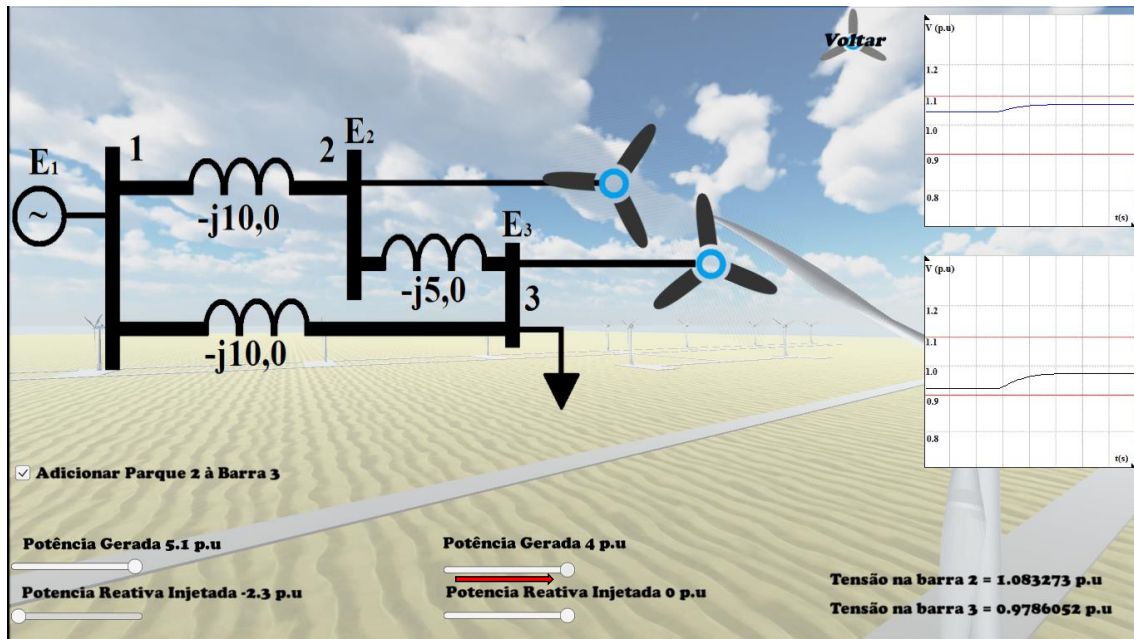
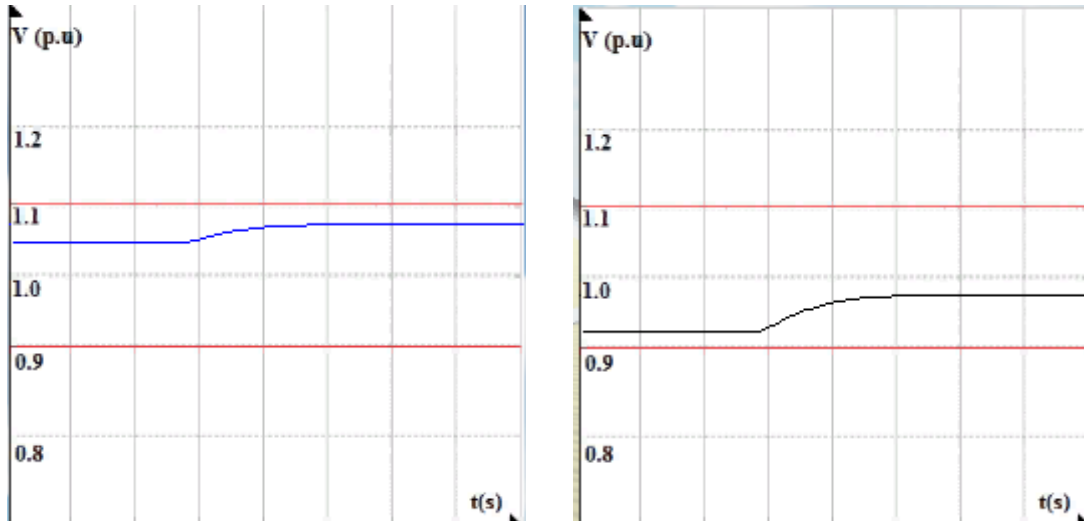


Figura 6.24 - Simulação 3 do módulo Conexão à rede: dois parques conectados ao sistema, com P_1 e Q_{c1} máximos e P_2 máximo e Q_{c2} mínimos

Fonte: Autoria Própria

Na Figura 6.24, é adicionada a representação gráfica da geração do parque, tal qual é feita no parque 1. A tensão nas barras é mantida nos limites de tolerabilidade previamente estabelecidos, com aumento e proximidade à unidade na barra E_3 e se aproximando do limite superior na barra E_2 . A Figura 6.25 trata detalhadamente os gráficos da Simulação 3.



(a)

(b)

Figura 6.25 - (a) Variação de tensão na barra E2; (b) Variação de tensão na barra E3

Fonte: Autoria Própria

Na última simulação, são colocadas as situações onde haverá injeção máxima nas barras de potência ativa (geração dos aerogeradores) e potência reativa (compensação dos bancos de capacitores), ilustrada na Figura 6.26:

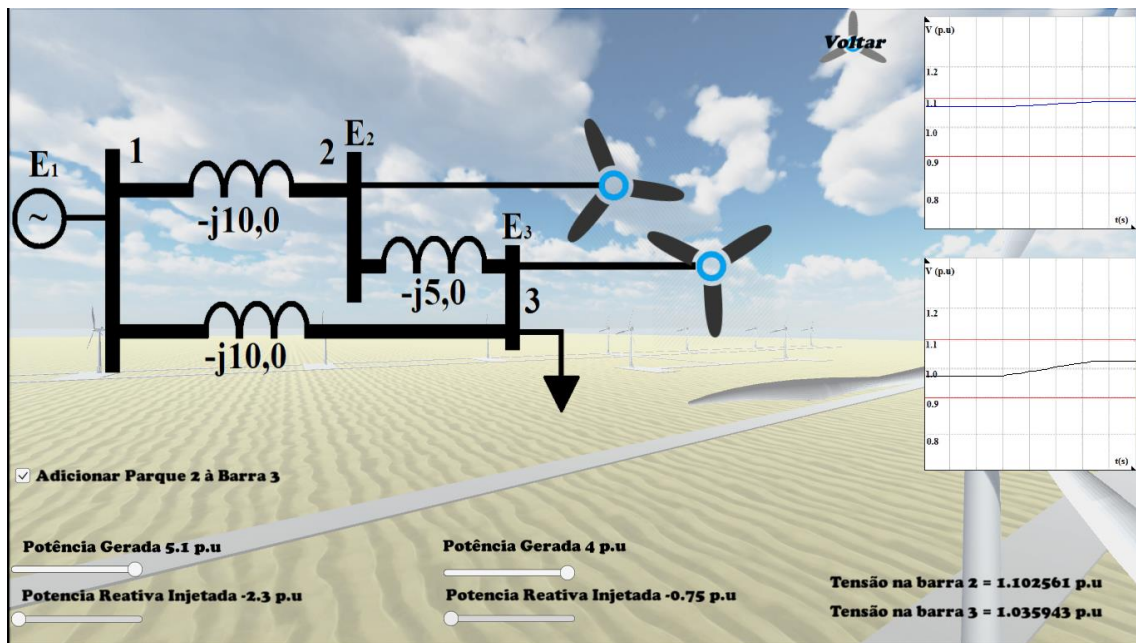


Figura 6.26 - Simulação 4 do módulo Conexão à rede: dois parques conectados ao sistema, com P_1 e Q_{c1} máximos e P_2 e Q_{c2} máximos

Fonte: Autoria própria

Os níveis de tensão em ambas as barras são elevados, mas ainda sob os limites de tolerância. A tensão na barra E₃ superou a unidade, enquanto a tensão na barra E₂ se aproximou mais do limite superior, embora não tenha o ultrapassado, como mostra a Figura 6.26:

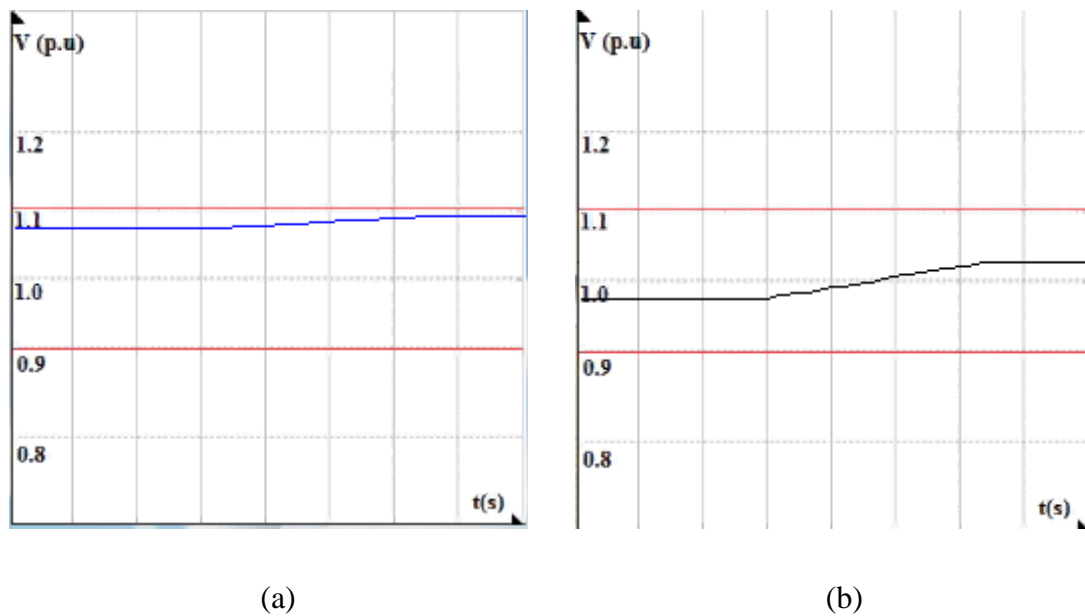


Figura 6.27 - (a) Variação de tensão na barra E₂; (b) Variação de tensão na barra E₃

Fonte: Autoria Própria

As simulações aqui apresentadas tiveram como critérios as variações máximas de potência reativa e reativas e seus respectivos impactos na tensão nas barras. Um exercício interessante para o usuário do módulo Conexão à rede do SiConErCo, é buscar, através da variação nas barras e inserção do novo parque, um perfil de tensão ideal para as barras de conexão.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

A possibilidade de usufruir do avanço da tecnologia para fins acadêmicos torna o processo de aprendizado mais eficiente. Embora as metodologias de ensino tradicionais tenham sua eficácia, há de se considerar que a geração de profissionais em formação hoje difere das de antigamente principalmente pelos inúmeros recursos disponíveis, e que estes devem ser utilizados para aprimorar os métodos já consolidados. De forma mais específica, cita-se o exemplo das matérias referentes à energia eólica e como elas são transmitidas aos alunos: através de livros, majoritariamente. Porém, uma proposta de otimização dessa transmissão de conhecimentos através de uso de recursos em 3 dimensões que permitam a imersão e interação do aluno no que concerne à energia eólica surge como alternativa que vem a somar no processo de ensino aprendizagem.

Neste trabalho, foram abordadas, sob a forma de 5 módulos distintos, uma plataforma de simulação criada com objetivo de fornecer uma alternativa atrativa e interativa de aprendizado sobre 3 conceitos principais da energia eólica: controle de potência, geração de energia elétrica anual e conexão à rede dos aerogeradores. Para os dois primeiros módulos, que trabalhavam as estratégias de controle de passo e estol, respectivamente, o usuário consegue acompanhar de modo visual, em 3 dimensões e em tempo real, as respostas do sistema de controle às variações do vento, diferenciando-se de, por exemplo, figuras de livros que se limitam à duas dimensões, que, embora tenham sua importância, seja reconhecida a dificuldade de se transferir com eficácia, assuntos pertinentes à energia eólica, como por exemplo, aspectos aerodinâmicos das pás e a própria ação de controle já citada, melhores absorvidas se visualizadas em 3D.

O módulo de Produção de Energia traz consigo uma funcionalidade que é útil nesse momento de expansão da energia eólica no Brasil, principalmente na região nordeste, que é a perspectiva de se estimar quantitativamente a energia elétrica produzida por determinado aerogerador, levando em consideração a localidade desejada para a análise. Portanto, aquele que fizer uso do módulo, irá conhecer os locais mais propícios para o investimento em tecnologia eólica e concluir que os parques eólicos do Brasil não se concentram nas regiões que atualmente estão à toa, mas sim, por motivos técnicos que viabilizem tal investimento.

Os módulos Parque Eólico e Conexão à rede tratam da energia eólica num contexto mais amplo, geral. No primeiro, o usuário aplicará os conceitos de controle de potência e posicionamento da nacela (guinada), mas olhando para todo o parque. Já no segundo, se mostra mais complexo no sentido de interpretação e uso, uma vez que se faz necessário um conhecimento básico sobre sistema elétrico de potência, sendo assim, o mais avançado dos módulos. A partir dele, o usuário visualiza a influência da injeção de potência ativa e reativa do sistema, além dos parâmetros do mesmo, nas barras nos quais ele está conectado, trazendo-o para uma discussão e reflexão sobre os limites de variações nos quais se é permitido no sistema.

Portanto, a criação de uma ferramenta de simulação que traga consigo conceitos energia eólica e os disponibilize em forma de recursos gráficos interativos disponíveis aos alunos, objetivando não somente transmitir o conhecimento, mas também fazê-lo de forma atrativa e eficiente, justifica sua criação no contexto do aperfeiçoamento no processo de aprendizagem nos diversos níveis, desde o mais básico, até o superior.

7.1 Recomendações para Trabalhos Futuros

A temática de energia eólica é muito ampla, com muitos assuntos ainda a serem discutidos e melhorados. O presente trabalho, se propôs a disponibilizar na forma de *software* para uso em computador, uma ferramenta de simulação que trata de três contextos da tecnologia eólica. Portanto, como recomendações para futuras pesquisas, são sugeridas abaixo, incrementos para este trabalho e para posteriores que eventualmente sigam a mesma diretriz:

- Tratar de outros temas da energia eólica, como separação de aerogeradores, segurança na operação e manutenção, dentre outros que são disponíveis nas literaturas específicas;
- Trabalhar com outros modelos de máquinas: para o SiConErCo, toda a metodologia foi desenvolvida baseada em um aerogerador do Tipo I, ou seja, máquina de velocidade fixa, com gerador gaiola de esquilo, conectada diretamente à rede com compensação reativa através de banco de capacitores. Existem os outros tipos de máquinas e suas distintas formas de controle de reativo, conexão à rede e eficiência na geração de energia.

- Trabalhar o aerogerador internamente: abordar o maquinário interno à um aerogerador, de forma imersiva e interativa.
- Atualizar o SiConErCo de forma a viabilizar sua exportação para as plataformas de *smartphone*, como aplicativos *android* e *IOS*: atualmente, o SiConErCo é disponível apenas para versão em computador, ou seja, toda sua dinâmica de uso é dependente dos periféricos *mouse* e teclado.
- Atualizar o SiConErCo para viabilizar seu uso como total realidade virtual, com imersão total do usuário, com o mesmo fazendo uso do óculos especial de imersão no ambiente. O *Unity* disponibiliza o recurso, porém, de maneira restrita, limitado para assinantes.
- Trabalho de mensurar o grau de eficácia do SiConErCo aplicado: disponibilizar o *software* para alunos que estejam cursando matérias relativas à energia eólica cujos contextos coincidam com aqueles abordados no SiConErCo, e mediante entrevista e critérios previamente estabelecidos, mensurar o quão eficaz foi a ferramenta para aumento do interesse ou desempenho dos alunos na referida disciplina.

REFERÊNCIAS

ABEEólica. Associação Brasileira de Energia Eólica. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/>> Acesso em: 26 nov. 2016

Airfoil Tools. Disponível em < <http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-n63415-il-1000000-n5>> Acesso em: 27 nov. 2016

Aneel. Banco de Informações de Geração – BIG. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: 25 set. 2016

ARRIBAS, L. **Energia Mini-eólica**. [s.i]: [s.i], 2013. Material desenvolvido para o Programa de Capacitação em Energias Renováveis / ONUDI - Observatório de Energias Renováveis para a América Latina e o Caribe.

BARTNECK, Christoph et al. The robot engine — Making the unity 3D game engine work for HRI. **2015 24th Ieee International Symposium On Robot And Human Interactive Communication (ro-man)**, [s.l.], p.431-437, ago. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

BORGES, Carmen Lucia Tancredo. **Análise de Sistemas de Potência**. Rio de Janeiro: Departamento de Eletrotécnica, 2005. 143 p.

BRAGA, Mariluci. **Virtual Class: Uma proposta de ambiente computacional de EAD na internet**. 2002. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BURTON, Tony et al. **Wind Energy Handbook**. Chichester: John Wiley, 2001. 642 p.

CARDOSO, Alexandre; LAMOUNIER JÚNIOR, Edgard. A Realidade Virtual na Educação e Treinamento. In: TORI, Romero; KIRNER, Claudio; SISCOOTTO, Robson. **Fundamentos de Realidade Virtual**. Belém: [s.i], 2006. p. 304-312.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. Rio de Janeiro: CRESEB, 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=o_cresesb>. Acesso em: 29 set. 2016. CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: Governo Federal, 2001.

Dale, Edgar. *Audio-Visual Methods in Teaching*, 3rd ed., Holt, Rinehart & Winston, New York, 1969, p.108.

DB-City. La Talaudière, 2017. Disponível em: <<http://pt.db-city.com/Brasil>> Acesso em :02 jan. 2017

Dekker, J., Zhang, Q., Moreland, J., Zhou, C. (2013). “MARWind: Mobile Augmented Reality Wind Farm Visualization” in *Proceedings of WorldComp 2013 International Conference on Modeling, Simulation and Visualization Methods*. Las Vegas, NV.

Do, P. T., Moreland, J. R., Delgado, C., Wilson, K., Wang, X., Zhou, C., & Ice, P. (2013). *Effects of 3D Virtual Simulators in the Introductory Wind Energy Course: a tool for teaching engineering concepts*. *Innovative Teaching*.

EL-SHARKAWI, M. A. **Wind Energy An Introduction**. Flórida: CRC, 2016. 345 p.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia Eólica**. Barueri: Manole, 2011. 285 p.

GONZALEZ, F. E. **Estudo das forças atuantes em mecanismos de regulação de ângulo de passo e desenvolvimento de um sistema emulador de cargas**. 2012. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

Google. Google Earth versão 7.1.7.2606. 2016 Google Inc.

GWEC (Bélgica). **Global Wind Statistics 2015**. Bruxelas: [s.i], 2016. 4 p.

HEMANI, Ahmad. **Wind Turbine Technology**. Nova Iorque: Cengage Learning, 2012. 418 p.

HIRATA, Andrei Inoue. **Desenvolvendo Games em Unity 3D 3.0 – Space Invasion: Construa um jogo no estilo arcade, controlando uma nave espacial e destruindo asteróides**. Rio de Janeiro: Moderna Ltda, 2011. 150 p.

HOFFMANN, R. **A comparison of control concepts for wind turbines in terms of energy capture**. 2002. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Elektrotechnik Und Informationstechnik, Technischem Universitat Darmstadt, Darmstadter, 2002.

JAUCH, Clemens et al. Simulation Model of an Active-stall Fixed-speed Wind Turbine Controller. **Wind Engineering**, Roskilde, v. 28, n. 2, p.177-196, 5 maio 2004.

LOWENBERG, Vanessa Viquetti. **Análise dos limites máximos de inserção de geração eólica em redes de distribuição conforme a variação de tensão de regime permanente**. 2013. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2013.

MASTERS, G. M. **Renewable and efficient electric power systems**. New Jersey: Wiley Interscience, 2004. 95 p.

Microsoft Visual Studio Community 2015, versão 14.0.23107.0 D14REL. 2015 Microsoft Corporation.

MIHET-POPA, L.; GROZA, V. Modelling and Simulation of a 12 MW Active-Stall Constant-Speed Wind Farm. **Wind Farm - Impact In Power System And Alternatives To Improve The Integration**, [s.i.], v. 1, n. 1, p.271-295, 28 jul. 2011. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/934>.

OLIVEIRA, C. B. M; ARAÚJO, R. S. B. de. **Guia do Setor Eólico do Rio Grande do Norte: Mercado - Prospecção - Construção e Montagem, Operação e Manutenção - Barreiras e Perspectivas**. Natal: IFRN, 2015. 206 p.

PAVINATTO, E. F. **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica**. 2005. 165 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação de Engenharia Elétrica, Coppe, UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

PIETSCH JUNIOR, R et al. Simulador De Robôs Lego® Com Auxílio Do Unity 3D. In: 22º EAIC Encontro Anual de Iniciação Científica, 2013, Foz do Iguaçu.

PINTO, M. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 362 p.

SANTOS, F. G. dos. **Plataforma Computacional para ensino e treinamento de profissionais do setor elétrico**. 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2013.

SANTOS-MARTIN, D. et al. Problem-Based Learning in Wind Energy Using Virtual and Real Setups. **Ieee Transactions On Education**, [s.l.], v. 55, n. 1, p.126-134, fev. 2012. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/te.2011.2151195>.

SILVA, S. R. et al. Análise da Integração de Usinas Eólicas na Rede Elétrica. **Seminário Brasileiro Sobre Qualidade da Energia Elétrica**. Aracajú, p. 2-7. ago. 2003.

TORI, Romero; KIRNER, Claudio. Fundamentos de Realidade Virtual. **Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual Aumentada**. Belém, p. 2-21. maio 2006

Unity 3D. Unity, versão 5.3.4f1 Personal. 2016.

VESTAS. NM82/1650: General Specification V82 - 1.65 MW MK II. 2 ed. Dinamarca.

WU, B. et al. **Power Conversion and Control of Wind Energy Systems**. New Jersey: Ieee Press, 2011. 481 p.

ANEXO I

ESPECIFICAÇÕES GERAIS

V82-1.65 MW MK II

NM82/1650 Vers. 2

1	Dados principais			
		50 Hz	60 Hz	60 Hz UL
	Potência Nominal	1650 kW	1650 kW	1650 kW
	Diâmetro do Rotor	82 m	82 m	82 m
	Área Varrida	5281 m ²	5281 m ²	5281 m ²
	Altura do Cubo	59 m, 68.5 m, 70 m, 78 m	70 m, 78 m	59 m, 70 m, 80 m
	Velocidade de Rotação	14.4 rpm	14.4 rpm	14.4 rpm

2	Dados da Nacele		
		50 Hz	60 Hz
	Material	EM-GJS-400-18U- LT	EM-GJS-400-18U- LT
	Cor padrão	RAL 7035	RAL 7035
	Classe de corrosão	Acc. to DS EM ISSO 12944:C5 I	Acc. to DS EM ISSO 12944:C5 I

3	Rotor		
		50 Hz	60 Hz
	Número de pás	3	3
	TSR	61.8 m/s	61.8 m/s
	Inclinação do eixo do rotor	5°	5°
	Excentricidade	3447 mm	3447 mm
	Solidez	5.0%	5.0%
	Regulação de Potência	Active Stall ®	Active Stall ®
	Orientação do Rotor	Upwind	Upwind

4	Pás		
		50 Hz	60 Hz
	Tipo	AL 40	AL 40
	Comprimento	40 m	40 m

	Material	Carbono, madeira, vidro e epóxi	Carbono, madeira, vidro e epóxi
	Cor Padrão	RAL 7035	RAL 7035
	Lustro	Classe 2: (30-70%) de acordo com (1)	Classe 2: (30-70%) de acordo com (1)
	Tipo de freio aerodinâmico	Pá completa	Pá completa
	Perfil das pás	FFA – W3, NACA 63.4	FFA – W3, NACA 63.4
	Torção	20°	20°
	Maior corda	3.08 m	3.08 m
	Área projetada de pá	86 m ²	86 m ²
	Nota (1): Critérios técnicos para o esquema dinamarquês de aprovação de turbinas eólicas		

5	Rolamento das pás		
		50 Hz	60 Hz
	Tipo de descrição	Rolamentos em esfera	Rolamentos em esfera
	Número de rolamentos	3	3

6	Cubo		
		50 Hz	60 Hz
	Tipo de descrição	Esféricas	Esféricas
	Material	EM-GJS-400-18U-LT	EM-GJS-400-18U-LT
	Classe de corrosão	Acc. to DS EN ISO 12944:C5 I	Acc. to DS EN ISO 12944:C5 I

7	Rotor principal		
		50 Hz	60 Hz
	Tipo de descrição	Forjado e com flange	Forjado e com flange

	Material	34CrNiMo6 + QT	34CrNiMo6 + QT
	Classe de corrosão	Acc. to DS EN ISO 12944:C2	Acc. to DS EN ISO 12944:C2

8	Caixa de Engrenagem		
		50 Hz	60 Hz
	Tipo de descrição	Passo planetário Passo helicoidal	Passo planetário Passo helicoidal
	Material	Fundido	Fundido
	Taxa	1:70.2	1:70.2
	Estresse de flexão	$S_F > 1.6$	$S_F > 1.6$
	Durabilidade de superfície	$S_H > 1.25$	$S_H > 1.25$
	Segurança contra arranhões	$S_S > 1.3$	$S_S > 1.3$
	Vedação de eixo	Labirinto	Labirinto
	Cárter de óleo	App.250 I	App.250 I

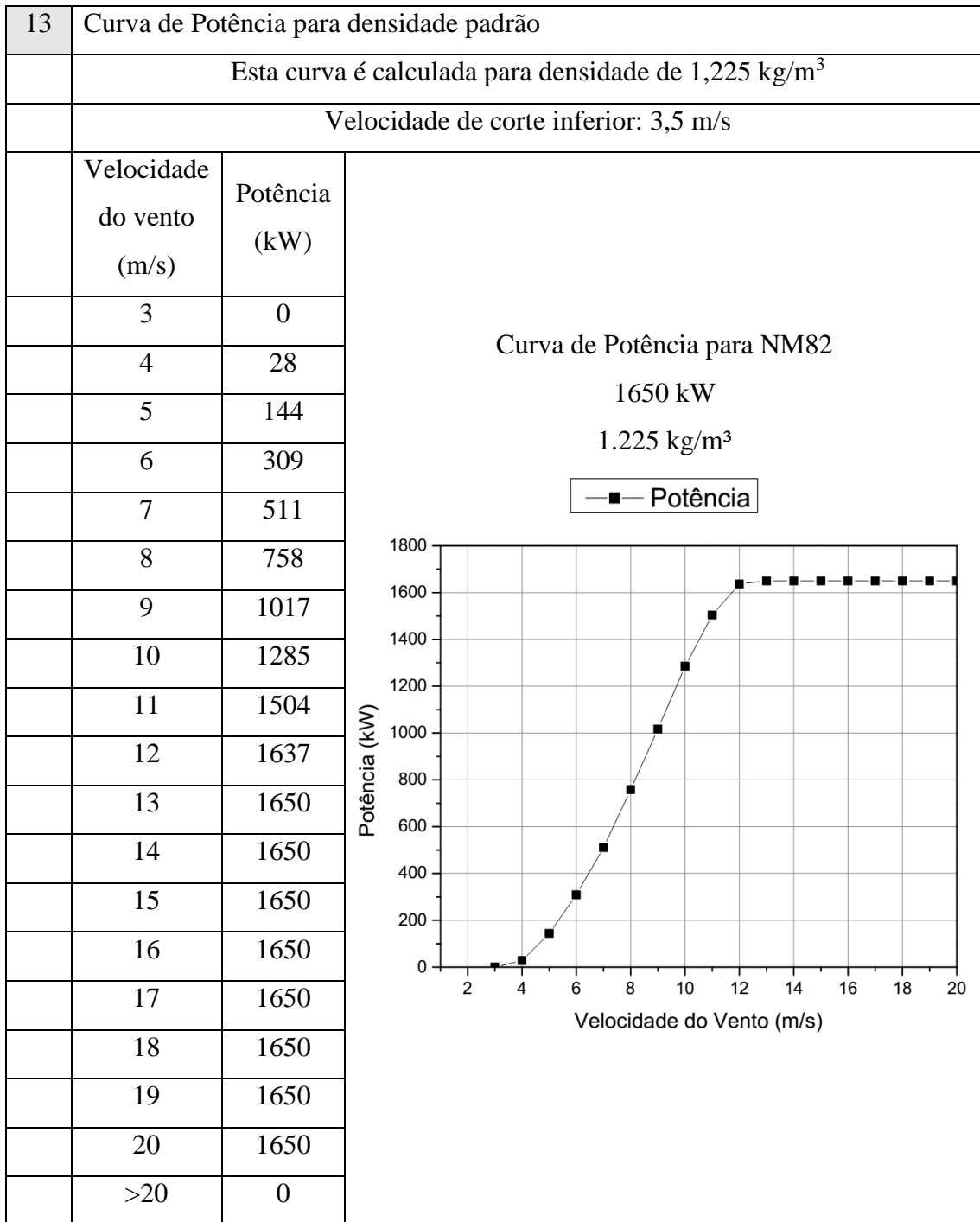
9	Gerador			
			50 Hz	60 Hz
	Potência nominal	P_N	1650 kW	1650 kW
	Potência Aparente	S_N	1805 kVA	1808 kVA
	Corrente Nominal	I_N	1510 A	1740 A
	Máxima potência em Classe F	P_{FMAX}	1815 kW	1815 kW
	Máxima corrente em Classe F	I_{FMAX}	1661 A	1914 A
	Corrente sem carga	I_0	400 A	430 A
	Consumo reativo à potência nominal	Q_N	731 kvar	740 kvar
	Consumo de potência reativa sem carga	Q_0	478 kvar	447 kvar
	Número de polos	P	6	6
	Rotação síncrona	n_0	1000 rpm	1200 rpm

	Rotação à potência ativa	n_N	1012 rpm	1214 rpm
	Escorregamento à potência nominal	s_N	1.20 %	1.17 %
	Tensão	U_N	3 x 690 V	3 x 600 V
	Frequência	F	50 Hz	50 Hz
	Ligação		Δ	Δ
	Clausura		IP54	IP54
	Classe de isolamento		F/B	F/B

10	Requisitos para conexão à rede		
		50 Hz	60 Hz
	Máxima tensão	+ 10% (60 segundos)	+10% (60 segundos)
	Mínima tensão	- 10% (60 segundos)	-10% (60 segundos)
	Máxima tensão	+ 12,5% (0,1 segundos)	+12,5% (0,1 segundos)
	Mínima tensão	- 15% (0,1 segundos)	-15% (0,1 segundos)
	Máxima frequência	+ 1 Hz (0,2 segundos)	+ 1 Hz (0,2 segundos)
	Mínima frequência	- 2 Hz (0,2 segundos)	- 2 Hz (0,2 segundos)
	Máxima corrente assimétrica	15% (60 segundos) – fase-terra	15% (60 segundos) – fase-terra
	Máxima tensão assimétrica	2% (60 segundos) – fase-terra	2% (60 segundos) – fase-terra
	Máxima corrente de curto circuito	25 kA a 690 V	30 kA a 600 V
	Harmônico simples	Máx 1% de qualquer harmônico simples	Máx 1% de qualquer harmônico simples
	Distorção harmônica total	Máx 3 % do total de distorção harmonica	Máx 3 % do total de distorção harmonica
	Conexão	Solidamente aterrada no lado secundário do transformador	Solidamente aterrada no lado secundário do transformador

11	Fator de Potência – Compensação em carga máxima			
			50 Hz	60 Hz
	Potência nominal	P_N	1650 kW	1650 kW
	Tensão nominal	U_N	3 x 690 V	3 x 600 V
	Frequencia	f	50 Hz	60 Hz
	Consumo de reativo à potência nominal	Q_N	731 kvar	740 kvar
	Consumo de reativo sem carga	Q_0	478 kvar	447 kvar
	Banco de Capacitores:			
	Capacitores		800 kvar, divididos em etapas	817kvar, divididos em etapas
	Resolução dos capacitores		2 x 25 kvar	2 x 22,7kvar
	Mínimo tempo de operação		120 segundos	120 segundos
	Gerador G, 6 polos, 1650 kW			

12	Mecanismo de guinada (<i>yaw</i>)			
			50 Hz	60 Hz
	Tipo		Planetário	Planetário
	Taxa de conversão		App. 1:1687	App. 1:1687
	Tensão		3 x 690 V	3 x 480 V
	Velocidade de rotação à plena carga		920 rpm	1140 rpm
	Número de engrenagens de guinada		6 peças	6 peças



14	Curva de Potência												
Densidade do ar (kg/m ³)	0,97	1,00	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,18	1,21	1,225	1,24	1,27	
Velocidade do vento (m/s)	Pot (kW)	Pot (kW)	Pot (kW)	Pot (kW)	Pot (kW)	Pot (kW)	Pot (kW)	Pot (kW)	Pot (kW)	Pot (kW)	Pot (kW)	Pot (kW)	
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	15	16	18	19	21	22	24	25	27	28	29	30	
5	107	112	116	120	125	129	133	138	142	144	146	151	
6	238	246	255	263	271	280	288	296	305	309	313	321	
7	399	412	425	438	452	465	478	491	504	511	517	530	
8	589	608	627	645	664	683	702	722	746	758	767	788	
9	794	818	843	867	892	916	941	968	999	1017	1028	1058	
10	995	1025	1055	1085	1116	1147	1178	1217	1260	1285	1299	1333	
11	1191	1228	1266	1303	1341	1379	1417	1453	1489	1504	1518	1546	
12	1371	1415	1459	1504	1548	1588	1620	1628	1636	1637	1639	1642	
13	1520	1569	1616	1637	1642	1643	1645	1646	1647	1650	1650	1650	
14	1624	1635	1643	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	
15	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	
16	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	
17	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	
18	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	
19	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	
20	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	1650	

15	C _p												
Densidade do ar (kg/m ³)	0,97	1,00	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,18	1,21	1,225	1,24	1,27	
Velocidade do vento (m/s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.092	0.095	0.103	0.106	0.114	0.116	0.123	0.125	0.132	0.135	0.138	0.140	
5	0.334	0.339	0.341	0.343	0.347	0.349	0.350	0.354	0.356	0.356	0.357	0.360	
6	0.430	0.431	0.434	0.435	0.436	0.438	0.439	0.440	0.442	0.442	0.443	0.443	
7	0.454	0.455	0.456	0.456	0.458	0.458	0.459	0.459	0.460	0.461	0.460	0.461	
8	0.449	0.450	0.450	0.450	0.451	0.451	0.452	0.453	0.456	0.458	0.458	0.459	
9	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.426	0.429	0.431	0.431	0.433	
10	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.391	0.394	0.397	0.397	0.398	
11	0.349	0.349	0.350	0.350	0.350	0.350	0.351	0.350	0.350	0.349	0.348	0.346	
12	0.310	0.310	0.310	0.311	0.311	0.311	0.309	0.302	0.296	0.293	0.290	0.283	
13	0.270	0.270	0.270	0.266	0.260	0.253	0.247	0.240	0.235	0.232	0.229	0.224	
14	0.231	0.226	0.220	0.215	0.209	0.203	0.198	0.193	0.188	0.186	0.184	0.179	
15	0.191	0.185	0.180	0.175	0.170	0.165	0.161	0.157	0.153	0.151	0.149	0.146	
16	0.157	0.153	0.148	0.144	0.140	0.136	0.133	0.129	0.126	0.125	0.123	0.120	
17	0.131	0.127	0.123	0.120	0.117	0.114	0.111	0.108	0.105	0.104	0.103	0.100	
18	0.110	0.107	0.104	0.101	0.098	0.096	0.093	0.091	0.089	0.087	0.086	0.084	
19	0.094	0.091	0.088	0.086	0.084	0.081	0.079	0.077	0.075	0.074	0.073	0.072	
20	0.081	0.078	0.076	0.074	0.072	0.070	0.068	0.066	0.065	0.064	0.063	0.062	