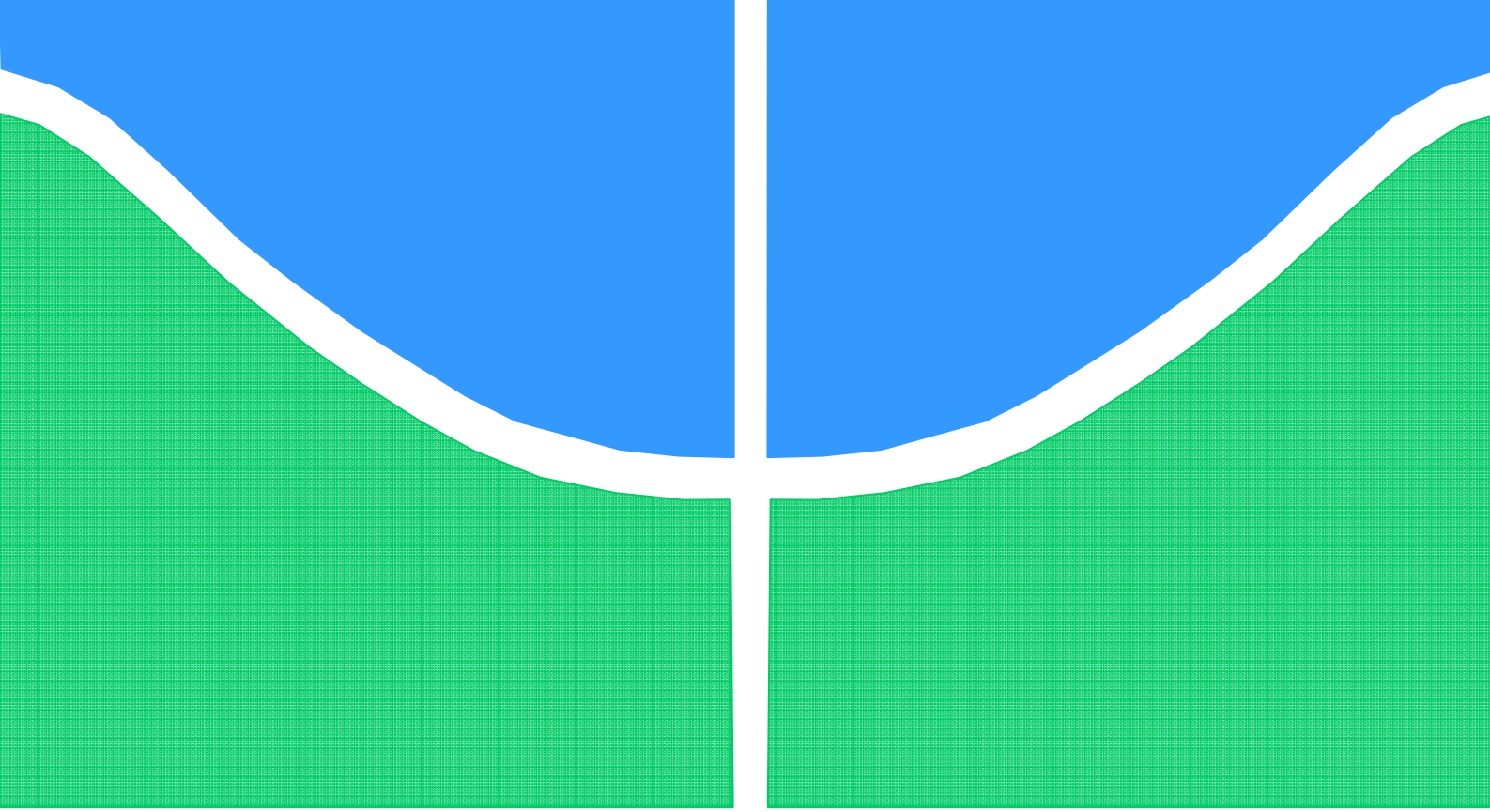


TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MODELAGEM MATEMÁTICA VISANDO ESTIMATIVA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PROVENIENTE DO SISTEMA DE MICROGERAÇÃO EÓLICA DA EMBAIXADA DA ITÁLIA, CONSIDERANDO O POTENCIAL EÓLICO DE DIVERSAS CIDADES BRASILEIRAS

THIAGO THADEU DA SILVA ABRANTES

Brasília, dezembro de 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM MATEMÁTICA VISANDO ESTIMATIVA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PROVENIENTE DO SISTEMA DE MICROGERAÇÃO EÓLICA DA EMBAIXADA DA ITÁLIA, CONSIDERANDO O POTENCIAL EÓLICO DE DIVERSAS CIDADES BRASILEIRAS

THIAGO THADEU DA SILVA ABRANTES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

APROVADO POR:

_____

RAFAEL AMARAL SHAYANI, Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)

_____

MAURO MOURA SEVERINO, Dr., ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

JORGE ANDRÉS CORMANE ANGARITA, Dr., FGA/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)

BRASÍLIA, 08 DE DEZEMBRO DE 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

ABRANTES, THIAGO THADEU DA SILVA

Modelagem matemática visando estimativa na produção de energia elétrica proveniente do sistema de microgeração eólica da Embaixada da Itália, considerando o potencial eólico de diversas cidades brasileiras [Distrito Federal] 2014.

xxi, 163p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, 2014).

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1.Geração eólica 2.Geração distribuída

3.Velocidade do vento 4.Modelagem computacional

I. ENE/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABRANTES, T. T. S. (2014). Modelagem matemática visando estimativa na produção de energia elétrica proveniente do sistema de microgeração eólica da Embaixada da Itália, considerando o potencial eólico de diversas cidades brasileiras. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Publicação FT, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 163p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Thiago Thadeu da Silva Abrantes.

TÍTULO: Modelagem matemática visando estimativa na produção de energia elétrica proveniente do sistema de microgeração eólica da Embaixada da Itália, considerando o potencial eólico de diversas cidades brasileiras.

GRAU: Engenheiro Eletricista. ANO: 2014.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho de conclusão de curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação, e nenhuma parte deste trabalho de conclusão de curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

_____

Thiago Thadeu da Silva Abrantes
CLN 407 – bloco C – ap. 220 – Asa Norte
70.855–530 – Brasília – DF – Brasil

Dedico este trabalho à Juliana, minha amada esposa, que trouxe a felicidade que faltava dentro de mim e possibilitou a concretização do meu maior sonho aqui nessa Terra: construir uma linda família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre ter estado do meu lado nos momentos difíceis e alegres.

Aos meus pais, Tadeu e Reginalda, que sempre foram exemplos de amor, honestidade, humildade e dedicação.

Aos meus sogros, Manoel e Angélica, pela saudosa recepção em sua família.

Aos meus irmãos, Lucas e Caio, e a minha cunhada, Isabella, que sempre estão em minhas orações.

À Igreja Universal do Reino de Deus onde conheci o Senhor Jesus Cristo.

Aos meus amigos, que me orientam, aconselham e apoiam.

À Embaixada da Itália em Brasília, pelo apoio na realização deste TCC, pelo acesso às instalações do edifício; e aos eletricistas que nos acompanharam durante as visitas técnicas.

Ao professor Rafael Amaral Shayani, pela valorosa orientação neste trabalho, por ter assumido e dado continuidade nesse estudo, ditando traços determinantes para a conclusão do mesmo.

Ao professor Mauro Moura Severino, por iniciar a orientação deste TCC, pela dedicação, empenho e paciência que teve comigo ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Kleber Melo e Silva, do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, pela receptividade nesta Universidade.

Aos servidores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, em especial aos professores e a equipe técnica do SG 11; e aos professores do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás, onde iniciei a graduação.

Aos colegas de trabalho da Eletrobras Eletronorte e da Procuradoria Geral da República (PGR), onde estagiei; em especial aos engenheiros Juliano Cortes de Souza (Eletronorte) e Gustavo A. S. Barreto (PGR), pela amizade e pelas ricas orientações nos trabalhos realizados.

"Não to mandei eu? Sê forte e corajoso; não temas,
nem te espantes, porque o Senhor, teu Deus,
é contigo por onde quer que andares."

Bíblia Sagrada. O Livro de Josué.
(Capítulo 1 e Versículo 9)

RESUMO

MODELAGEM MATEMÁTICA VISANDO ESTIMATIVA NA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PROVENIENTE DO SISTEMA DE MICROGERAÇÃO EÓLICA DA EMBAIXADA DA ITÁLIA, CONSIDERANDO O POTENCIAL EÓLICO DE DIVERSAS CIDADES BRASILEIRAS

Este trabalho apresenta uma avaliação técnica do Sistema de Microgeração Eólica (SMGE) instalado na Embaixada da Itália em Brasília – DF. Para realizar a análise, estabeleceu-se como parâmetro de entrada a velocidade do vento e, como saída, a quantidade de energia elétrica que poderá ser produzida, durante um ano. Os dados da velocidade do vento foram extraídos do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA), e a modelagem é feita por meio de cálculos da potência do vento incidente sobre os aerogeradores e também da potência gerada por eles. Todos os equipamentos que compõe o SMGE são avaliados no processo de geração de energia elétrica, até o ponto de entrega dessa energia à carga da Embaixada, incluindo os inversores de frequência. A modelagem feita para o SMGE em Brasília também é expandida para outras cidades brasileiras, em diferentes regiões, onde se encontram as estações anemométricas do SONDA. Dessa forma, há comparações entre a quantidade de energia gerada em diferentes localidades do Brasil, mostrando quais as cidades e regiões que possuem maiores viabilidades de uso das turbinas eólicas instaladas na Embaixada italiana. As cidades avaliadas, além de Brasília, são: Ourinhos – SP, Petrolina – PE, São Martinho da Serra – RS, Belo Jardim – PE, São João do Cariri – PB e Triunfo – PE. A estimativa anual da quantidade de energia elétrica gerada pelo SMGE para Brasília foi de 167,46 kWh, e, após as perdas, 161,49 kWh. Já a estimativa anual de energia elétrica gerada pelas demais cidades foram, respectivamente: 1.496,41 kWh (10 m de altura); 2.425,44 kWh (10 m de altura); 1.165,13 kWh (10 m de altura); 7.801, 41 kWh (25 m de altura) e 8.306,83 kWh (50 m de altura); 5.877,91 kWh (25 m de altura) e 8.907,04 kWh (50 m de altura); 34.947,94 kWh (50 m de altura).

ABSTRACT

MATHEMATICAL MODELING AIMING TO ESTIMATE THE ELECTRICAL ENERGY PRODUCTION FROM THE WIND MICROGENERATION SYSTEM OF THE EMBASSY OF ITALY, CONSIDERING THE WIND POTENTIAL OF SEVERAL CITIES BRAZILIAN

This paper presents an evaluation of the Micro-Wind System (SMGE) installed at the Italian Embassy in Brasilia – DF. To perform the analysis, it was established as an input parameter the wind speed, and as an output parameter the amount of electricity that can be produced for one year. The wind speed data were extracted from the System of National Environmental Data Organization (SONDA) and modeling is done by means of wind power calculations incident on the turbines and also of the power generated by them. All equipment that makes up the SMGE is assessed in the electricity generation process, until to the point of delivery of that power to the Embassy, including the frequency inverters. The modeling done for the SMGE in Brasilia is also expanded to other Brazilian cities, in different regions, where the airspeed stations SONDA. Thus, there are comparisons between the amount of energy generated in different locations in Brazil, showing which cities and regions that have higher viability of the use of wind turbines in the Italian Embassy. The three cities, besides Brasília, are: Ourinhos – SP, Petrolina – PE, São Martinho da Serra – RS, Belo Jardim – PE, São João do Cariri – PB and Triunfo – PE. The annual estimate of the amount of electricity generated by SMGE to Brasilia was 167,46 kWh, and after losses, 161,49 kWh. Already estimated annual electricity generated by other cities were: 1.496,41 kWh (10 m high); 2.425,44 kWh (10 m high); 1.165,13 kWh (10 m high); 7.801,41 kWh (25 m high) and 8.306,83 kWh (50 m high); 5.877,91 kWh (25 m high) and 8.907,04 kWh (50 m high); 34.947,94 kWh (50 m high).

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Noite nos Estados Unidos, no continente Europeu e na Terra. 5
Figura 2.2 Velocidade média anual de vento a 50m de altura das Regiões Nordeste, Sul e Sudeste. 17
Figura 2.3 Velocidade média anual de vento a 50m de altura das Regiões Centro-Oeste e Norte. 18
Figura 2.4 Velocidade média anual do vento a 50m de altura no Brasil. 18
Figura 2.5 Representação das direções do vento. 22
Figura 2.6 Comportamento do vento ao passar por alguns obstáculos. 26
Figura 2.7 Esquema simplificado de conversão da energia eólica em energia elétrica. ... 28
Figura 2.8 Componentes básicos de um gerador eólico convencional de eixo horizontal. 30
Figura 2.9 Diferentes tipos de turbinas de eixo vertical: A) Darrieus, B) Giromill e C) Savonius. 32
Figura 2.10 Forças atuantes em uma pá da turbina eólica. 33
Figura 2.11 Representação de um sistema elétrico interligado. 34
Figura 2.12 Representação de um sistema elétrico interligado com geração distribuída. .. 35
Figura 2.13 Classificação de GD quanto à especificação da potência. 41
Figura 3.1 Localização da Embaixada italiana em Brasília. 43
Figura 3.2 Detalhe dos ambientes e da fachada da Embaixada da Itália. 45
Figura 3.3 Entrada da Embaixada da Itália. 46
Figura 3.4 Estação solarimétrica e anemométrica de Brasília. 52
Figura 3.5 Etapas do processo de geração da turbina eólica. 53
Figura 3.6 Turbina eólica instalada na Embaixada italiana. 55
Figura 3.7 Turbina eólica próxima aos painéis fotovoltaicos. 55
Figura 3.8 Disposição das turbinas eólicas na laje do edifício da Embaixada. 56
Figura 3.9 Conjunto dos cinco inversores instalados, ao lado do QT, na Embaixada da Itália. 58
Figura 3.10 Inversor, à esquerda, e retificador, à direita, de uma das turbinas eólicas. 58
Figura 3.11 Quadro Terminal do SMGE da Embaixada italiana. 59

Figura 3.12 Da esquerda para a direita: C40N VIGI 1P+N C10, C40N VIGI 3P+N C8, C60L 4P C20. 60
Figura 3.13 CT 4P 63A, à esquerda, e Femto D4-SPI, à direita. 61
Figura 3.14 Yocto Net (To Ethernet Lan, 10/100 Mb). 63
Figura 3.15 Diagrama unifilar: circuito de força. 64
Figura 3.16 Diagrama unifilar: circuito de comando. 65
Figura 3.17 Diagrama de fluxo de potência para o SMGE da Embaixada italiana. 72
Figura 3.18 Fluxograma do método empregado na modelagem do SMGE. 73
Figura 4.1 Área de incidência do vento sobre a turbina eólica. 79
Figura 4.2 Diagrama de Blocos do SMGE da Embaixada da Itália. 80

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 Oferta mundial de energia por fonte. 7
Gráfico 2.2 Comportamento percentual, nos anos de 1973 e 2011, das fontes empregadas na geração de energia. 8
Gráfico 2.3 Geração de energia elétrica no mundo por combustível de 1971 a 2011. 8
Gráfico 2.4 Matriz de Energia Elétrica no Brasil. 9
Gráfico 2.5 Os 10 países com os maiores parques eólicos do mundo e as suas contribuições. 13
Gráfico 2.6 Crescimento do Parque Eólico Mundial. 13
Gráfico 2.7 Crescimento da geração eólica no Brasil. 15
Gráfico 2.8 Variação diária média de velocidade e de direção do vento. 21
Gráfico 2.9 Função de Distribuição de Probabilidade de Weibull 21
Gráfico 2.10 Curva característica de potência de uma turbina eólica. 25
Gráfico 3.1 Velocidade média do vento ao longo do dia em Brasília. Dados de janeiro de 2005 a Março de 2006. 48
Gráfico 3.2 Curva de potência da turbina eólica. 56
Gráfico 3.3 Curva de potência modelada da turbina eólica. 69
Gráfico 4.1 Potência do vento ao longo do mês de janeiro. 81
Gráfico 4.2 Potência na saída do gerador eólico durante o mês de janeiro. 82
Gráfico 4.3 Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de janeiro. 82
Gráfico 4.4 Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de janeiro. 83
Gráfico 4.5 Distribuição de Weibull para o mês de janeiro. 84
Gráfico 4.6 Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de janeiro. 85
Gráfico 4.7 Energia gerada pelos aerogeradores na cidade de Brasília – DF. 87
Gráfico 4.8 Energia total produzida pelos aerogeradores na cidade de Brasília – DF. 87
Gráfico 4.9 Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2013, na cidade de Brasília – DF. 88
Gráfico 4.10 Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2013, na cidade de Brasília – DF (representação radial). 89
Gráfico 4.11 Distribuição de Weibull para o ano de 2013. 89

Gráfico 4.12 Energia gerada pelas turbinas eólicas na cidade de Ourinhos – SP. 92
Gráfico 4.13 Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2008, na cidade de Ourinhos – SP. 92
Gráfico 4.14 Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2008, na cidade de Ourinhos – SP (representação radial). 93
Gráfico 4.15 Energia gerada pelas turbinas eólicas na cidade de Petrolina – PE. 94
Gráfico 4.16 Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2013, na cidade de Petrolina – PE. 95
Gráfico 4.17 Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2013, na cidade de Petrolina – PE (representação radial). 95
Gráfico 4.18 Energia gerada, ao longo do ano de 2013, pelas turbinas eólicas na cidade de São Martinho da Serra – RS. 97
Gráfico 4.19 Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2013, na cidade de São Martinho da Serra – RS 98
Gráfico 4.20 Velocidade média mensal do vento, ao longo do ano de 2013, na cidade de Martinho da Serra – RS (representação radial). 98
Gráfico 4.21 Energia gerada, a 25 m de altura, ao longo dos anos de 2004 e 2005, pelas turbinas eólicas na cidade de Belo Jardim – PE. 102
Gráfico 4.22 Velocidade média do vento a 25 m de altura, ao longo dos anos de 2004 e 2005, na cidade de Belo Jardim – PE 103
Gráfico 4.23 Velocidade média mensal do vento a 25 m de altura, ao longo dos anos de 2004 e 2005, na cidade de Belo Jardim – PE (representação radial). ... 103
Gráfico 4.24 Energia gerada, a 25 m de altura, ao longo dos anos de 2008 e 2009, pelas turbinas eólicas na cidade de São João do Cariri – PB. 106
Gráfico 4.25 Velocidade média do vento a 25 m de altura, ao longo dos anos de 2008 e 2009, na cidade de São João do Cariri – PB. 106
Gráfico 4.26 Velocidade média mensal do vento a 25 m de altura, ao longo dos anos de 2004 e 2005, na cidade de São João do Cariri – PB (representação radial). 107
Gráfico 4.27 Energia gerada, a 50 m de altura, ao longo dos anos de 2006 e 2007, pelas turbinas eólicas na cidade de Triunfo – PE. 109
Gráfico 4.28 Velocidade média do vento a 50 m de altura, ao longo dos anos de 2006 e 2007, na cidade de Triunfo – PE. 109

Gráfico 4.29 Velocidade média mensal do vento a 50 m de altura, ao longo dos anos de 2006 e 2007, na cidade de Triunfo – PE (representação radial). 110
Gráfico A.1 Potência do vento ao longo do mês de fevereiro. 124
Gráfico A.2 Potência na saída do gerador eólico durante o mês de fevereiro. 125
Gráfico A.3 Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de fevereiro. 125
Gráfico A.4 Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de fevereiro. 126
Gráfico A.5 Distribuição de Weibull para o mês de fevereiro. 126
Gráfico A.6 Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de fevereiro. 127
Gráfico A.7 Potência do vento ao longo do mês de março. 128
Gráfico A.8 Potência na saída do gerador eólico durante o mês de março. 128
Gráfico A.9 Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de março. 129
Gráfico A.10 Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de março. 129
Gráfico A.11 Distribuição de Weibull para o mês de março. 130
Gráfico A.12 Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de março. 130
Gráfico A.13 Potência do vento ao longo do mês de abril. 131
Gráfico A.14 Potência na saída do gerador eólico durante o mês de abril. 132
Gráfico A.15 Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de abril. 132
Gráfico A.16 Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de abril. 133
Gráfico A.17 Distribuição de Weibull para o mês de abril. 133
Gráfico A.18 Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de abril. 134
Gráfico A.19 Potência do vento ao longo do mês de maio. 135
Gráfico A.20 Potência na saída do gerador eólico durante o mês de maio. 135
Gráfico A.21 Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de maio. 136
Gráfico A.22 Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de maio. 136
Gráfico A.23 Distribuição de Weibull para o mês de maio. 137
Gráfico A.24 Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de maio. 137
Gráfico A.25 Potência do vento ao longo do mês de junho. 138
Gráfico A.26 Potência na saída do gerador eólico durante o mês de junho. 139
Gráfico A.27 Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de junho. 139

Gráfico A.28 Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de junho. 140
Gráfico A.29 Distribuição de Weibull para o mês de junho. 140
Gráfico A.30 Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de junho. 141
Gráfico A.31 Potência do vento ao longo do mês de julho. 142
Gráfico A.32 Potência na saída do gerador eólico durante o mês de julho. 142
Gráfico A.33 Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de julho. 143
Gráfico A.34 Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de julho. 143
Gráfico A.35 Distribuição de Weibull para o mês de julho. 144
Gráfico A.36 Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de julho. 144
Gráfico A.37 Potência do vento ao longo do mês de agosto. 145
Gráfico A.38 Potência na saída do gerador eólico durante o mês de agosto. 146
Gráfico A.39 Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de agosto. 146
Gráfico A.40 Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de agosto. 147
Gráfico A.41 Distribuição de Weibull para o mês de agosto. 147
Gráfico A.42 Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de agosto. 148
Gráfico A.43 Potência do vento ao longo do mês de setembro. 149
Gráfico A.44 Potência na saída do gerador eólico durante o mês de setembro. 149
Gráfico A.45 Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de setembro. 150
Gráfico A.46 Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de setembro. 150
Gráfico A.47 Distribuição de Weibull para o mês de setembro. 151
Gráfico A.48 Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de setembro. 152
Gráfico A.49 Potência do vento ao longo do mês de outubro. 153
Gráfico A.50 Potência na saída do gerador eólico durante o mês de outubro. 153
Gráfico A.51 Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de outubro. .. 154
Gráfico A.52 Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de outubro. 154
Gráfico A.53 Distribuição de Weibull para o mês de outubro. 155
Gráfico A.54 Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de outubro. 156
Gráfico A.55 Potência do vento ao longo do mês de novembro. 157

Gráfico A.56 Potência na saída do gerador eólico durante o mês de novembro. 157
Gráfico A.57 Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de novembro. 158
Gráfico A.58 Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de novembro. 158
Gráfico A.59 Distribuição de Weibull para o mês de novembro. 159
Gráfico A.60 Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de novembro. 159
Gráfico A.61 Potência do vento ao longo do mês de dezembro. 160
Gráfico A.62 Potência na saída do gerador eólico durante o mês de dezembro. 161
Gráfico A.63 Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de dezembro 161
Gráfico A.64 Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de dezembro. 162
Gráfico A.65 Distribuição de Weibull para o mês de dezembro. 162
Gráfico A.66 Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de dezembro. 163

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Distribuição da área de cada continente segundo a velocidade média do vento. 11
Tabela 2.2 Estimativas do potencial eólico mundial. 12
Tabela 2.3 Capacidade instalada das fontes energéticas mais utilizadas no Brasil. 14
Tabela 2.4 Evolução da matriz eólica no Brasil. 15
Tabela 2.5 Matriz de energia elétrica no Brasil. 16
Tabela 2.6 Parâmetros pertinentes na avaliação realizada. 20
Tabela 2.7 Categorias de potência de GD. 41
Tabela 3.1 Anos avaliados para as sete cidades brasileiras. 51
Tabela 3.2 Características técnicas da turbina eólica italiana. 54
Tabela 3.3 Características técnicas do inversor. 59
Tabela 4.1 Valores referentes ao SMGE da Embaixada da Itália em Brasília, a partir dos dados da velocidade do vento do SONDA. 78
Tabela 4.2 Avaliação anual para a cidade de Brasília – DF, baseado no SMGE da Embaixada da Itália. 86
Tabela 4.3 Valores referentes à cidade de Ourinhos, em São Paulo. 91
Tabela 4.4 Avaliação anual para a cidade de Ourinhos – SP. 91
Tabela 4.5 Avaliação anual para a cidade de Petrolina – PE. 94
Tabela 4.6 Avaliação anual para a cidade de São Martinho da Serra – RS. 97
Tabela 4.7 Valores referentes, a 25 m de altura, à cidade de Belo Jardim, Pernambuco. 99
Tabela 4.8 Valores referentes, a 50 m de altura, à cidade de Belo Jardim, Pernambuco. 100
Tabela 4.9 Avaliação anual, a uma altura de 25 m, para a cidade de Belo Jardim – PE. 101
Tabela 4.10 Avaliação anual, a uma altura de 50 m, para a cidade de Belo Jardim – PE. 102
Tabela 4.11 Avaliação anual, a uma altura de 25 m, para a cidade de São João do Cariri – PB. 105

Tabela 4.12 Avaliação anual, a uma altura de 50 m, para a cidade de São João do Cariri – PB..... 105
Tabela 4.13 Avaliação anual, a uma altura de 50 m, para a cidade de Triunfo – PE..... 108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CEB – Companhia Energética de Brasília

Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CERNE – Centro de Estratégias em Recursos Naturais & Energia

CA – corrente alternada

CC – corrente contínua

D – distribuidoras

DR – diferencial residual

GC – geração centralizada

GD – geração distribuída

GLP – gás liquefeito de petróleo

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

ONU – Organização das Nações Unidas

QG – quadro geral

QT – quadro terminal

SIN – Sistema Interligado Nacional

SMGE – sistema de microgeração eólica

SONDA – Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

UnB – Universidade de Brasília

UPS – *uninterruptible power supply*

US$ – dólar americano

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO 2

1.2 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO 3

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 4

2.2 CONTEXTO ENERGÉTICO MUNDIAL 4

2.3 ENERGIA EÓLICA 10

2.3.1 Contexto Mundial da Energia Eólica 10

2.3.2 Energia Eólica no Brasil 14

2.4 GERAÇÃO EÓLICA 19

2.4.1 O Vento 19

2.4.2 Potência Gerada pela Força do Ar 23

2.4.3 Avaliação do Terreno 25

2.4.4 Turbinas Eólicas 27

2.4.4.1 Tipos de Aerogeradores 28

2.4.4.2 Movimento das Pás da Turbina Eólica 32

2.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA 33

2.5.1 Aspectos Gerais 33

2.5.2 Definições de GD 35

2.5.3 Aspectos Positivos da GD 37

2.5.4 Aspectos Negativos da GD 38

2.5.5 Classificações Pertinentes (SEVERINO, 2008) 39

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 42

3 MATERIAIS E MÉTODOS 43

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 43

3.2 A EMBAIXADA DA ITÁLIA 43

3.2.1 Aspectos Gerais 43

3.2.2 Variáveis Pertinentes 46

3.2.3 Clima de Brasília 47

3.2.3.1 Comportamento do Vento em Brasília 47

3.3 MATERIAIS 48

3.3.1 Dados da Velocidade do Vento 49

3.3.2 Etapas da Geração Eólica 52

3.3.3 SMGE 54

3.3.3.1 Turbina Eólica 54

3.3.3.2 Retificador e Inversor 57

3.3.4 Diagrama Unifilar 59

3.3.4.1 Descrição do Circuito de Força 59
3.3.4.2 Descrição do Circuito de Comando / Circuito Auxiliar 62
3.3.5 Ferramenta Computacional 66
3.4 MÉTODOS 66
3.4.1 Modelagem 66
3.4.1.1 Aspectos Gerais 66
3.4.1.2 Modelagem do SMGE 66
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 75

4 RESULTADOS E ANÁLISE 76
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 76
4.2 ESTRUTURAÇÃO DA MODELAGEM 76
4.2.1 Aspectos Gerais 76
4.3 CIDADE DE BRASÍLIA, DISTRITO FEDERAL 80
4.3.1 Mês de Janeiro 81
4.3.2 Avaliação Anual 85
4.4 CIDADE DE OURINHOS, SÃO PAULO 90
4.5 CIDADE DE PETROLINA, PERNAMBUCO 93
4.6 CIDADE DE SÃO MARTINHO DA SERRA, RIO GRANDE DO SUL 96
4.7 CIDADE DE BELO JARDIM, PERNAMBUCO 99
4.8 CIDADE DE SÃO JOÃO DO CARIRI, PARAÍBA 104
4.9 CIDADE DE TRIUNFO, PERNAMBUCO 107
4.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS 110

5 CONCLUSÕES 112
5.1 ASPECTOS GERAIS 112
5.2 PRINCIAIS CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES 113
5.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 114

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 116

APÊNDICE 123

A – AVALIAÇÃO MENSAL PARA A CIDADE DE BRASÍLIA 124
A.1 MÊS DE FEVEREIRO 124
A.2 MÊS DE MARÇO 127
A.3 MÊS DE ABRIL 131
A.4 MÊS DE MAIO 134

A.5 MÊS DE JUNHO 138
A.6 MÊS DE JULHO 141
A.7 MÊS DE AGOSTO 145
A.8 MÊS DE SETEMBRO 148
A.9 MÊS DE OUTUBRO 152
A.10 MÊS DE NOVEMBRO 156
A.11 MÊS DE DEZEMBRO 160

1 INTRODUÇÃO

Diversas fontes energéticas estão espalhadas nos cinco continentes do planeta. Muitas delas, entretanto, quando utilizadas em larga escala, prejudicam o meio ambiente. O aumento do efeito estufa, por exemplo, causado pela grande emissão de gás carbônico na atmosfera, provoca o aquecimento da temperatura terrestre, afetando todo o ecossistema do planeta. Devido a esses impactos negativos, várias políticas ambientais têm sido implantadas em todo o mundo com o objetivo de amenizar esses problemas.

Desenvolvimento sustentável tem sido o termo mais utilizado atualmente no que se refere à preservação do meio ambiente. Ele é caracterizado como sendo um desenvolvimento capaz de suprir as necessidades de geração de energia nos dias atuais, sem comprometer as próximas gerações, ou seja, sem esgotar os recursos para o futuro. Essa definição foi estabelecida na Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, proposta pela Organização das Nações Unidas (ONU) para discutir e propor meios para conciliar, de forma harmoniosa, o desenvolvimento e a conservação ambiental (WWF Brasil, 2014).

Outra fonte energética amplamente utilizada em vários países é a nuclear. Apesar de não contribuir com o efeito estufa, ela é a grande responsável pelo lixo nuclear. A França e a Bélgica são exemplos de países alimentados energicamente por meio da fissão nuclear de elementos radioativos. O primeiro, que faz da energia nuclear a sua principal fonte energética, é o país que mais depende desse tipo de energia em todo o mundo. Em 2008, a França produziu 419,8 TWh, correspondendo a 76,2% da energia no país (VEJA, 2011). Um acidente nuclear, ocorrido em março de 2011, que provocou milhares de mortes e alterou até mesmo o campo gravitacional da Terra, segundo a Agência Espacial Europeia, foi o de Fukushima, no Japão (ESA, 2013). Esse tipo de acidente sempre coloca em xeque a utilização desse tipo de energia. Com os prejuízos gerados e acumulados ao meio ambiente e aos seres humanos ao longo dos anos, por meio da utilização de combustíveis energéticos não renováveis, viu-se a necessidade de promover medidas de geração de energia que atendessem às necessidades energéticas e ao bem estar dos indivíduos e do meio ambiente.

Com o intuito de buscar soluções sustentáveis para o uso da energia, muitos esforços estão sendo feitos. Inicialmente, é necessário levar a população a uma consciência ambiental – importância em preservar o meio ambiente –, para, em seguida, buscar soluções energéticas que ajudem no desenvolvimento sustentável (o carvão mineral e a energia nuclear não são mais aceitáveis como antigamente).

Nesse cenário entra a energia eólica. Essa é uma das fontes renováveis de energia que mais se expande no mundo. Ela se utiliza do ar em movimento, ou seja, do vento, para transformar a energia mecânica proveniente do movimento giratório das pás das turbinas – que fazem parte da estrutura mecânica que compõe o sistema eólico – em energia elétrica. A China é o principal país em expansão no setor eólico, com ¼ do potencial eólico mundial e 75,5 GW instalados, correspondendo a 26,8% da participação global e a 30 vezes a capacidade eólica do Brasil – 2,5 GW (GWEC, 2012).

No Brasil, a energia eólica tem se expandido ao longo dos anos e o sistema de microgeração eólica tem sido cada vez mais utilizado. Em Brasília, mais especificamente na Embaixada da Itália, um sistema desse tipo foi implantado com o intuito de captar a energia proveniente do vento, por meio da rotação das pás de cinco turbinas instaladas na laje do edifício da Embaixada. Esse sistema faz parte de um projeto arrojado e inovador, que promove a geração de energia elétrica de forma ecológica e sustentável, atendendo parte das necessidades energéticas do prédio.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é realizar uma estimativa da produção de energia elétrica proveniente do SMGE da Embaixada da Itália em Brasília – DF, além de abordar a geração de energia para outras cidades brasileiras, considerando os seus respectivos potenciais eólicos e os aerogeradores da Embaixada. Tais cidades, além de Brasília, são: Ourinhos – SP, Petrolina – PE, São Martinho da Serra – RS, Belo Jardim – PE, São João do Cariri – PB e Triunfo – PE. Objetiva-se comparar os valores de energia elétrica produzida em cada cidade, com o intuito de analisar em quais delas as turbinas eólicas do SMGE da Embaixada italiana seriam mais bem aproveitadas.

1.2 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é divido em cinco capítulos, cada qual especifica os seus objetivos e suas avaliações e o conjunto contempla o objetivo proposto.

O Capítulo 2 trata, em especial, da revisão bibliográfica. Exemplifica o contexto energético mundial, tratando das principais fontes geradoras de energia e de suas respectivas proporções de uso. Contextualiza a energia eólica no mundo e a sua utilização no Brasil. Traz uma estruturação sobre a geração eólica, mostrando os diversos tipos de aerogeradores usados atualmente. Finaliza abordando o conceito de geração distribuída (GD) e as suas diferentes classificações, mostrando aspectos positivos e negativos de seu uso.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e os métodos utilizados para a concretização do trabalho. Apresenta a Embaixada da Itália, onde o estudo é realizado e as variáveis pertinentes a serem avaliadas. Destaca o Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA), do qual são extraídos os dados da velocidade do vento, que são a base do estudo pretendido. Descreve as etapas do Sistema de Microgeração Eólica (SMGE) da Embaixada italiana e os seus diagramas unifilares. Finaliza apresentando detalhadamente a metodologia empregada para esse estudo.

Com os conhecimentos apresentados nos capítulos anteriores, o Capítulo 4 descreve os diversos resultados obtidos, de acordo com as etapas mostradas na metodologia proposta. Apresenta a análise dos resultados com clareza e riqueza de detalhes, possibilitando que os leitores tenham uma boa compreensão do assunto estudado e que tirem conclusões relacionadas aos aspectos técnicos do SMGE.

O Capítulo 5, por fim, apresenta as conclusões finais e as principais contribuições do estudo realizado e revela algumas sugestões para a elaboração de futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo mostra a distribuição da energia elétrica no mundo, em relação às fontes geradoras, e as principais fontes energéticas utilizadas no Brasil. O conceito de geração distribuída (GD) é abordado neste capítulo com o intuito de se verificar a aplicação de sistemas de microgeração distribuída.

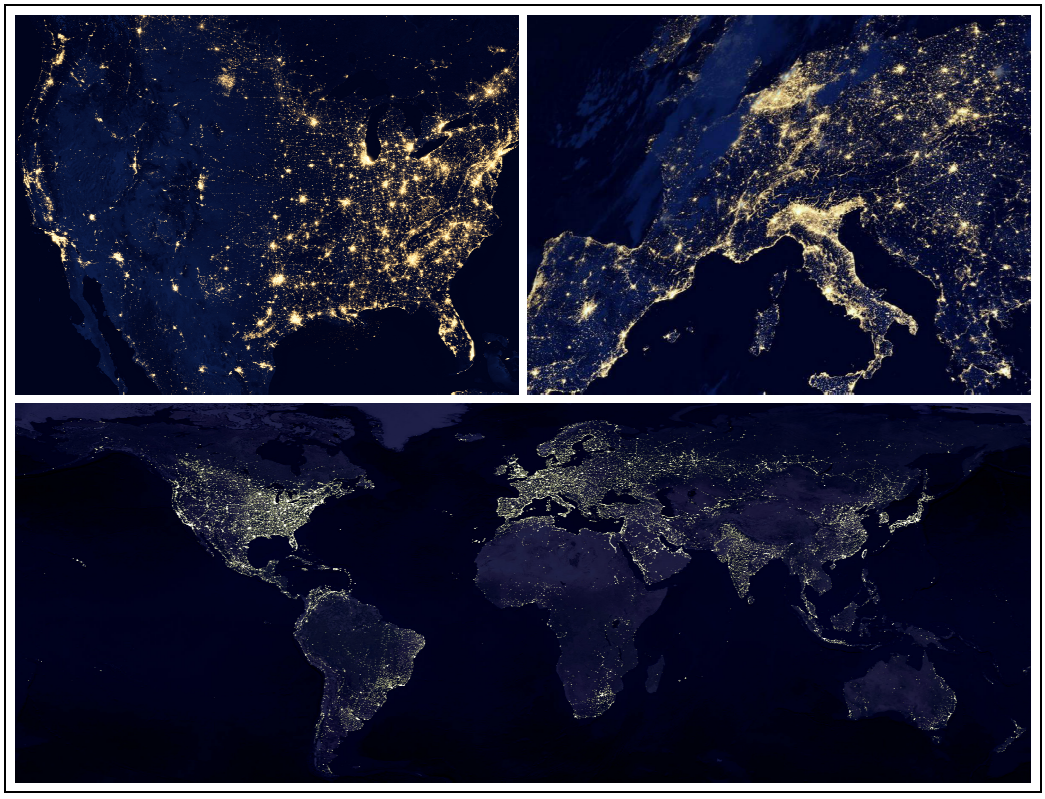
2.2 CONTEXTO ENERGÉTICO MUNDIAL

A eletricidade se tornou, ao longo dos anos, a principal fonte de luz, calor e força usada no mundo moderno. Atividades simples que normalmente são realizadas no dia a dia, como ver televisão, acessar a internet ou ligar o aparelho de som, são possíveis porque a energia elétrica chega até as residências. Supermercados, hospitais, *shoppings*, fábricas e outros lugares precisam dela para funcionar. Grandes avanços tecnológicos só foram alcançados devido à energia elétrica. Obtida por várias fontes de energia, a eletricidade é transmitida e levada aos diversos consumidores em todo o mundo por meio de sistemas elétricos complexos, que são compostos por quatro etapas: geração, transmissão, distribuição e consumo (Eletrobras, 2014).

A evolução da produção energética no mundo ocorreu de forma gradual. O ser humano pré-histórico descobriu o fogo, que se transformou em sua principal fonte de energia, viabilizando o cozimento de alimentos, como a carne de animais; serviu também como iluminação durante as noites, para afastar os predadores. Com o passar do tempo, o ser humano necessitou de novas fontes de energia que pudessem atender um maior contingente populacional. Ele começou, com isso, a usar a força da água como fonte de geração hidráulica, e o ar, por meio dos moinhos de vento, para gerar energia em maior escala. Com a evolução humana e a consequente adaptação das diferentes fontes geradoras de eletricidade, chegou-se nas que se conhece hoje. Essa evolução ocorreu devido à necessidade de se expandir e facilitar os meios para a obtenção da energia, com o intuito de atender um grande número de indivíduos. Esse processo originou várias fontes de energia

que se conhece nos dias de hoje, como: petróleo; carvão mineral e vegetal; gás natural; energia eólica; usinas termoelétricas, hidráulicas e nucleares.

Atualmente, constata-se que ocorreu muita disparidade entre as regiões do planeta durante esse processo de evolução das fontes energéticas. Os países desenvolvidos, que estão localizados, em sua grande maioria, no hemisfério norte da Terra, possuem uma quantidade de tecnologias e recursos elevados, que possibilitaram maior desenvolvimento econômico ao longo da sua história. A Agência Espacial Americana (NASA) divulgou imagens, Figura 2.1, do planeta Terra durante a noite. Vê-se que nos países ricos a quantidade de pontos luminosos é maior, em comparação aos demais. Isso mostra que quanto maior for o desenvolvimento tecnológico de um país, que promove o uso e o aproveitamento das diversas fontes de energia, maior será o acesso de sua população à eletricidade.



Fonte: Agência Espacial Americana (NASA).

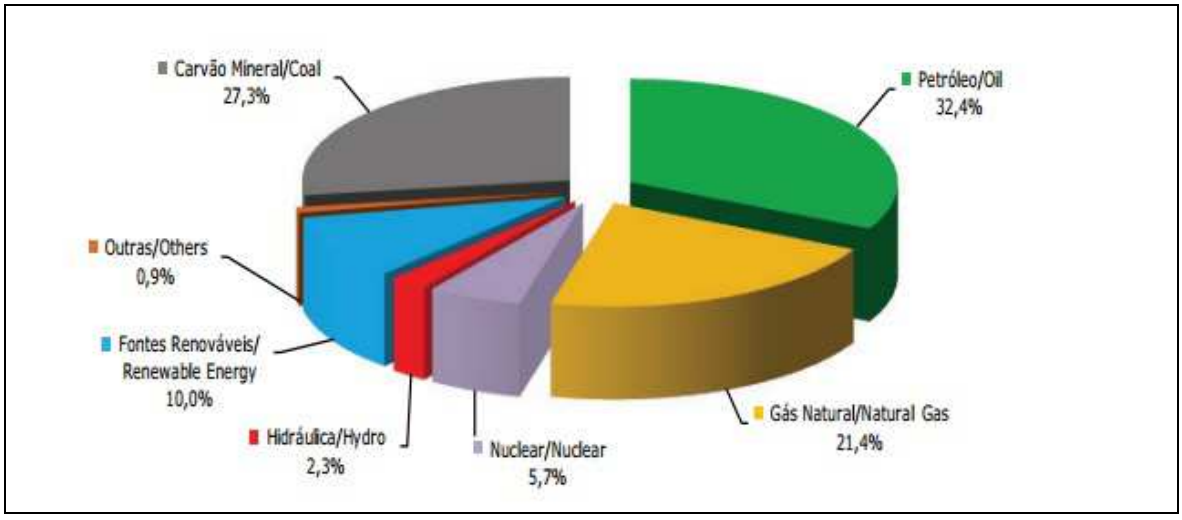
Figura 2.1 *Noite nos Estados Unidos, no continente Europeu e na Terra.*

Muitas fontes de energia são amplamente utilizadas para a geração de eletricidade no mundo. A principal fonte é o petróleo, cujo uso foi e é fundamental para o

desenvolvimento do mundo contemporâneo. Indústrias, veículos e vários produtos oriundos do petróleo fazem parte da vida das pessoas, tais como: gasolina, gás natural, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) – gás de cozinha –, parafina, produtos asfálticos, nafta petroquímica, querosene, solventes, óleo combustível, óleos lubrificantes, óleo diesel e combustível para aeronaves (Petrobras, 2014). Um dos principais problemas do uso do petróleo é o seu alto risco de contaminação ao meio ambiente, principalmente quando entra em contato com as águas dos oceanos e mares ou com a superfície do solo. Vários acidentes já ocorreram em navios cargueiros e em plataformas de petróleo, prejudicando, assim, todo o ecossistema marítimo da região afetada (PÚBLICO, 2013).

Um grave acidente que aconteceu envolvendo aquela fonte primária de energia foi com o petroleiro liberiano Prestige, sendo um dos acidentes mais caros da história, em 13 de novembro de 2002, que transportava 77 mil toneladas de óleo pesado – fuelóleo –; ao largo da Galiza, Espanha. O principal motivo que provocou o naufrágio do petroleiro foi a explosão de um de seus tanques, gerando um rombo de 35 m no casco do navio, durante uma tempestade naquela região, perto do Cabo Finisterra, depois de ter saído da Letônia com destino a Gibraltar, extremo sul da Península Ibérica. O capitão do navio, temendo que o navio afundasse, pediu ajuda a equipe de salvamento espanhol; as autoridades, entretanto, não atentaram para o apelo do capitão. O navio esteve à deriva durante seis dias no oceano Atlântico, apesar das inúmeras tentativas de rebocá-lo. Com isso, o petroleiro se partiu em dois e, depois de 115 horas, ele afundou a 250 km da costa da Galiza, derramando 20 milhões de galões de petróleo no mar. De acordo com o relatório realizado pela *Economist Pontevedra Câmara*, o custo total (material derramado e problemas ambientais) ficou em US$ 12 bilhões. Com o naufrágio, ocorreu o derramamento de 63 mil toneladas de óleo, que afetou 2.933 km de costa, desde Portugal até a França, deixando marcas em 1.177 praias. Em vários meses de trabalho, milhares de voluntários recolheram os resíduos e limparam o combustível que chegou até a costa. Nos três primeiros meses de atuação, após o acidente, foram recolhidas, em Portugal, 439 aves marinhas que haviam sido atingidas pela maré negra, sendo que 186 aves ainda estavam vivas e foram encaminhadas para tratamento. Estima-se que tenham morrido de 115 a 230 mil aves marinhas da região (PÚBLICO, 2013; Portal R7, 2013).

Outra fonte de energia bastante utilizada no mundo é o carvão mineral. Essa é a segunda fonte de energia mais utilizada para obtenção de eletricidade, com uma parcela de 27,3%. Além disso, foi o principal combustível que impulsionou a Revolução Industrial, no século XVIII, na Inglaterra. A primeira fonte de energia mais usada é o petróleo, com 32,4%; como se pode observar no Gráfico 2.1 (Ministério de Minas e Energia, 2014). Com o aumento do custo do petróleo, nos dias atuais, há uma tendência maior de se utilizar o carvão mineral, até mesmo por sua extensa reserva mundial, sendo a China a principal produtora desse minério. O maior problema do uso do carvão mineral está relacionado ao meio ambiente, uma vez que ele é de origem fóssil, não renovável. A queima desse combustível, assim como todos os derivados do carbono, gera o gás carbônico, que é o principal responsável pelo efeito estufa. Além de causar o aquecimento, ele provoca consideráveis mudanças climáticas no planeta (Ministério do Meio Ambiente, 2014).

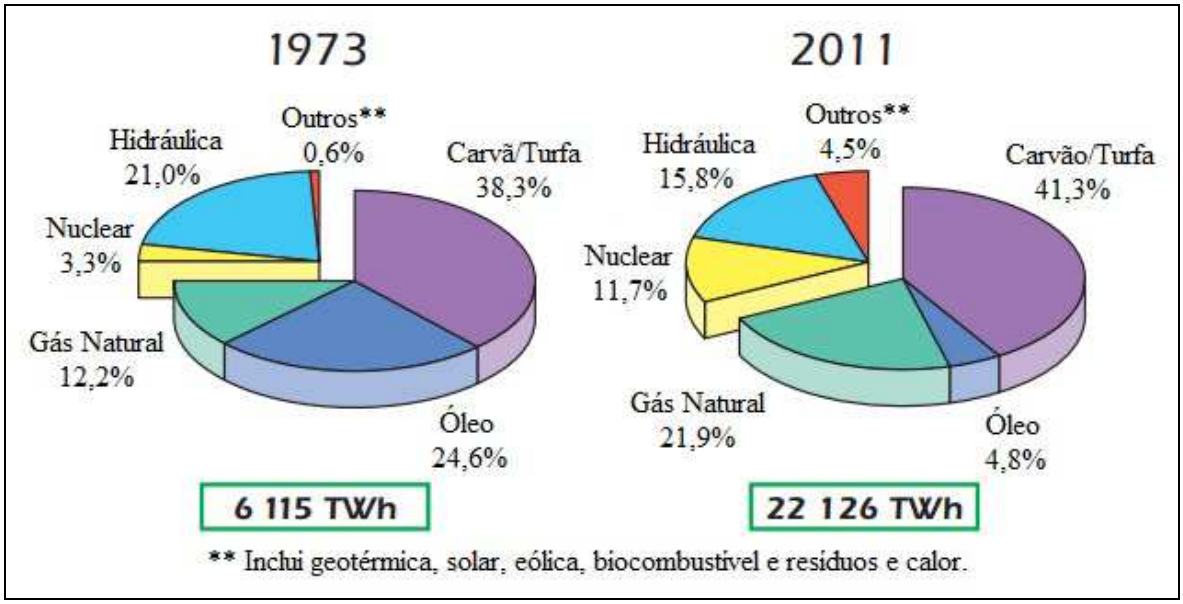


Fonte: Balanço Energético Nacional 2013. (Modificado)

Gráfico 2.1 *Oferta mundial de energia por fonte.*

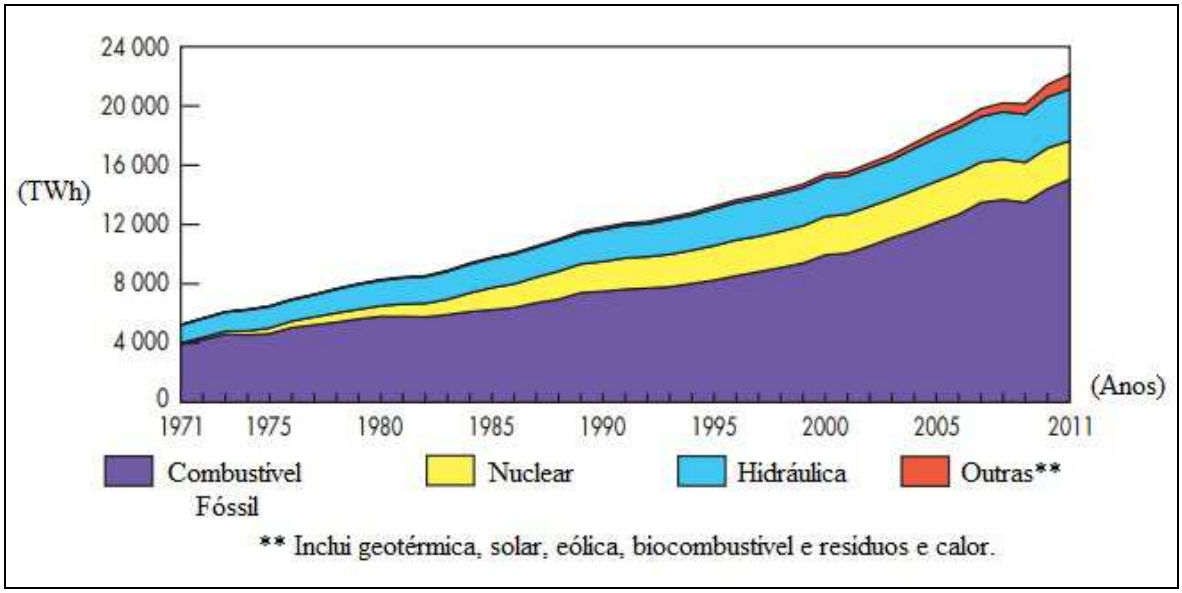
Nas últimas décadas, ocorreu uma mudança mundial no uso das fontes de energia como matéria prima na geração de eletricidade. De 1973 a 2011, as fontes de origem hidráulica e as provenientes do óleo combustível diminuíram, em termos percentuais, passando de 21,0 para 11,8% e de 24,6 para 4,8%, respectivamente. Por outro lado, o carvão/turfa, o gás natural, a nuclear e as demais fontes de energia, como a eólica, cresceram, sendo o gás natural e a nuclear as fontes que mais se destacaram nesse crescimento – a primeira passou de 12,2 para 21,9% e a segunda de 3,3 para 11,7%. Essas mudanças podem ser verificadas no Gráfico 2.2. O Gráfico 2.3 revela a quantidade de energia gerada no mundo por

combustível, em TWh, de 1971 a 2011; complementando, assim, as informações contidas no Gráfico 2.2.



Fonte: International Energy Agency (IEA). Key World Energy. Disponível em: <www.iea.org>. Acesso em: 07 ago. 2014. (Modificado)

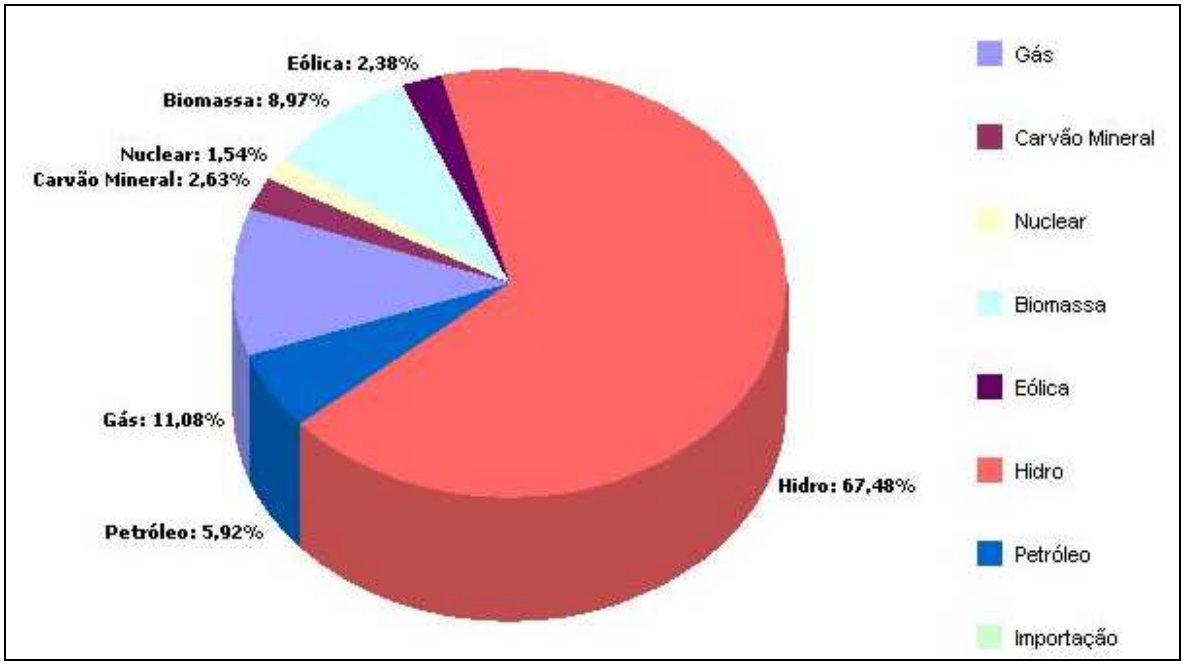
Gráfico 2.2 *Comportamento percentual, nos anos de 1973 e 2011, das fontes empregadas na geração de energia.*



Fonte: International Energy Agency (IEA). Key World Energy. Disponível em: <www.iea.org>. Acesso em: 07 ago. 2014. (Modificado)

Gráfico 2.3 *Geração de energia elétrica no mundo por combustível de 1971 a 2011.*

No Brasil, tem-se um comportamento diferente, em comparação à distribuição mundial, do uso das fontes energéticas. Nesse país há uma grande reserva de água, em sua grande maioria potável, distribuída nos rios, lagos e lençóis freáticos; com isso, o uso da força da água para geração de eletricidade é bastante comum. As usinas hidrelétricas são amplamente utilizadas no Brasil, sendo a usina de Itaipu, localizada no Rio Paraná – fronteira entre o Brasil e o Paraguai –, a principal fonte geradora de energia do país – em 2013 a usina estabeleceu a sua maior produção de energia, atingindo 98.630.035 MWh (ITAIPU Binacional, 2014) –; acompanhada pela usina de Tucuruí, no sudeste do estado do Pará. O Gráfico 2.4 mostra que no Brasil a água, como fonte geradora de eletricidade, corresponde a 67,48%; acompanhada do gás natural com 11,08%.



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Acesso em: 22 maio 2014.

Gráfico 2.4 *Matriz de Energia Elétrica no Brasil.*

Uma das preocupações que surgiu no Brasil e no mundo está relacionada ao uso da energia de forma sustentável, com o intuito de poluir menos o meio ambiente. Com o objetivo de amenizar os danos ambientais causados pela poluição, várias Conferências da Organização das Nações Unidas (ONU) ocorreram, abordando temas como as “mudanças climáticas” desencadeadas no planeta. Uma das soluções sugeridas foi o incentivo do uso das fontes renováveis de energia, como a biomassa, a solar e a eólica, para diminuir esses danos ambientais. Tratando da energia eólica, ela corresponde a 2,38% da matriz energética do

Brasil, de acordo com o Gráfico 2.4. Isso revela que o uso do vento para a geração de eletricidade não é muito explorado.

2.3 ENERGIA EÓLICA

Pode-se definir energia renovável como: “aquela originada de fontes naturais que possuem a capacidade de regeneração (renovação), ou seja, não se esgotam. Neste sentido, a energia eólica fundamenta sua sustentabilidade na taxa de utilização que é inferior à sua taxa de renovação e no baixo impacto ambiental” (Brasventos, 2014).

2.3.1 Contexto Mundial da Energia Eólica

Produzida a partir da força dos ventos, a energia eólica está disponível de forma abundante. É renovável, limpa e, em muitos lugares, pode-se ter acesso a ela. A energia elétrica proveniente do vento é gerada por meio das turbinas eólicas, onde a força do movimento do ar é captada pelas pás dos aerogeradores. Essas turbinas estão conectadas aos geradores elétricos, que são acionados quando as pás são sensibilizadas pelo vento. Muitos fatores estão relacionados à quantidade de energia que é transferida, tais como: densidade do ar, área coberta pela rotação das pás eólicas e velocidade do vento.

Para se ter uma avaliação técnica do potencial eólico de determinada região, é necessário ter um conhecimento bem detalhado do comportamento dos ventos. A velocidade e a direção do vento são a base dos dados relativos à avaliação do potencial eólico daquela região. Eles irão auxiliar os estudos preliminares para uma possível instalação de um aerogerador, ou de uma usina eólica, naquele local. Muitos outros fatores influenciam na determinação desses dados – que são necessários para avaliar o regime dos ventos na localidade do empreendimento. Esses fatores podem ser: relevo do local, a rugosidade do solo e outros obstáculos que propiciam influência no deslocamento do vento ao longo da região (Ministério do Meio Ambiente, 2014).

Para que a energia eólica seja utilizada em larga escala, é necessário que ela seja tecnicamente aproveitável. É preciso que a intensidade do vento seja maior ou igual a 500 W/m², a uma altura de 50 m, o que requer uma velocidade mínima dos ventos de 7 a 8 m/s

(GRUBB; MEYER, 1993). Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, o vento apresenta uma velocidade média igual ou superior a 7 m/s, de acordo com a altura mencionada anteriormente, em apenas 13% da superfície da Terra. Essa avaliação varia bastante, dependendo da região e dos continentes analisados; na Europa Ocidental chega a 32%, que é muito pertinente para o aproveitamento do potencial eólico no espaço europeu.

A Tabela 2.1 mostra a distribuição da área, km², de cada continente de acordo com a velocidade do vento, a uma altura de 50m. Já na Tabela 2.2, pode-se verificar uma estimativa do potencial eólico em diversas localidades da Terra. Nessa última tabela, tem-se a porcentagem de terra ocupada do planeta; o potencial bruto (quantidade de energia disponível a ser aproveitada durante o ano), em TWh/ano; a densidade demográfica, em habitantes/km², e o potencial líquido (quantidade de energia que realmente é usufruída durante o ano), em TWh/ano.

Tabela 2.1 *Distribuição da área de cada continente segundo a velocidade média do vento.*

Região/Continente	**Velocidade do Vento (m/s) a 50m de Altura**					
	6,4 a 7,0		7,0 a 7,5		7,5 a 11,9	
	(10^3 km²)	(%)	(10^3 km²)	(%)	(10^3 km²)	(%)
África	3.750	12	3.350	11	200	1
Austrália	850	8	400	4	550	5
América do Norte	2.550	12	1.750	8	3.350	15
América Latina	1.400	8	580	5	950	5
Europa Ocidental	345	8,6	416	10	371	22
Europa Ocidental & ex-URSS	3.377	15	2.260	10	1.146	5
Ásia (excluído ex-URSS)	1.550	6	450	2	200	5
Mundo	13.650	10	9.550	7	8.350	6

Fonte: GRUBB, M. J; MEYER, N. I. Wind energy: resources, systems and regional strategies. In: JO-HANSSON, T. B. et. al. Renewable energy: sources for fuels and electricity. Washington, D.C.: Island Press, 1993. p. (modificada)

O uso da energia eólica, em escala comercial e como fonte de geração de eletricidade, iniciou na década de 1970, quando começaram as crises internacionais do petróleo. Com isso, os Estados Unidos da América e a Europa se interessaram pelo desenvolvimento de fontes alternativas de energia, no intuito de diminuir a dependência do uso do petróleo e do carvão mineral como suas principais fontes para a geração de eletricidade. Atualmente, os

Estados Unidos possuem um dos maiores parques eólicos do mundo, com uma capacidade eólica de 60 GW e com uma participação global de 21,2%, no ano de 2012, segundo o Centro de Estratégias em Recursos Naturais & Energia (CERNE, 2014).

Tabela 2.2 *Estimativas do potencial eólico mundial.*

Região/Continente	Porcentagem de terra ocupada	Potencial Bruto (TWh/ano)	Densidade Demográfica (hab/km²)	Potencial Líquido (TWh/ano)
África	24	106.000	20	10.600
Austrália	17	30.000	2	3.000
América do Norte	35	139.000	15	14.000
América Latina	18	54.000	15	5.400
Europa Ocidental	42	31.400	102	4.800
Europa Ocidental & ex-URSS	29	106.000	13	10.600
Ásia (excluído ex-URSS)	9	32.000	100	4.900
Mundo**	23	498.400	*	53.000

Fonte: GRUBB, M. J; MEYER, N. I. Wind energy: resources, systems and regional strategies. In: JOHANSSON, T. B. et. al. Renewable energy: sources for fuels and electricity. Washington, D.C.: Island Press, 1993. (modificada)
(*) Em relação ao potencial bruto;
(**) Excluindo-se Groenlândia, Antártida, a maioria das ilhas e os recursos *offshore*;
(18) Existência de áreas densamente povoadas e/ou industrializadas e outras restrições naturais, como regiões muito montanhosas, por exemplo.

No Gráfico 2.5 verifica-se que o país que possui o maior parque eólico instalado é a China, com 75,5 GW, contribuindo com um total de 26,8% da potência eólica instalada no mundo. Outro país que merece destaque na produção de energia eólica é a Alemanha. Esta está em terceiro lugar, com 31,3 GW, em relação à quantidade de parque eólico instalado, correspondendo a 11,1% do total global. Além disso, constata-se o acumulado mundial, que corresponde a 282 GW de potência eólica instalada. Já no Gráfico 2.6 tem-se o crescimento do parque eólico mundial de 1996 a 2012, sendo que nos anos de 2011 e 2012 ocorreu um crescimento de 18,7%, chegando em 2012 com 284,4 GW de potência.



Fonte: Centro de Estratégias em Recursos Naturais & Energia 2014 (CERNE).

Gráfico 2.5 *Os 10 países com os maiores parques eólicos do mundo e as suas contribuições.*



Fonte: Centro de Estratégias em Recursos Naturais & Energia 2014 (CERNE).

Gráfico 2.6 *Crescimento do Parque Eólico Mundial.*

2.3.2 Energia Eólica no Brasil

No Brasil, a energia eólica já está sendo utilizada em grande escala; sendo que as grandes centrais eólicas instaladas no país já estão conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Essas usinas eólicas estão atendendo comunidades e sistemas elétricos isolados; além disso, determinadas regiões do país são supridas energeticamente pelas pequenas centrais eólicas, contribuindo, assim, para a universalização do atendimento da energia. Já em relação à localidade para a instalação das usinas eólicas, há duas maneiras: pode ser feita em solo, em terra firme (*on-shore*), ou no mar (*off-shore*). A predominância, no Brasil, é em solo e a Região Nordeste é a que possui a maior quantidade de usinas instaladas (Ministério do Meio Ambiente, 2014).

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2013, a energia eólica foi a que mais cresceu, proporcionalmente, em potencial instalado no Brasil; com uma evolução de 32,8%, de 2.011 (1.426 MW) a 2.012 (1.894 MW). Já as energias hidrelétrica, térmica e nuclear cresceram, respectivamente: 2,2; 4,9 e 0,0%, no mesmo período correspondente. Na Tabela 2.3 constatam-se os valores da capacidade instalada, em MW, e o crescimento, nos anos de 2011 e 2012, dessas fontes de energia.

Tabela 2.3 *Capacidade instalada das fontes energéticas mais utilizadas no Brasil.*

Capacidade Instalada (MW)			
Fonte	**2012**	**2011**	**% 12/11**
Hidrelétrica	84.294	82.459	2,2%
Térmica[1]	32.778	31.243	4,9%
Nuclear	2.007	2.007	0,0%
Eólica[2]	1.894	1.426	32,8%
Capacidade disponível	120.973	117.135	3,3%
[1] Inclui biomassa, gás, petróleo e carvão mineral [2] Inclui solar			

Fonte: Balanço Energético Nacional 2013. (modificada)

Na Tabela 2.4 e no Gráfico 2.7, vê-se a evolução da geração eólica entre os anos de 2006 e 2012. Essa geração apresentou um crescimento de 86,7%, passando de 2.705 a 5.050 GWh

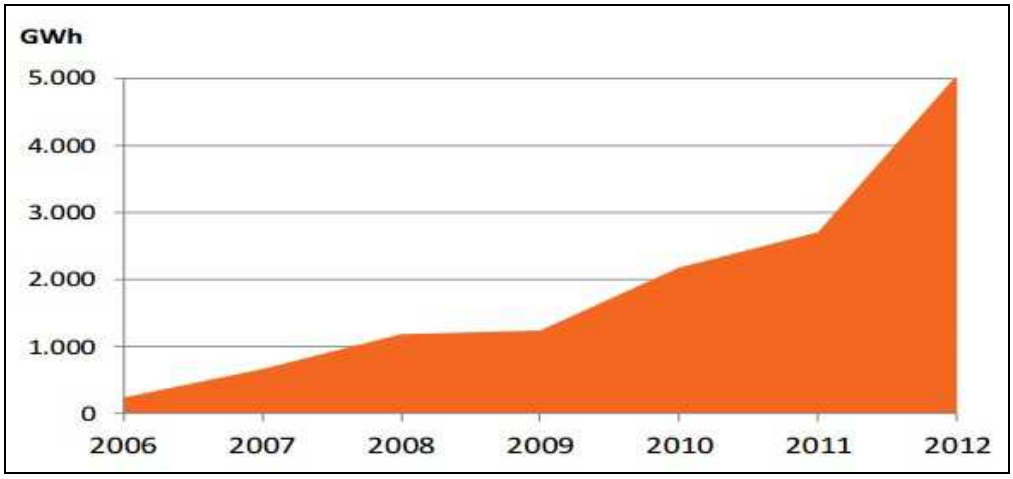
de energia produzida (2011 a 2012). A tabela e o gráfico também constatam, em GWh, a geração de energia eólica em cada ano no período citado acima.

Tabela 2.4 *Evolução da matriz eólica no Brasil.*

Evolução da Geração Eólica (em GWh)							
2006	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**Δ% 2012/2011**
237	663	1.183	1.238	2.177	2.705	5.050	86,7%

Fonte: Balanço Energético Nacional 2013 (modificada).

O Brasil possui 3.067.780 kW de capacidade instalada de energia eólica, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), decorrentes de 145 usinas que estão em operação. Essa capacidade corresponde a 2,24% de toda potência instalada no país. Na Tabela 2.5 verificam-se esses dados.



Fonte: Balanço Energético Nacional 2013.

Gráfico 2.7 *Crescimento da geração eólica no Brasil.*

A energia eólica é uma alternativa energética importante para a geração de eletricidade no Brasil. O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro de 2001, elaborado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), revela que o potencial eólico bruto no Brasil é de 143,5 GW. A região que possui maior potencial de energia é o Nordeste, com cerca de 144,26 TWh/ano, seguida pela região Sudeste com 54,93 TWh/ano e pela região Sul com 41,11 TWh/ano. Essas são as regiões que possuem potenciais eólicos satisfatórios para serem aproveitados em grande escala na geração de eletricidade. Na Figura 2.2, verifica-se

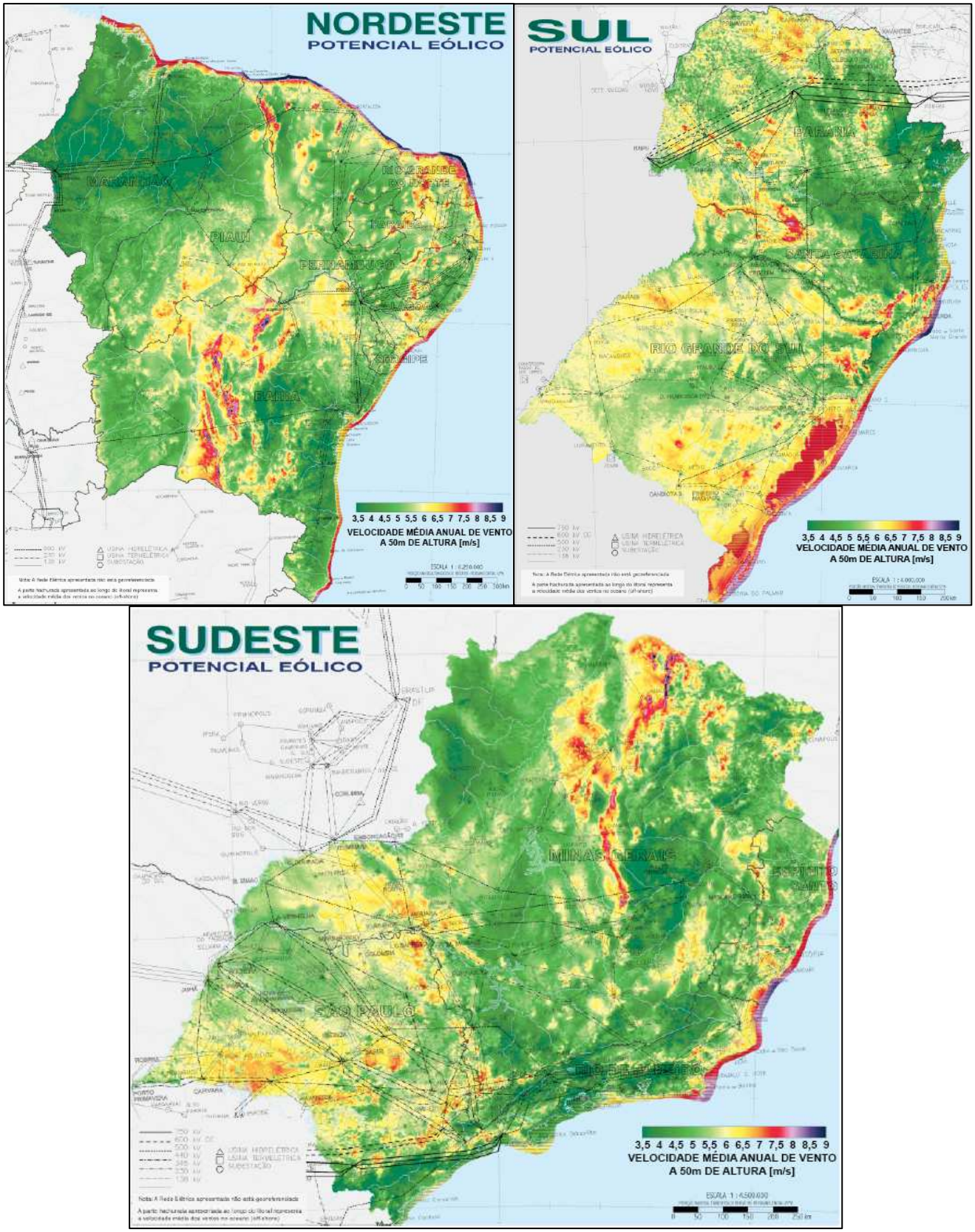
o potencial eólico das regiões Nordeste, Sul e Sudeste. Já na Figura 2.3, vê-se o potencial eólico das Regiões Centro-Oeste e Norte, que é considerado baixo para a geração de eletricidade.

Na Região Centro-Oeste está localizada a cidade de Brasília, Distrito Federal, onde se localiza a Embaixada da Itália, que é estudada no Capítulo 3. Por fim, na Figura 2.4, constata-se as características de cada localidade do Brasil em relação ao potencial eólico.

Tabela 2.5 *Matriz de energia elétrica no Brasil.*

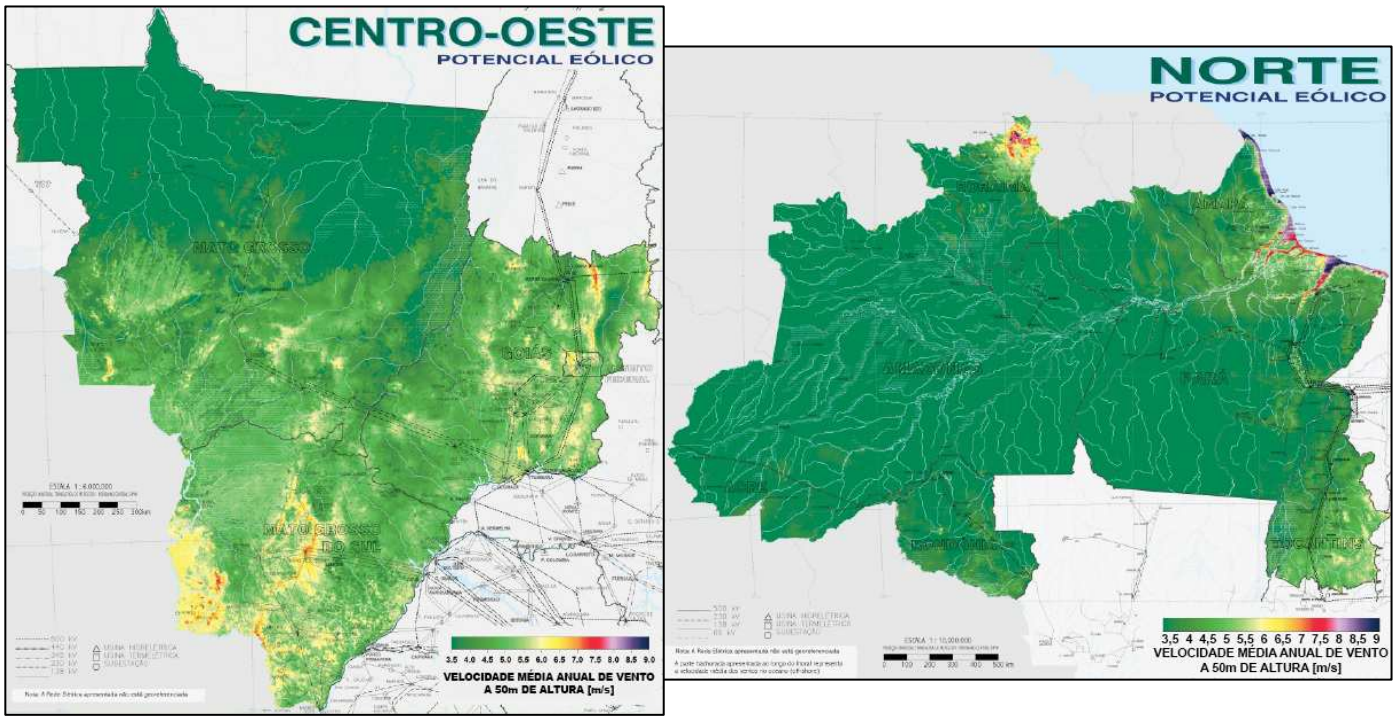
Empreendimentos em Operação							
Tipo		**Capacidade instalada**		**%**	**Total**		**%**
		N.º de Usinas	**(kW)**		**N.º de Usinas**	**(kW)**	
Hidro		1.108	86.918.788	63,44	1.108	86.918.788	63,44
Gás	Natural	116	12.534.521	9,15	157	14.281.944	10,42
	Processo	41	1.747.423	1,28			
Petróleo	Óleo Diesel	1.143	3.546.135	2,59	1.176	7.629.748	5,57
	Óleo Residual	33	4.083.613	2,98			
Biomassa	Bagaço de Cana	378	9.338.926	6,82	481	11.555.513	8,43
	Licor Negro	17	1.657.582	1,21			
	Madeira	53	437.635	0,32			
	Biogás	24	84.937	0,06			
	Casca de Arroz	9	36.433	0,03			
Nuclear		2	1.990.000	1,45	2	1.990.000	1,45
Carvão Mineral	Carvão Mineral	13	3.389.465	2,47	13	3.389.465	2,47
Eólica		145	3.067.780	2,24	145	3.067.780	2,24
Fotovoltaíca		107	9.354	0	107	9.354	0
Importação	Paraguai		5.650.000	5,46		8.170.000	5,96
	Argentina		2.250.000	2,17			
	Venezuela		200.000	0,19			
	Uruguai		70.000	0,07			
Total		3.191	137.016.942	100	3.191	137.016.942	100

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Acesso em: 22 maio 2014. (modificada)



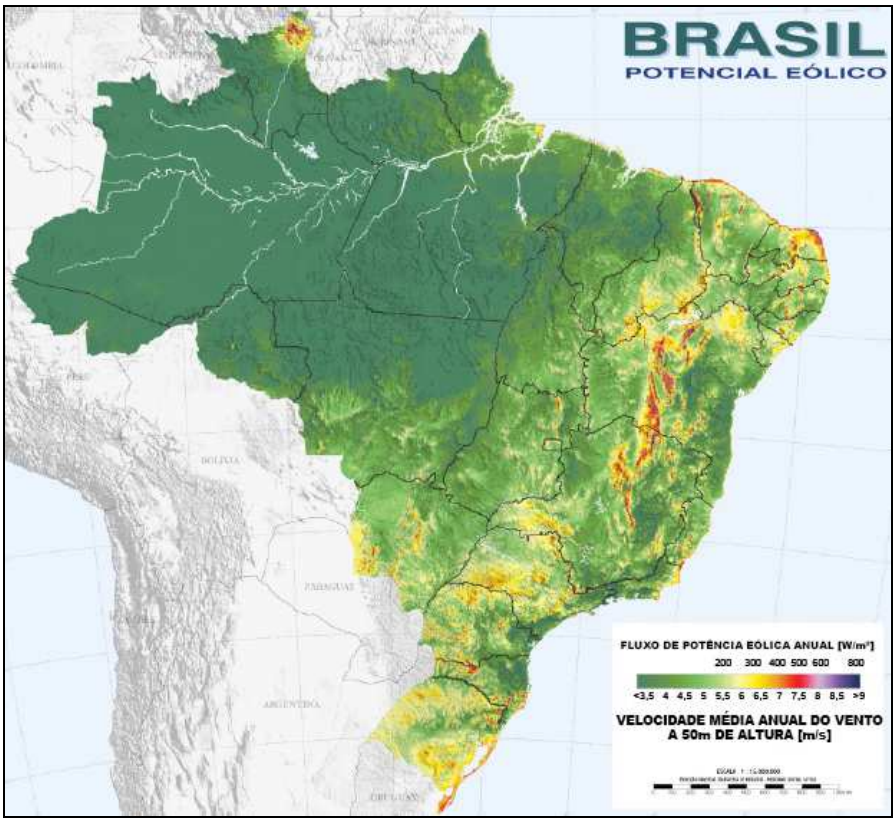
Fonte: (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001). (modificada)

Figura 2.2 *Velocidade média anual de vento a 50m de altura das Regiões Nordeste, Sul e Sudeste.*



Fonte: (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001). (modificada)

Figura 2.3 *Velocidade média anual de vento a 50m de altura das Regiões Centro-Oeste e Norte.*



Fonte: (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001). (modificada)

Figura 2.4 *Velocidade média anual do vento a 50m de altura no Brasil.*

2.4 GERAÇÃO EÓLICA

2.4.1 O Vento

O vento é gerado no deslocamento de massas de ar, sendo que esse fenômeno é caracterizado como uma consequência do movimento do ar de um ponto de maior pressão para um ponto de menor pressão. Os elementos principais que influenciam na pressão atmosférica são a altitude e a temperatura. As zonas de baixa altitude são regiões de alta pressão atmosférica, enquanto as de elevada altitude são de baixa pressão. A radiação solar que incide sobre a superfície terrestre ocorre de forma desigual, criando diferentes zonas térmicas e diversas regiões de alta e baixa pressão atmosférica. As áreas com temperaturas mais altas formam zonas de baixa pressão; onde o ar quente, por ser menos denso, está em constante ascensão, podendo, dessa forma, atingir altitudes de até 10 km.

Por ser um fenômeno natural estocástico[1], o vento possui uma velocidade que obedece a uma função de distribuição de probabilidade. A Distribuição de Weibull é a que melhor demonstra o padrão comportamental dos ventos (BARROS e TRAJANO, 2009); essa Distribuição é mostrada a seguir:

$$f(v) = \frac{k}{c} * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] \qquad (2.1)$$

em que *k* é dito como fator de forma. Além de ser adimensional, ele depende da variância dos dados em comparação à média; e *c* é o fator de escala e está relacionado com a velocidade média dos dados coletados, expressa em m/s. Tem-se também *v*, que é a média aritmética de todos os valores das velocidades coletadas (PEREIRA, 2013).

Na Expressão 2.1 o valor de $k = 2$ é assumido quando não se conhece as características da região onde se pretende avaliar o comportamento do vento. Essa nova representação da

[1] Padrões estocásticos são aqueles que possuem origem em eventos aleatórios, ou seja, são aqueles que não têm origem determinística. Vale citar como exemplo, o arremesso de um dado; que se caracteriza em um processo estocástico, pois qualquer uma das seis faces do dado tem iguais probabilidades ficar voltada para cima, quando lançado (DEBASTIANI, 2008).

função de distribuição recebe o nome de Distribuição de Raylegh, que corresponde a uma variação da Distribuição de Weibull, e é mostrada a seguir:

$$c = \frac{2}{\pi} * \bar{v} \tag{2.2}$$

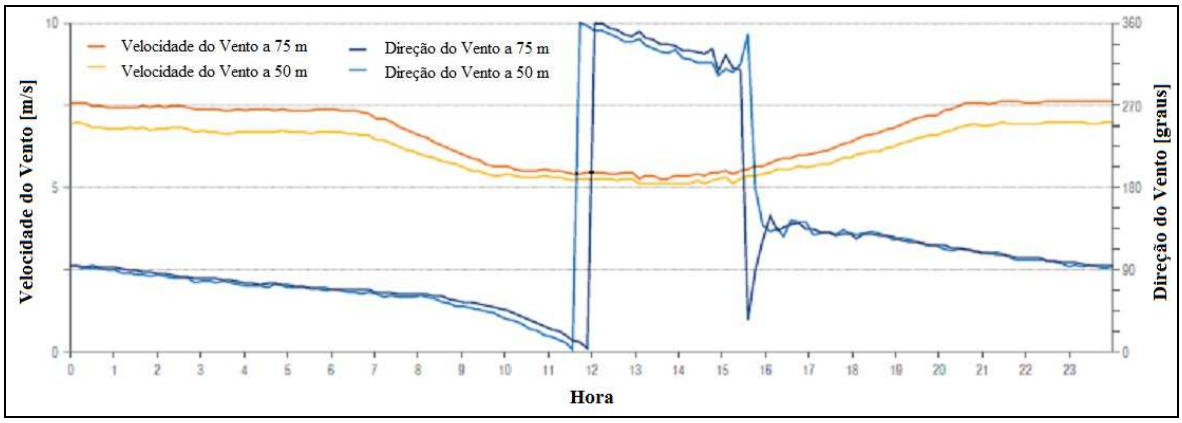
Quando k = 3,5 a função de distribuição é chamada de Distribuição Normal.

Tome-se como exemplo o município de São Roque, situado no Estado de São Paulo, na Região Metropolitana de Sorocaba, para fazer uma representação da Distribuição de Weibull. Em uma coleta de dados realizada na torre anemométrica ASP07, cuja altura é de 75m, no período de 10/04/2010 a 09/04/2011, constatou-se um comportamento curioso da variação diária média da velocidade do vento e também da sua direção. Notou-se que há uma queda na velocidade do vento no intervalo entre 7 e 21h, passando de 7,5 a 5 m/s – valores aproximados –; em relação à direção do vento constatou-se que sofre uma brusca variação no período das 12 às 19h (Atlas Eólico do Estado de São Paulo, 2012). Com o auxílio da Tabela 2.6 e do Gráfico 2.8, pode-se verificar o comportamento da velocidade do vento e de sua direção durante um dia de coleta dos dados.

Tabela 2.6 *Parâmetros pertinentes na avaliação realizada.*

Parâmetros Eólicos	**50 m**	**75 m**
Velocidade Média	6,13 m/s	6,61 m/s
Desvio Padrão	0,58 m/s	0,64 m/s
Fator de Forma de Weibull, *k*	2,79	2,71
Fator de Escala de Weibull, *c*	6,88 m/s	7,42 m/s
Parâmetros Meteorológicos		
Temperatura Média	17,8 ºC	
Umidade Relativa do Ar Média	78,7%	
Pressão Atmosférica Média	897 mbar	
Taxa de Dados Válidos	**Altura**	**%**
Anemômetro	50 m	97,89%
Anemômetro	75 m	97,89%
Sensor de Direção	50 m	97,89%
Sensor de Direção	75 m	97,89%

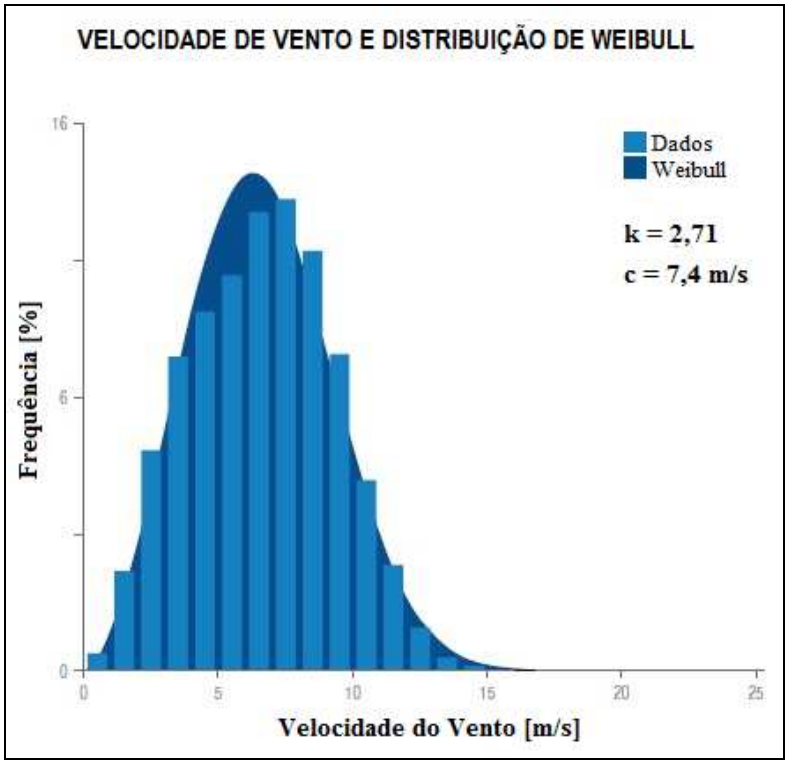
Fonte: (Atlas Eólico do Estado de São Paulo, 2012). (modificada)



Fonte: (Atlas Eólico do Estado de São Paulo, 2012). (modificado)

Gráfico 2.8 *Variação diária média de velocidade e de direção do vento.*

Baseado nesse contexto de análise mencionado acima, pode-se representar a Distribuição de Weibull, que é vista no Gráfico 2.9. Essa Distribuição é também baseada na Tabela 2.6 e na Expressão 2.1.



Fonte: (Atlas Eólico do Estado de São Paulo, 2012). (modificado)

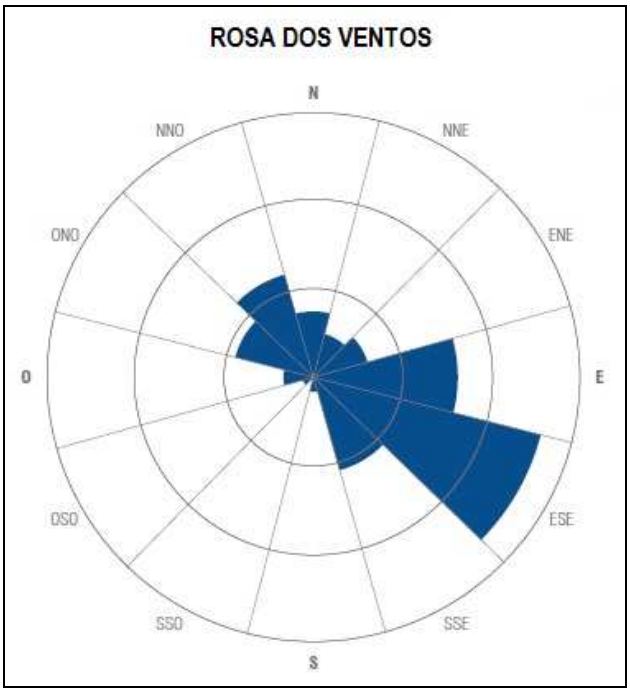
Gráfico 2.9 *Função de Distribuição de Probabilidade de Weibull.*

Outro aspecto fundamental para analisar o vento, além da sua velocidade, é a sua direção. Esse também é um importante fator a ser avaliado na geração de eletricidade. A rosa dos

ventos, como é conhecida, é o gráfico mais utilizado para determinar a direção dos ventos. É fundamental ter o conhecimento de tal aspecto para determinar a otimização do aproveitamento da energia e consequentemente a sua maximização na geração de energia elétrica.

“O conhecimento da rosa dos ventos de um local é importante para o projeto do arranjo geométrico do parque eólico, isto é, para localização dos aerogeradores, assim, como para o cálculo do desempenho do parque eólico. O gráfico da distribuição de frequência de ocorrência de direção de vento – rosa dos ventos – apresenta a frequência percentual de ocorrência do vento por setores de direções, neste caso, representados por 12 setores de 30º” (Atlas Eólico do Estado de São Paulo, 2012).

Na Figura 2.5 vê-se a rosa dos ventos do município de São Roque, que mostra as possíveis direções do vento. Nota-se que as barras maiores representam as direções que acontecem com maior frequencia. Essas direções necessitam ser priorizadas para ter um melhor aproveitamento do potencial eólico da região. Outro detalhe importante para verificar é se tais direções possuem muitos obstáculos, pois estes interferem no bom aproveitamento do vento para a geração de eletricidade (PEREIRA, 2013).



Fonte: (Atlas Eólico do Estado de São Paulo, 2012). (modificada)

Figura 2.5 *Representação das direções do vento.*

2.4.2 Potência Gerada pela Força do Ar

Há um método para encontrar a potência gerada pelos cata-ventos e pelas turbinas eólicas. Esse método é expresso de forma teórica; na prática, entretanto, não se consegue converter toda a potência gerada em potência útil. A taxa de conversão, descoberta por Betz em 1926, é de aproximadamente 16/27 ou 59% da potência disponível – limite de Betz –, quando o sistema eólico funciona de forma otimizada (BARROS e TRAJANO, 2009).

Sabe-se que toda energia cinética proveniente do vento – a soma de todas as energias das partículas do ar atmosférico – é a que promove a energia eólica. É a partir dessa energia que se pode avaliar e medir a potência do vento. Por meio de uma demonstração matemática, chega-se na expressão que fornece o fluxo de potência do vento.

Considere uma massa de ar *m*, com uma velocidade *v*, que flui através de uma área *A*, correspondente à varredura de uma turbina com formato circular. Para essa massa, a energia eólica a ela associada é dada pela Equação 2.3.

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2 \tag{2.3}$$

E = Energia [J];
m = Massa de ar [Kg];
v = Velocidade do vento [m/s].

Já a potência dessa massa de ar é dada pela derivada da energia em relação ao tempo:

$$P = \dot{E} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} * \dot{m} * v^2 \tag{2.4}$$

P = Potência [W];
$\dot{E}$ = Fluxo de Energia [J/s];
$\dot{m}$ = Fluxo de massa de ar [kg/s].

Tem-se também que o fluxo de massa de ar é expresso da seguinte forma:

$$\dot{m} = \rho * v * A_t \tag{2.5}$$

ρ = massa específica do ar [kg/m³];

A_t = Área da seção transversal [m²].

Finalmente, substituindo a Equação 2.4 na Equação 2.5, encontra-se a expressão correspondente ao fluxo de potência disponível no vento para certa área *A* – área varrida pelas hélices do rotor da turbina eólica –, que é dada a seguir:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \tag{2.6}$$

em que ρ é mensurado em uma média de 1,225 kg/m³.

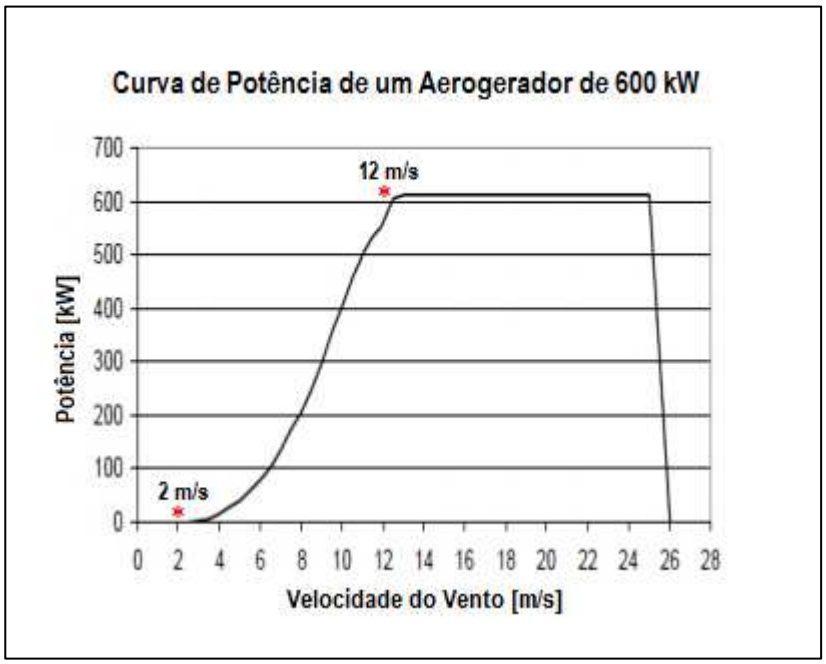
A análise da Equação 2.6 é de fundamental importância para o conhecimento do aproveitamento da energia eólica. Tomando como exemplo um vento que possui uma velocidade de 10 km/h e passa, a seguir, a uma velocidade de 11 km/h, tem-se um aumento de 10% na sua velocidade. Verifica-se, dessa maneira, que a potência se eleva em 33% (PINTO, 2013). Isso mostra como é fundamental a escolha do lugar onde se pretende instalar um parque de geração eólica, pois é importante que o vento, na região almejada para a instalação, apresente uma velocidade alta para se ter um bom aproveitamento dessa energia. Outro exemplo que pode ser avaliado é sobre a área varrida pelos rotores das turbinas. Com uma hélice de 3m de diâmetro e um vento com velocidade de 32 km/h tem-se uma potência de 1.000 W. Passando o diâmetro dessa hélice para 6m, ou seja, dobrando a sua dimensão e mantendo a velocidade de 32 km/h a potência irá para 4.000 W. Isso acontece porque a área varia com o quadrado do raio, assim, dobrando-se a área do rotor há um aumento de quatro vezes na potência gerada.

Na prática, o rendimento de conversão de uma turbina eólica varia de 40 a 50% – oscilando de acordo com a turbina avaliada. Comparado a outras fontes geradoras de energia, esse intervalo é considerado satisfatório (PINTO, 2013). Tem-se, por exemplo, que o rendimento de uma célula fotovoltaica é estimado entre 12 e 18% e, em uma máquina térmica, o aproveitamento chega a 30% (PEREIRA, 2013).

Na turbina eólica, há um comportamento importante chamado de valores de *cut-in* e *cut-off*, que estão relacionados à potência fornecida e à proteção do sistema eólico. Esses

valores correspondem, respectivamente, ao valor da velocidade de vento em que uma turbina começa a produzir energia e ao valor no qual a turbina mantém a produção, mesmo que a intensidade de vento se torne maior (PEREIRA, 2013). Geralmente, o *cut-in* está relacionado a uma limitação física do equipamento e o *cut-off* corresponde a um mecanismo de proteção da máquina – evitando a danificação do gerador, dimensionado para um determinado tamanho (PINTO, 2013).

O Gráfico 2.10 mostra um exemplo de curva de potência de uma turbina eólica em função da velocidade do vento. Nesse gráfico encontram-se os valores de *cut-in* e *cut-off*, que estão, respectivamente, em torno de 2 e 12 m/s. Esses valores estão associados a um aerogerador de 600 kW de potência nominal, cujas pás possuem 44m de diâmetro.



Fonte: UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Disponível em: <www2.ufer-sa.edu.br/portal/view/uploads/setores/178/arquivos/Fontes%20Alternativas/atividade_sit_eolicos.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2014. (modificado)

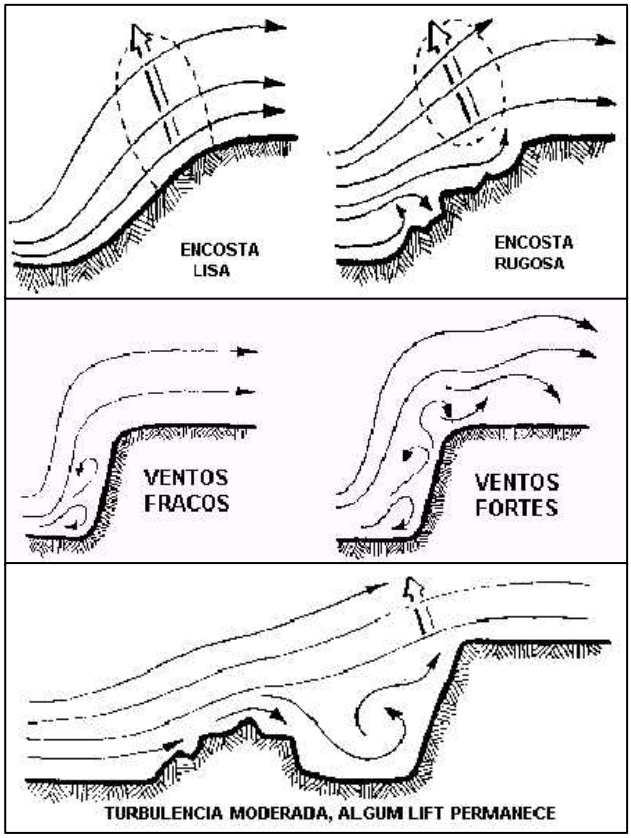
Gráfico 2.10 *Curva característica de potência de uma turbina eólica.*

2.4.3 Avaliação do Terreno

A topografia de um terreno influencia o uso da energia eólica e é de suma importância que seja avaliada antes de qualquer idealização de determinado projeto eólico na região. Essa influência pode ser vista da seguinte forma: quando as correntes de ar entram em contato

com as diversas superfícies, elas sofrem atritos, o que gera uma força oposta ao fluxo de ar incidente e decrescente em relação à altura até um determinado ponto, que é chamado de camada-limite – as altitudes que estão além desse ponto recebem o nome de atmosfera livre, sendo a altura ideal para um bom funcionamento da turbina eólica (PINTO, 2013).

Os obstáculos localizados nas proximidades do terreno avaliado estão diretamente relacionados à camada-limite, pois o vento, ao passar por um desses obstáculos, sofre turbulência, que altera as características da corrente de ar nesse local. Assim, há uma influência sobre o vento, causada por um dos parâmetros do terreno – a rugosidade. Essa está relacionada diretamente ao coeficiente de atrito do terreno. Antes de realizar um projeto, esse parâmetro deve ser estudado.



Fonte: AERO ONLINE. Disponível em: <www.aeronline.com.br/artigo/lift.htm>. Acesso em: 15 jun. 2014.

Figura 2.6 *Comportamento do vento ao passar por alguns obstáculos.*

Na Figura 2.6 constata-se o comportamento do vento ao passar por determinados tipos de obstáculos. Para uma turbina eólica, é fundamental que ela esteja a uma altura adequada,

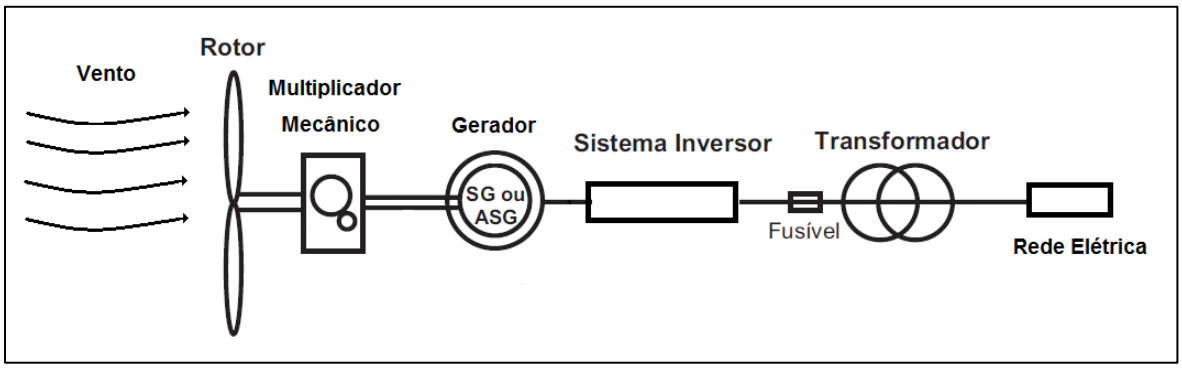
além de estar posicionada de forma a ficar livre desses obstáculos, com o intuito de ter um bom aproveitamento na geração da energia. Estima-se, dessa maneira, a velocidade do vento, v_2, a certa altura e o padrão dessa velocidade no ponto avaliado – tomada como base uma determinada altura conhecida, h_1, em que se sabe a velocidade do vento, v_1. Na Equação 2.7 encontra-se essa relação:

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{\alpha} \tag{2.7}$$

em que α é o coeficiente de atrito, também chamado de coeficiente de Hellman – varia entre 0,05 e 0,6 (de acordo com a região) –, a velocidade v_1 e a altura h_1 são os valores já conhecidos, e h_2 é a altura desejada (PEREIRA, 2013).

2.4.4 Turbinas Eólicas

O aproveitamento da energia cinética contida no ar atmosférico corresponde ao processo da geração eólica. A transformação, ou conversão, dessa energia em eletricidade é realizada por meio de turbinas eólicas, também denominadas de aerogeradores. Esse processo de conversão de energia é caracterizado da seguinte forma: o vento incide nas pás do rotor, movimentando-o; este rotor está conectado a um multiplicador mecânico, cuja função é transferir a energia mecânica, gerada na rotação das pás eólicas, para o gerador – acoplado ao eixo do rotor da turbina –; onde a energia mecânica é transformada em energia elétrica. Depois dessa conversão, é necessário que a corrente elétrica gerada passe por um sistema retificador, por um sistema inversor, cuja frequência é controlada a um valor definido, e por um transformador, onde ocorre a alteração da tensão elétrica para um valor constante. Dessa forma, o sistema gerador pode ser conectado à rede elétrica desejada. Na Figura 2.7 vê-se, de forma simplificada, o esquema de conversão da energia eólica em energia elétrica. Por ser uma representação simples, o sistema retificador não é mostrado.



Fonte: ENGQUIMICASANTOSSP. Disponível em: <www.engquimicasantossp.com.br/2013/12/energia-eolica-e-aerogeradores.html>. Acesso em: 16 jun. 2014.

Figura 2.7 *Esquema simplificado de conversão da energia eólica em energia elétrica.*

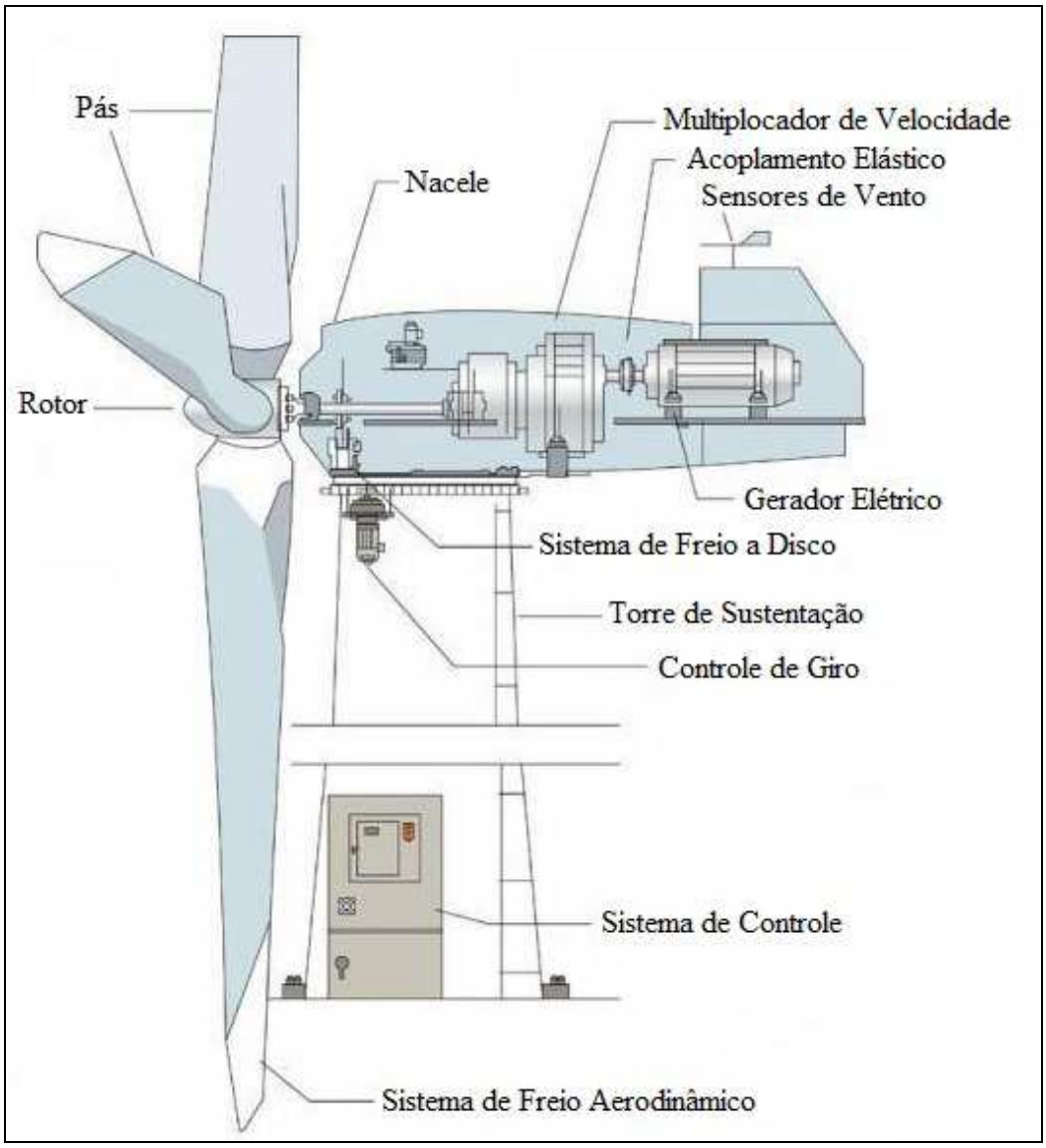
2.4.4.1 Tipos de Aerogeradores

Existem dois tipos de turbinas eólicas utilizadas atualmente, as de eixo horizontal e as de eixo vertical. A primeira possui um princípio de funcionamento baseado nos antigos moinhos de vento e são, em sua grande parte, constituídas por três pás. Essas possuem um perfil aerodinâmico, devem estar orientadas na direção do vento e são construídas, geralmente, com fibras de carbono. Esses aerogeradores de eixo horizontal, por serem os mais comuns, possuem aspectos favoráveis para sua instalação: bom compromisso entre coeficiente de potência, custo e velocidade de rotação e uma boa estética visual. Além disso, eles são estáveis, apesar de estarem sujeitos à alta turbulência, o que garante uma melhor segurança para a estrutura física da turbina eólica (ENGQUIMICASANTOSSP, 2014).

Apesar de possuir várias qualidades no funcionamento, o custo desse tipo de aerogerador não é tão elevado. Por ser bastante estável, também é possível que seja construído a grandes alturas (mais de 100m) com uma capacidade de geração de energia por volta de 5 MW. Seu máximo valor de geração é alcançado com ventos fortes e a sua eficiência pode ir além de 45%. As turbinas eólicas de eixo horizontal são as mais usadas por terem um rendimento aerodinâmico superior ao das turbinas de eixo vertical e também por estarem menos expostas aos esforços mecânicos em sua estrutura física, compensando o seu maior custo – comparado aos aerogeradores de eixo vertical (CRESESB, 2014).

A Figura 2.8 mostra os componentes básicos presentes em um gerador eólico convencional de eixo horizontal, detalhados a seguir (Energia Eólica, 2014):

- Pás do rotor: captam a energia proveniente do vento e a convertem em energia de rotação no eixo do rotor da turbina;
- Eixo: transfere a energia proveniente da rotação do eixo do rotor para o gerador;
- Nacele: carcaça mecânica onde são abrigados os diversos componentes da turbina;
- Caixa de engrenagens: proporciona o aumento da velocidade de rotação do eixo da turbina, localizado entre o gerador e o cubo do rotor;
- Gerador: utiliza a energia proveniente da rotação do eixo da turbina e a transforma em energia elétrica;
- Unidade de controle eletrônico: faz o monitoramento de todo o sistema do aerogerador, proporcionando o desligamento da turbina em caso de falhas; além de ajustar o mecanismo de alinhamento da turbina com a direção do vento;
- Controlador: responsável por alinhar o rotor com a direção do vento;
- Freio: responsável por deter a rotação do eixo do rotor, caso ocorra alguma falha ou sobrecarga no sistema;
- Torre: responsável pela sustentação do rotor e da nacele, além de erguer todo o conjunto da turbina a uma altura na qual as pás possam estar em segurança a certa distância do solo;
- Equipamentos elétricos: controlam os elementos de segurança da turbina e fazem a transmissão, pela torre, da energia elétrica gerada no gerador.



Fonte: Energia Eólica. Disponível em: <evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/aerogerador-de-eixo-horizontal/custo-comparativo/>. Acesso em: 17 jun. 2014. (modificada)

Figura 2.8 *Componentes básicos de um gerador eólico convencional de eixo horizontal.*

Já as turbinas eólicas de eixo vertical possuem o eixo de rotação perpendicular ao solo. Essa turbina é usada por possuir um melhor comportamento perante ventos fracos, turbulentos e irregulares; por emitir baixos níveis de ruídos, quando comparada às turbinas de eixo horizontal; por não precisar de um lema extra para manter-se apontada na direção do vento, ao contrário da outra turbina; além de ser mais apropriada em regiões urbanas. Além disso, as turbinas de eixo vertical necessitam de menos manutenção, em relação às turbinas de eixo horizontal.

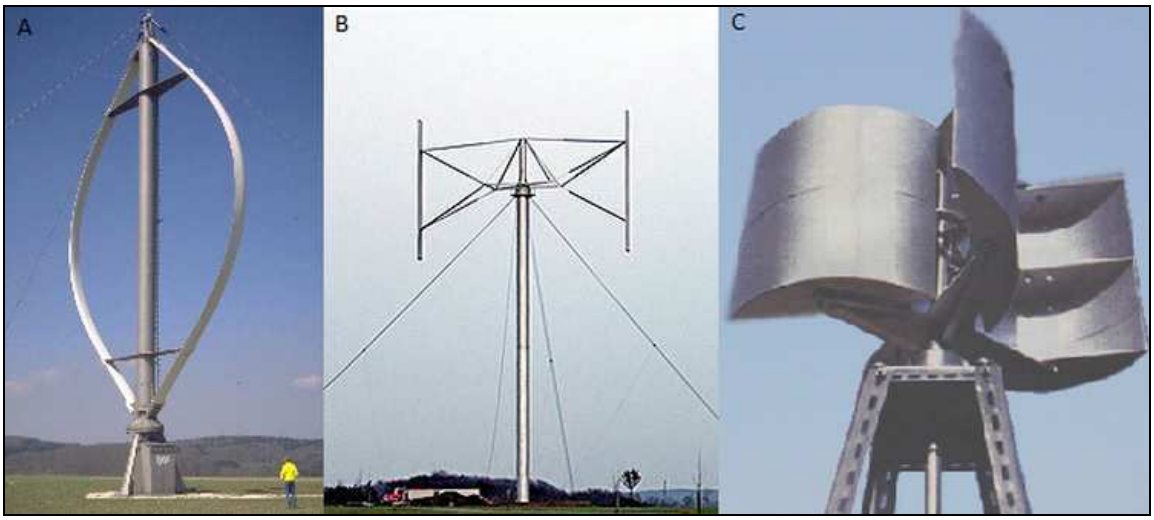
Dentre as várias vantagens dos aerogeradores de eixo vertical, podem-se listar os seguintes pontos positivos associados a eles (PEREIRA, 2013):

- Não necessitam de nenhum mecanismo de controle para a orientação do vento (*yan system*), pois há uma excelente captação do movimento do ar em todas as direções;
- Existe a possibilidade de instalar todo o equipamento (pesado e de difícil locomoção) responsável pela conversão de energia em solo, o que ajuda na manutenção.

Há também algumas desvantagens que estão associadas às turbinas eólicas de eixo vertical (PEREIRA, 2013):

- Apresentam menor desempenho e rendimento, quando comparadas aos aerogeradores de eixo horizontal. Isso está relacionado ao fato de que mesmo que o vento promova a movimentação da turbina, no mesmo instante, a turbina se opõe a ele, fazendo o rendimento diminuir;
- As torres de sustentação são baixas; as pás, geralmente, ficam próximas ao solo, onde a velocidade do vento costuma ser menor, influenciando também no rendimento da turbina;
- As pás fabricadas com alumínio, em longo prazo, apresentam problemas em suas estruturas, causados por esforços e fadiga;
- A modelagem matemática – aerodinâmica – é bastante complexa, dificultando o desenho da turbina.

Dentre as diversas turbinas de eixo vertical existentes, as mais conhecidas são: a de Darrieus, a de Savonius, a Giromill, a Solarwind, a Helicoidal, a de Noguchi, a de Maglev e a de Cochrane (PINTO, 2013). A Figura 2.9 mostra alguns tipos de turbinas eólicas de eixo vertical.

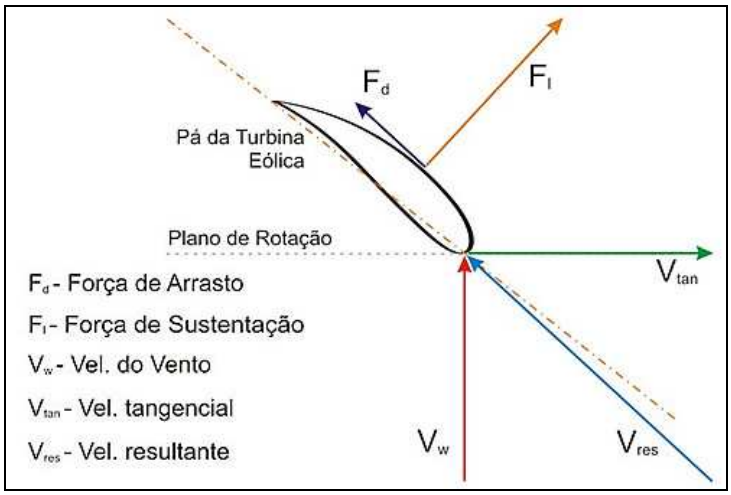


Fonte: EnergyBC. Disponível em: <www.energybc.ca/profiles/wind.html>. Acesso em: 17 jun. 2014.

Figura 2.9 *Diferentes tipos de turbinas de eixo vertical: A) Darrieus, B) Giromill e C) Savonius.*

2.4.4.2 Movimento das Pás da Turbina Eólica

A teoria dos aerofólios descreve o movimento das pás de uma turbina eólica. Essa teoria diz que os aerofólios necessitam da atuação de dois tipos de forças: a de arrasto – força que resiste ao movimento de um objeto sólido em um fluido – e a de sustentação – componente da força resultante aerodinâmica, que é perpendicular à direção do vento incidente. Essas duas forças estão relacionadas ao ângulo de incidência do vento, às características que o compõem, ao dimensionamento das pás e ao material do qual essas são feitas. Tem-se, na Figura 2.10, a representação das forças de arrasto e de sustentação nas pás do aerogerador e também a interação do vento com essas pás (PEREIRA, 2013).



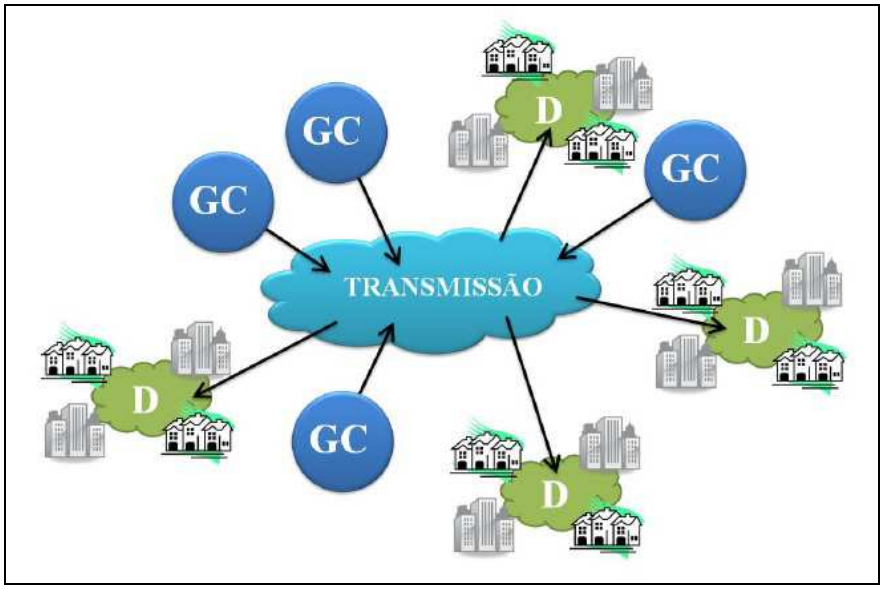
Fonte: MONTEZANO, B.E.M., 2007. Modelo Dinâmico de Visualização de um Aerogerador com Velocidade de Rotação Variável e Controle de Passo em VRML. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, UFRJ , Rio de Janeiro, Brazil, 137 pp.

Figura 2.10 *Forças atuantes em uma pá da turbina eólica.*

2.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

2.5.1 Aspectos Gerais

As usinas de geração centralizada (GC), nos sistemas elétricos interligados, são responsáveis por uma grande produção de energia que são injetadas no sistema de transmissão. Ao receberem a energia das linhas de transmissão, as distribuidoras (D) encaminham-nas aos consumidores. Como o sistema é todo interligado, considerando que ocorra perfeitamente a conexão com o sistema de transmissão – a partir de um único ponto –, não importa para a distribuidora qual foi a usina geradora que produziu a energia que será entregue por ela aos consumidores (SHAYANI, 2010). Na Figura 2.11 tem-se uma representação simplificada para o sistema elétrico interligado.

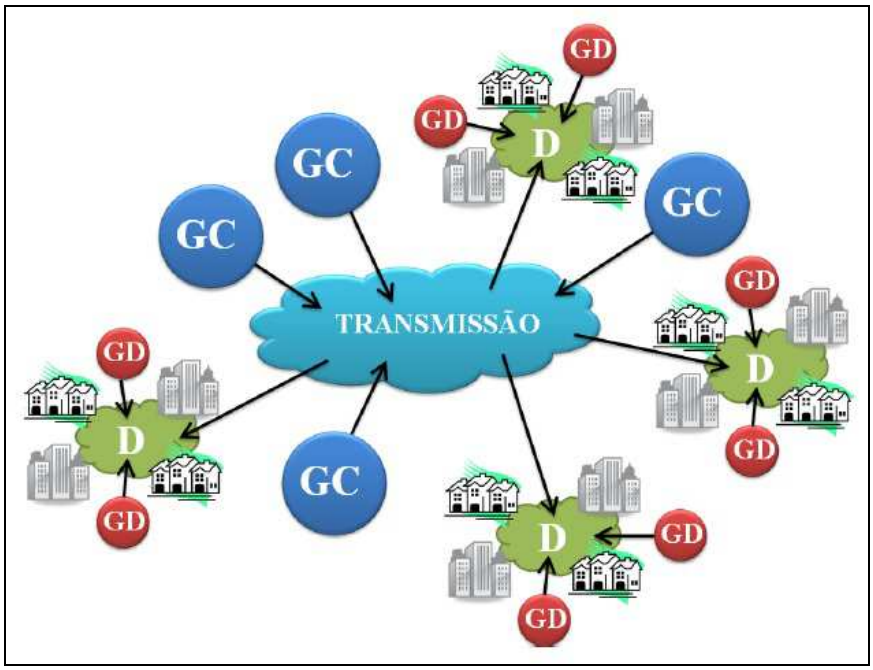


Fonte: SHAYANI, R. A. (2010). Método para Determinação do Limite de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica em Redes Radiais de Distribuição. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD-051/10, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161p.

Figura 2.11 *Representação de um sistema elétrico interligado.*

Normalmente as fontes renováveis de energia não estão localizadas em locais concentrados, como ocorrem com as quedas d'águas ou jazidas de carvão. A energia solar, por exemplo, incide sobre toda a superfície da Terra, seja com intensidade alta ou baixa, dependendo da região. O aproveitamento dessa fonte de energia pode ser visto como uma "democratização" das fontes energéticas, uma vez que os países não necessitam possuir riquezas naturais para usufruírem da energia solar. Dessa forma, o paradigma da geração centralizada é alterado, pois a geração, por meio de fontes renováveis de energia, é mais bem aproveitada, se for empregada de forma distribuída, inclusive dentro dos centros urbanos que necessitam de energia. (SHAYANI, 2010).

A geração distribuída tem como principal característica a sua localização, que está próxima às cargas para que o consumo da energia ocorra de forma direta. O uso de GD com fontes renováveis traz vantagens ambientais e também nos custos, por não utilizar o sistema de transmissão de energia (SHAYANI, 2010). A Figura 2.12 mostra uma representação para o sistema elétrico interligado com GD.



Fonte: SHAYANI, R. A. (2010). Método para Determinação do Limite de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica em Redes Radiais de Distribuição. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD-051/10, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161p.

Figura 2.12 *Representação de um sistema elétrico interligado com geração distribuída.*

2.5.2 Definições de GD

O termo "geração distribuída" pode ser caracterizado como sendo um tipo de geração de energia elétrica que se difere da geração centralizada (GC), por se estabelecer em locais onde não se instalaria uma unidade geradora convencional. A GD contribui, dessa forma, para o aumento da distribuição geográfica de pontos geradores de eletricidade. Para uma unidade geradora de energia elétrica ser considerada um caso particular de GD, ela deve possuir as seguintes características (SEVERINO, 2008):

- Possuir uma conexão direta com a rede de distribuição;
- Estar conectada ao lado de um determinado consumidor, que está ligado a um ponto do sistema elétrico de potência;
- Atender às cargas elétricas de uma instalação que está isolada eletricamente;
- Estar ligada de forma direta a uma linha de transmissão; esta, nessa avaliação, não pode ser considerada parte da GC.

De acordo com a Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2.012 (“Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências”), publicada pela ANEEL, estabelece a seguinte classificação para sistemas de microgeração e minigeração distribuída:

> Art. 1º Estabelecer as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e ao sistema de compensação de energia elétrica.
> Art. 2º Para efeitos desta Resolução, ficam adotadas as seguintes definições:
> I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
> II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

No Brasil, a GD tornou-se registrada na legislação com o Decreto n º 5.163/2004, apesar das antigas práticas exercidas no setor elétrico brasileiro e também da antiga legislação vigente. Esse Decreto é expresso da seguinte maneira (Brasil, 2004):

> Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8.° da Lei n.° 9.074[2], de 1995, conectados diretamente

[2] Potenciais hidráulicos iguais ou inferiores a 1.000 kW e termelétricas de potência igual ou inferior a 5.000 kW (Brasil, 1995).

> no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento:
> I – hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e
> II – termelétrico, inclusive de co-geração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL[3], a ser estabelecida até dezembro de 2004.
> Parágrafo único. Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II do *caput*.

Entretanto, analisando diversos autores que abordam a GD em suas literaturas, como Ackemann, Anderesson e Söder (2001a), El-Khattam e Salama (2004) e Rodrigues (2006), vê-se que não há uma definição exata, consistente e aceita para essa área de especialidade estudada.

2.5.3 Aspectos Positivos da GD

Muitos benefícios estão associados à GD e alguns deles são listados a seguir (ROMAGNOLI, 2005; RODRÍGUEZ, 2002; DIAS, BORTONI e HADDAD, 2005; SEVERINO, 2008; PAIVA et al, 2009):

- Redução do carregamento das redes, que possibilita uma maior flexibilidade de operação;
- Geração de potência próxima à unidade consumidora;
- Flexibilidade de ser implementada em um tempo curto;
- Melhoria no perfil de tensão dos ramais elétricos;
- Redução de perdas na rede elétrica;
- Operação em horários de pico, que diminui a variação de preço;
- Maior eficiência energética obtida pela operação simultânea da geração convencional e da GD;

[3] Regulação realizada pela Resolução Normativa ANEEL n.° 228/2006, que certifica as centrais geradoras termelétricas na modalidade de geração distribuída, para fins de comercialização de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) (ANEEL, 2006).

- Diminuição das perdas e possíveis reduções para a implantação de novas linhas de transmissão e distribuição;
- Aumento da confiabilidade do sistema elétrico, pois possui uma redundância inerente;
- O consumidor pode receber uma energia de boa qualidade, em relação à tensão, frequência e conteúdo harmônico;
- Promove uma abordagem modular dos problemas gerados, que atende às demandas particulares com determinadas soluções;
- Caso as unidades geradoras que constituem a GD empreguem máquinas síncronas de porte considerável, há um aumento da estabilidade do sistema elétrico;
- Proporciona a aplicação de várias técnicas de gerenciamento da demanda;
- Gera benefícios ambientais, quando há o uso de energias renováveis ou a utilização de resíduos que não poluem o meio ambiente;
- Pode atuar na prestação de serviços relacionados ao controle da frequência, reserva de potência e também auto-restabelecimento – conhecido como ilhamento. Esse tipo de possibilidade está contido no escopo do conceito de microrredes – grupo de cargas e unidades de GD que trabalham de forma a aumentar a confiabilidade e a qualidade do sistema elétrico, de forma controlada.

2.5.4 Aspectos Negativos da GD

Além das vantagens, a utilização da GD apresenta pontos negativos. As dificuldades de inserção em escala da GD estão relacionadas aos problemas de compatibilidade com as redes elétricas que fazem parte da distribuição (SEVERINO, 2008). Podemos, assim, citar como desvantagens no uso da GD os seguintes aspectos (RODRIGUES, 2006; SEVERINO, 2008; PAIVA et al, 2009):

- Alto grau de complexidade no nível de operação do despacho centralizado, em que a técnica está inclusa;
- Ocorrência de impactos importantes durante os procedimentos de controle da rede elétrica de distribuição e também na operação;
- Surgimento de fluxos contrários aos habituais;

- Aumento do nível de cintilação de tensão, competição por regulação de tensão e harmônicos, flutuação de potência ativa, coordenação de projetos, curto-circuito;
- Impacto causado pela presença da GD nos sistemas de proteção das atuais redes de distribuição;
- Monitoramento diário da qualidade de energia;
- Complexidade em criar normas específicas e abrangentes perante as especificidades de cada rede e da própria GD;
- Dependência das mudanças ambientais, como o nível de incidência solar e da velocidade do vento;
- Ocorrência de desequilíbrios entre as fases da rede, quando uma GD monofásica está conectada em uma rede trifásica equilibrada;
- A necessidade de implantar, durante o seu planejamento, novas configurações da rede elétrica de distribuição, para explorar e incorporar a GD;
- Ocorre a deterioração da energia elétrica devido às subtensões causadas por interações com equipamentos de regulação presentes;
- Altos custos envolvidos – apesar de decrescentes com o desenvolvimento das tecnologias empregadas na GD –, problemas relacionados à qualidade da energia elétrica – além da operação e manutenção – e grande complexidade de operação do sistema elétrico.

2.5.5 Classificações Pertinentes (SEVERINO, 2008)

Há na GD um problema que está relacionado a um parâmetro importantíssimo: a potência. Devido à possibilidade de larga variação dessa grandeza física, os aspectos técnicos que abrangem a GD também mudam de forma considerável com a variação da potência. Tendo essa dificuldade em vista, é necessário buscar uma categoria de potência de GD.

Ackermann, Andersson e Söder (2001a), acompanhados de Khattam e Salama (2004), definem a seguinte classificação:

- Micro GD – de aproximadamente 1 W a 5 kW;
- Pequena GD – de 5 kW a 5 MW;
- Média GD – de 5 MW a 50 MW;

- Grande GD – de 50 MW a aproximadamente 300 MW.

De acordo com Lora e Haddad (2006), a classificação feita acima é baseada nos padrões dos Estados Unidos da América (EUA) e da Europa, que não são totalmente adequados aos padrões de GD usados no Brasil, porque, dependendo do autor brasileiro analisado, a GD é limitada a valores de potência que estão na faixa de 30 a 50 MW. Mesmo usando a classificação anterior, sugere-se a seguinte classificação:

- Micro GD – até 10 kW;
- Pequena GD – de 10 kW a 500 kW;
- Média GD – de 500 kW a 5 MW;
- Grande GD – de 5 MW a 100 MW.

Baseado na Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2.012, da ANEEL tem-se:

- Micro GD – até 100 kW;
- Mini GD – de 100 kW a 1 MW.

Na Tabela 2.7 há a apresentação de quatro propostas pertinentes para a análise de GD, sendo que três delas já foram mencionadas acima: a proposta de Ackermann, Andersson e Söder (2001a), a de Lora e Haddad (2006), a Resolução Normativa Nº 482 da ANEEL e a que vai ser empregada neste trabalho, que é a Resolução da ANEEL juntamente com a adaptação das duas classificações citadas anteriormente – tem-se o intuito de flexibilizar o limite máximo de 30 MW definido para GD pelo Decreto n.º 5.163/2004 (Brasil, 2004).

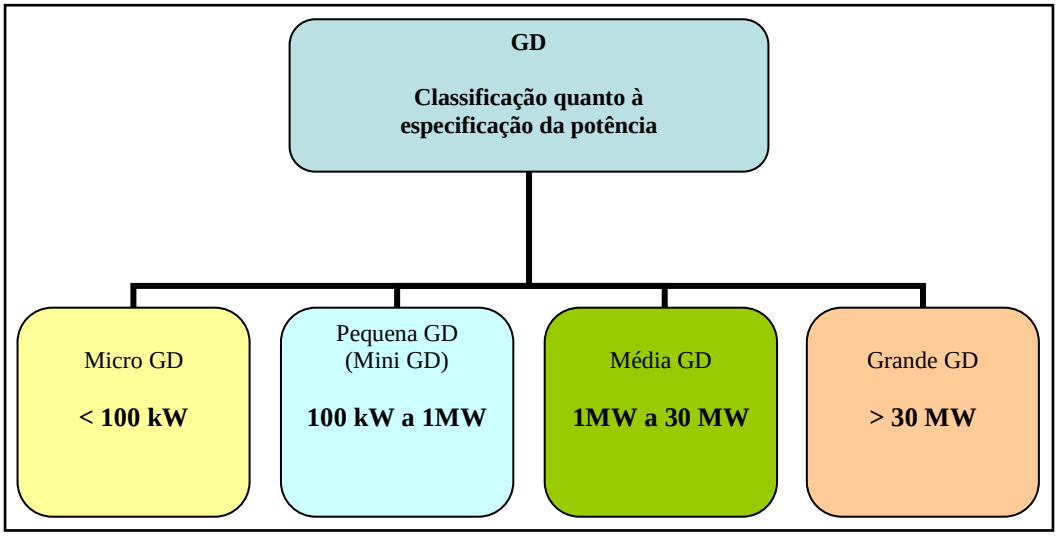
De acordo com Willis e Scott (2000), a designação *dispersed generation* (geração dispersa, em língua portuguesa) está relacionada aos valores de potência que estão na faixa de 10 a 250 kW, que é um caso particular de GD. Para Ackermann, Andersson e Söder (2001a) a potência da geração dispersa está entre 1kW e 1 MW.

Tabela 2.7 *Categorias de potência de GD.*

Referência bibliográfica	Micro GD	Pequena GD (Mini GD)	Média GD	Grande GD
Ackermann, Andersson e Söder (2001)	< 5 kW	5 kW a 5 MW	5 MW a 50 MW	50 MW a 300 MW
Lora e Haddad (2006)	< 10 kW	10 kW a 500 kW	500 kW a 5 MW	5 MW a 100 MW
Resolução Normativa Nº 482 da ANEEL	< 100 kW	100 kW a 1 MW	X	X
Este trabalho	**< 100 kW**	**100 kW a 1 MW**	**1 MW a 30 MW**	**> 30 MW**

Fonte: SEVERINO, M. M. (2008). Avaliação Técnico-Econômica de um Sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD – 027/08, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p. (modificada)

Dessa maneira, serão empregadas, neste trabalho, as mesmas considerações feitas por Ackermann, Andersson e Söder (2001a), por El-Khattam e Salama (2004) e também a Resolução Normativa Nº 482 da ANEEL; que tratam as especificações da potência da unidade geradora como não sendo determinantes para a definição de GD. Entretanto, a classificação abordada aqui será a apresentada na Tabela 2.6 – ilustrada na Figura 2.13.



Fonte: SEVERINO, M. M. (2008). Avaliação Técnico-Econômica de um Sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD – 027/08, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p. (modificada)

Figura 2.13 *Classificação de GD quanto à especificação da potência.*

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo trata das fontes de energia mais usadas no Brasil e no mundo e de suas respectivas porcentagens de utilização. Aborda-se também a energia eólica, que é o principal instrumento estudado neste trabalho, analisando seu uso em todo o planeta e no Brasil. Foram tratados conceitos importantes referentes ao “vento” e à “potência gerada pela força do ar”, além de mostrar as estruturas das turbinas eólicas e os seus diferentes tipos. Por fim, há a caracterização do conceito de “geração distribuída”, abordando seus diferentes aspectos e suas classificações.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo descreve a instalação atual do sistema de microgeração eólica da Embaixada da Itália, assim como o seu propósito e as especificações técnicas a ela destinadas. Enquadra também esse sistema de microgeração nas classificações definidas no Capítulo 2 e apresenta os materiais que compõe a instalação e a metodologia que será usada para avaliação técnica do sistema de microgeração eólica. Cria, com isso, as condições necessárias para as aplicações práticas, no próximo capítulo, do que se pretende analisar.

3.2 A EMBAIXADA DA ITÁLIA

3.2.1 Aspectos Gerais

A Embaixada da Itália, que é a base para o estudo proposto, está localizada em Brasília, Distrito Federal; mais precisamente na Asa Sul no seguinte endereço: Setor de Embaixadas Sul (SES), Avenida das Nações, quadra 807, lote 30. A Figura 3.1 mostra a localização da embaixada italiana.



Fonte: Google Maps. Disponível em: <www.google.com.br/maps>. Acesso em: 12 jul. 2014.

Figura 3.1 *Localização da Embaixada italiana em Brasília.*

A Embaixada da Itália possui uma arquitetura arrojada e sofisticada, parecida com os padrões arquitetônico vistos em Brasília. Ela foi inaugurada no ano de 1977 e foi projetada por Píer Luigi Nervi, um dos mais importantes arquitetos italianos do século XX, segundo o embaixador da época Gherardo La Francesca. As Figuras 3.2 e 3.3 mostram alguns ambientes do edifício, a fachada e a entrada da Embaixada, revelando sua arquitetura inovadora.

Nesses últimos anos, com o intuito de diminuir o consumo de energia da Embaixada italiana, promoveu-se um investimento em geração energética apoiada em fontes renováveis de energia, para atender parte da demanda (20% do consumo) exigida pela carga da Embaixada. Foram instalados 405 painéis fotovoltaicos e cinco turbinas eólicas na laje do edifício. A “Embaixada Verde” visa, além de gerar energia, ser um exemplo de edificação sustentável sem desconfigurar a arquitetura arrojada, visto que os painéis fotovoltaicos e as turbinas eólicas não aparecem para os usuários do prédio. Além disso, a Embaixada possui uma planta de fitodepuração. Com o objetivo de reaproveitar a água utilizada no prédio, esse sistema filtra e depura toda a água cinza eliminada e a transforma em potável (Planeta Sustentável).

Tratando mais especificamente do sistema de microgeração eólica instalado, tem-se que este visa atender parte da demanda de energia usada no edifício, juntamente com o sistema de geração fotovoltaica e também com a Companhia Energética de Brasília (CEB). A embaixada italiana recebeu o nome de “Embaixada Verde” por fazer uso de fontes renováveis e limpas – sol e vento – em sua demanda energética. Tanto o sistema de microgeração eólica quanto o sistema de geração fotovoltaica estão interligados à rede elétrica da CEB, podendo repassar a energia excedente produzida e não consumida para esta concessionária.



Fonte: G1 – O Portal de Notícias da Globo. Distrito Federal. Disponível em: <http://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2012/02/embaixada-da-italia-em_brasilia-abre-suas-portas-para-visitantes.html> e <bancadafederal.blogspot.com.br/2011_02_01_archive.html>. Acesso em: 12 jul. 2014.

Figura 3.2 *Detalhe dos ambientes e da fachada da Embaixada da Itália.*

Uma parceria estabelecida entre a Embaixada italiana, a Universidade de Brasília (UnB) e a CEB fez de Brasília uma referência pioneira em todo o Brasil nos estudos e também na produção de energia renovável como geração distribuída, baseada nas instalações geradoras de energia do edifício da Embaixada italiana. O projeto promoveu investimentos na geração de energia a partir da luz solar e dos ventos, revelando que é possível uma casa de família gerar grande parte da energia que é consumida de forma sustentável.



Figura 3.3 *Entrada da Embaixada da Itália.*

3.2.2 Variáveis Pertinentes

Muitos fatores estão relacionados à produção de energia elétrica no que tange à microgeração distribuída. A quantidade de potência produzida pelas turbinas eólicas e da demanda energética que a Embaixada da Itália necessita, são alguns desses fatores. O sistema de microgeração eólico da Embaixada é composto por cinco turbinas (elas são da marca *Windbooster 1500*, do fabricante italiano *Ecomacchine S.p.A.* e cada uma possui potência nominal de 1.500 W), que estão dispostas bem rentes à laje do edifício – para não alterar a fachada do prédio –; o que dificulta a rotação das pás das turbinas proporcionada pelo ação do vento. Este é a fonte de energia que os aerogeradores precisam para funcionarem. Por outro lado, o vento depende das condições climáticas que o ambiente proporciona no lugar onde se localiza a Embaixada. Dessa maneira, têm-se as seguintes variáveis importantes a serem avaliadas, além do potencial eólico no local: a potência gerada pela turbina eólica e a demanda de energia que o edifício necessita.

3.2.3 Clima de Brasília

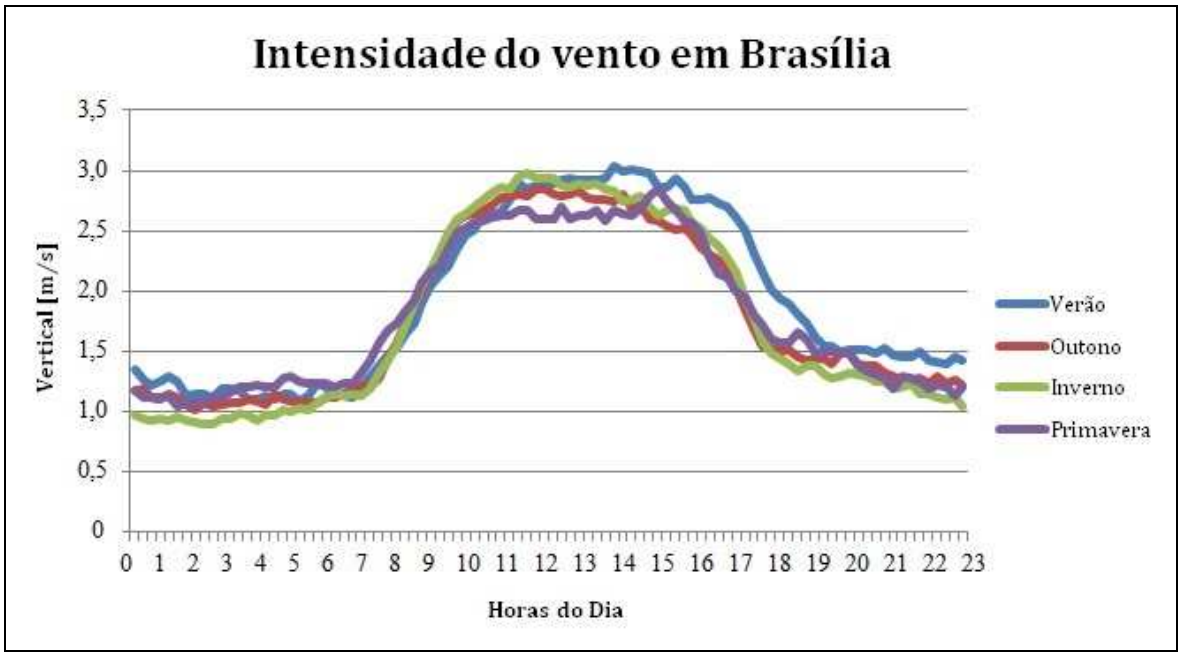
O clima na cidade de Brasília possui a mesma característica do clima que predomina nos planaltos e nas serras do Sudeste do Brasil – clima tropical de altitude. Altitudes acima de 1.000 m proporcionam condições especiais para o clima. Brasília está localizada em uma região cuja altitude está compreendida entre 1.000 e 1.200 m acima do nível do mar. As temperaturas do clima tropical de altitude são baixas, quando comparadas às do clima tropical, e a época chuvosa está compreendida entre os meses de dezembro e março, na estação do verão. O período do ano entre o outono e o inverno – que vai de abril até setembro – é caracterizado como período de seca. Além disso, os dias são mais frios do que os habituais, principalmente na parte da manhã e durante a noite. Já o período compreendido entre a primavera e o verão – entre os meses de outubro e março –, é caracterizado como sendo úmido e chuvoso. Outro aspecto importante a ser considerado na influência do clima na região onde está localizada a capital do Brasil é a incidência solar, que influencia na temperatura ambiente – a cidade de Brasília está localizada na Região Centro-Oeste do país, que recebe uma boa incidência de luz do sol.

3.2.3.1 Comportamento do Vento em Brasília

Sabe-se que quanto maior for a variação de temperatura em determinada região ou local, maior será a circulação de vento. A cidade de Brasília, durante as quatro estações do ano, não apresenta grandes variações de temperatura, principalmente durante o dia, em que os ventos são comumente mais fortes, caracterizando uma baixa variação nas intensidades de vento durante o ano (PEREIRA, 2013).

No Gráfico 3.1 – dados obtidos por uma torre anemométrica, entre os anos de 2005 e 2006, cuja altura é de 10 m, na Estação Meteorológica da Universidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro –, verifica-se que a velocidade do vento possui valores “elevados” entre os horários de 10 e 16 horas; neste intervalo as altas velocidades propiciam um melhor aproveitamento em termos de geração de energia. Observa-se também que, mesmo nas estações em que a velocidade do vento é “alta”, pouquíssimas vezes ela ultrapassa os 3 m/s no local avaliado na medição (PEREIRA, 2013). Essa velocidade é considerada baixa quando comparada com as velocidades do vento que incidem nos parques eólicos de

grande porte – as turbinas eólicas instaladas nesses parques operam com uma velocidade de vento de até 20 m/s (PINTO, 2013). O Gráfico 3.1 também revela que a diferença de pico, localizada entre a estação com grande intensidade de vento, verão, e a com baixa intensidade de vento, primavera, fica em torno de 15% (PINTO, 2013).



Fonte: PEREIRA, R. C. (2013). Impactos da inserção de um sistema de micro-geração eólica distribuída para um alimentador radial real e suas unidades consumidoras. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2013, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 132p. (modificado)

Gráfico 3.1 *Velocidade média do vento ao longo do dia em Brasília. Dados de janeiro de 2005 a Março de 2006.*

3.3 MATERIAIS

Estão listados, a seguir, os materiais que servem como base para a discussão proposta nesta pesquisa:

- Dados do SONDA, para a obtenção das informações referentes à velocidade do vento;
- Sistema de geração eólico da Embaixada da Itália, composto pelo conjunto de cinco turbinas, retificadores e inversores;
- Diagramas unifilares do sistema eólico;

- Ambiente computacional para a modelagem dos dados e realização de cálculos pertinentes.

3.3.1 Dados da Velocidade do Vento

Dados da velocidade do vento são utilizados como informações de entrada na metodologia adotada (item 3.4). Esta consiste no cálculo da potência de saída da turbina eólica e a correspondente energia produzida nessa geração. Os dados da velocidade do vento afetam diretamente o comportamento da turbina, que são mostrados no Gráfico 3.2. Esses dados são uma grande fonte de incerteza na determinação da energia produzida, uma vez que são de natureza estocástica (ALCÂNTARA, 2013).

Para a avaliação da viabilidade de implantação de uma turbina eólica ou de um parque eólico em um determinado local ou região, é necessário ter o conhecimento dos dados da velocidade do vento aferidos por estações climáticas próximas ao local de interesse para a instalação (MEYER, 2013). No site do SONDA encontra-se dados com alta confiabilidade, medidos de minuto a minuto, no período correspondente a um ano; sendo divulgados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os dados da velocidade do vento estão disponíveis para algumas cidades do Brasil, nas quais se encontram as estações climáticas do SONDA.

Para a modelagem abordada neste trabalho, utilizaram-se as planilhas eletrônicas do Excel, disponíveis no site mencionado. Esses arquivos são mensais (disponíveis apenas em determinados anos) e estão dispostos em dois tipos de planilha. Uma delas com 11 colunas, tendo cada uma destas 4.464 valores, e a outra com 17 colunas, com 44.640 valores cada; ambas referentes aos 31 dias dos seguintes meses: janeiro, março, maio, julho, agosto, outubro e dezembro. Os meses que possuem 30 dias (abril, junho, setembro e novembro) somam um total de 4.320 valores, para cada coluna do primeiro tipo de planilha mencionada, e 43.200 valores para o segundo tipo. Para o mês de fevereiro, somam-se 4.032 valores para cada coluna, referente ao primeiro tipo de planilha, e 40.320 valores para cada coluna, correspondente ao segundo tipo (os dados utilizados para a cidade de Ourinhos – SP são referentes ao ano de 2008, que foi bissexto; sendo assim, para o mês de fevereiro, somam-se 41.760 valores por coluna – segundo tipo de planilha). Os dados

obtidos, para o primeiro tipo de planilha, foram registrados a cada 10 minutos e, para o segundo tipo, a cada minuto. Dentre as informações pertinentes para a modelagem, encontram-se os dados da velocidade do vento a 25 m e a 50 m de altura, para o primeiro tipo de planilha, e a velocidade do vento a 10 m de altura para o segundo tipo. Ambas as planilhas apresentam também dados referentes ao tempo (ano, dias e minutos), direção de incidência do vento e temperatura do ar. Além desses dados, o segundo tipo de planilha fornece a umidade relativa do ar, pressão do ar e a precipitação de chuva. O dado escolhido para este trabalho foi à velocidade do vento, que está disponível em uma das colunas das planilhas citadas. Utilizou-se, dessa forma, para três cidades, um total de 315.360 dados. Já para outras quatro cidades, usou-se 2.103.840 dados. Somando esses valores encontra-se um total de 2.419.200 dados. Em algumas planilhas constava a designação "N/A" (*Not Available*) no lugar dos valores desejados, que representa a falta de dados (ocorrência de eventuais problemas durante o processo de medição); foram poucos, entretanto, os valores que apresentaram essa designação. Para estes, foi atribuído o valor "zero", que não influenciou consideravelmente no universo dos dados utilizados.

Para 19 cidades brasileiras, encontram-se disponíveis, no site do SONDA, muitas planilhas eletrônicas do Excel. Essas cidades são: Belo Jardim – PE, Brasília – DF, Cachoeira Paulista – SP, Caicó – RN, Campo Grande – MS, Cuiabá – MT, Ourinhos – SP, Palmas – TO, Petrolina – PE, Rolim de Moura – RO, São Luiz – MA, São João do Cariri – PB, São Martinho da Serra – RS, Triunfo – PE, Chapecó – SC, Florianópolis – SC, Natal – RN e Sombrio – SC. A modelagem empregada neste trabalho utilizou-se apenas de sete cidades dentre as mencionadas, pois apenas estas possuem estações anemométricas. Três dessas sete cidades possuem dados de acordo com o primeiro tipo de planilha mencionada e as outras quatro cidades possuem dados de acordo com o segundo tipo de planilha. As três cidades citadas anteriormente são: Belo Jardim – PE, São João do Cariri – PB e Triunfo – PE. Os anos avaliados para elas foram, respectivamente: 2004 e 2005, 2008 e 2009, 2006 e 2007. As outras quatro cidades mencionadas são: Brasília – DF, Ourinhos – SP, Petrolina – PE e São Martinho da Serra – RS. O ano avaliado para estas cidades foi o de 2013, exceto a cidade de Ourinhos – SP, cujo ano analisado foi o de 2008. A Tabela 3.1 mostra as sete cidades brasileiras e os respectivos anos.

Tabela 3.1 *Anos avaliados para as sete cidades brasileiras.*

Cidades	Anos Avaliados
Belo Jardim – PE	2004 e 2005
São João do Cariri – PB	2008 e 2009
Triunfo – PE	2006 e 2007
Brasília – DF	2013
Ourinhos – SP	2008
Petrolina – PE	2013
São Martinho da Serra – RS	2013

Em usinas eólicas e em locais onde estão instalados aerogeradores, há a necessidade de instalar equipamentos que aferem a velocidade do vento e o respectivo desempenho das turbinas. Um desses equipamentos é o anemômetro, utilizado principalmente para a coleta da velocidade do vento – ele mede a componente horizontal da velocidade, que é essencial para o cálculo das previsões de energia –; alguns desses equipamentos fazem também a aferição da temperatura do ar e registram a direção do vento.

Na Figura 3.4 tem-se a estação solarimétrica e anemométrica de Brasília (localização: 15º 36’ 03” Sul de Latitude e 47º 42’ 47” Oeste de Longitude, a 1023 m de altitude). Essa figura mostra a estação a partir do Norte com a torre eólica de 50 m de altura e o módulo SONDA – imagem a esquerda –; os três níveis de anemômetros (10, 25 e 50 m), os painéis solares, as baterias, o sistema de rádio e o estaiamento da torre eólica – imagem superior direita –; e os detalhes do módulo SONDA (esse módulo possui uma bancada com sensores na parte superior e sistema de aquisição e controle de dados na parte inferior, além de mostrar na lateral os logotipos dos envolvidos e dos colaboradores do projeto) – imagem inferior direita.



Fonte: SONDA – Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. Disponível em: <sonda.ccst.inpe.br/fotos/Brasília_fotos_2004.html>. Acesso em: 17 set. 2014.

Figura 3.4 Estação solarimétrica e anemométrica de Brasília.

3.3.2 Etapas da Geração Eólica

O projeto de instalação de uma turbina eólica depende de várias etapas de estudo para viabilizar sua implantação. Inicialmente, é necessário conhecer a potência nominal do aerogerador e a sua curva de potência para ter o conhecimento da funcionalidade do equipamento para determinados valores de velocidade do vento. Também é necessário o conhecimento das condições climáticas do local onde aquela turbina será instalada. A velocidade do vento é a principal variável a ser analisada por estar diretamente relacionada com a geração eólica e, consequentemente, com a geração elétrica. É necessário ter o conhecimento do comportamento eólico da região, onde se almeja instalar a turbina eólica, no período mínimo de um ano; obtendo, assim, um estudo da velocidade do vento do local para determinadas alturas. Com a avaliação realizada sobre a velocidade anual do vento, pode-se verificar qual tipo de turbina e qual a curva de potência que mais se adéqua à região pretendida (cada turbina é acionada de acordo com a respectiva velocidade de

incidência do vento sobre ela). Outro aspecto fundamental para se avaliar é a altura na qual o equipamento gerador ficará instalado; para cada altura analisada, há um comportamento e uma intensidade diferente para a velocidade do vento.

Para as turbinas instaladas na Embaixada da Itália, há a necessidade de avaliar a velocidade do vento que incide sobre as turbinas e as perdas nos cabos que fazem a conexão entre a saída dos geradores e a entrada dos retificadores e inversores. Além dessas perdas, é necessário verificar as que ocorrem nos cabos que fazem a ligação entre esses últimos equipamentos e o Quadro Terminal (QT) CA, responsável pela conexão das turbinas eólicas à carga da Embaixada. O sistema eólico, o fotovoltaico e a CEB estão interligados entre si e também com a carga da Embaixada. Todos os três sistemas fazem a alimentação da carga do prédio. Outra possibilidade de perdas em cabos é a ligação entre o QT e o Quadro Geral (QG) da Embaixada.

Os dados de Brasília foram obtidos a altura de 10m – aproximadamente a altura do prédio da Embaixada da Itália. As Figuras 3.2, 3.3, 3.6, 3.7 e 3.8 mostram a Embaixada italiana e as suas turbinas, que ficam rentes à laje do edifício, trazendo uma noção da altura onde foram instalados esses equipamentos. Esses dados são a base para a modelagem da geração eólica dessas turbinas. A Figura 3.5 mostra as etapas especificadas na geração eólica. Desde a incidência do vento sobre o aerogerador até o QG.

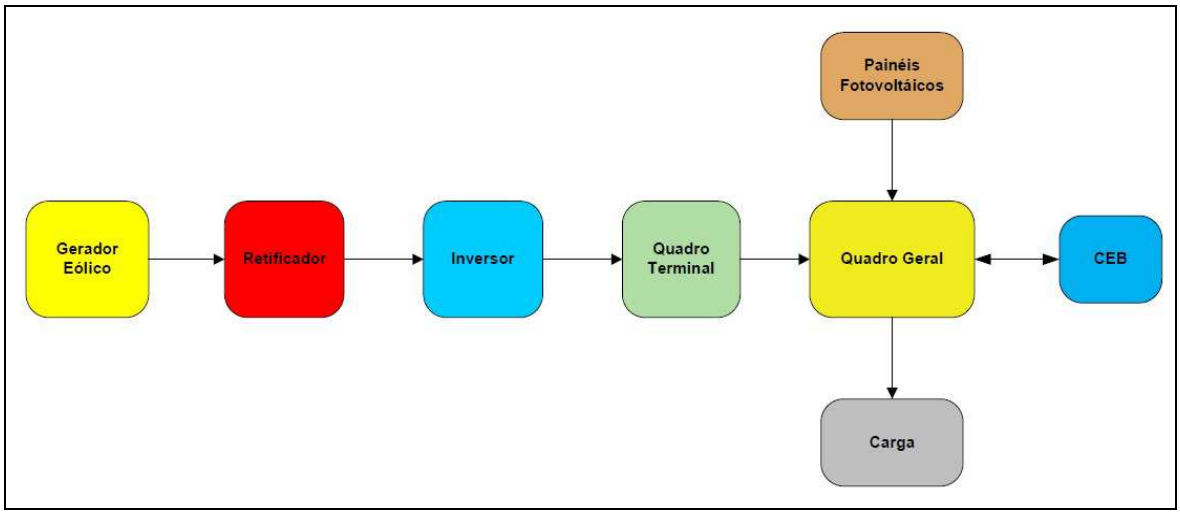


Figura 3.5 *Etapas do processo de geração da turbina eólica.*

3.3.3 SMGE

3.3.3.1 Turbina Eólica

As turbinas eólicas instaladas na Embaixada da Itália são cinco, cujo fabricante é a empresa italiana *Ecomacchine S.p.A.*, e são do tipo *Windbooster 1500*. Essas turbinas foram instaladas em abril de 2013. Na Tabela 3.2 estão listadas algumas especificações físicas e elétricas dessa turbina, que são parâmetros fundamentais na análise das simulações do estudo proposto neste trabalho.

As Figuras 3.6 e 3.7 mostram a turbina eólica instalada no local, próxima aos painéis fotovoltaicos, que também estão instalados na laje do prédio. Já na Figura 3.8, observa-se a disposição das cinco turbinas no prédio da Embaixada.

Tabela 3.2 *Características técnicas da turbina eólica italiana.*

Turbina	Windbooster 1500
Fabricação	Ecomacchine S.p.A.
Potência Nominal	1.500 W
Eixo	Vertical
Cut-in	1,5 m/s
Cut-off	12 m/s
Gerador	Trifásico e Síncrono
Material	Fibra de vidro
Material do rotor	Aço de carbono
Dimensões	175 x 175 x 175 [cm]

Fonte: Ecomacchine S.p.A.



Figura 3.6 *Turbina eólica instalada na Embaixada italiana.*

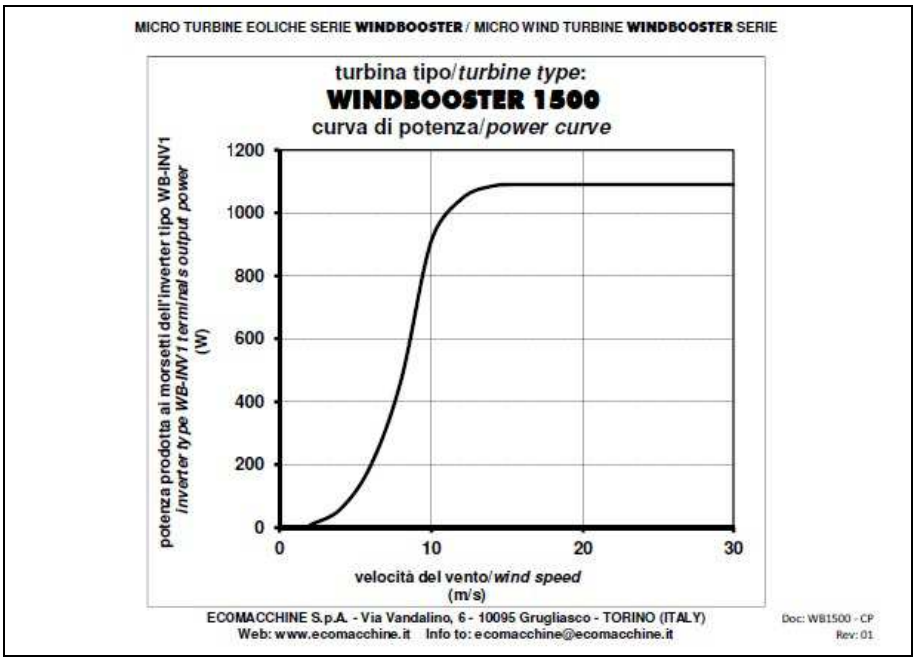


Figura 3.7 *Turbina eólica próxima aos painéis fotovoltaicos.*



Figura 3.8 *Disposição das turbinas eólicas na laje do edifício da Embaixada.*

Um dos aspectos fundamentais para avaliar o bom funcionamento dessa turbina é a sua curva de potência, que estabelece a relação entre potência gerada, dada em W, e a velocidade do vento incidente, em m/s, sobre o equipamento. O Gráfico 3.2 mostra a curva de potência da turbina. Constata-se que o máximo valor de potência atingido pelas turbinas é em torno de 1.100 W, para uma velocidade de incidência do vento de aproximadamente 14 m/s.



Fonte: Ecomacchine S.p.A.

Gráfico 3.2 *Curva de potência da turbina eólica.*

3.3.3.2 Retificador[4] e Inversor

Toda a energia gerada pelos cinco geradores eólicos é transmitida, por meio de cabos, para os inversores. Estes têm a função de converter a frequência gerada (grandezas físicas avaliadas: tensão e corrente) para um valor referente às especificações da rede elétrica de distribuição da região (Em Brasília: 60 Hz – condição necessária para a interligação do SMGE com a rede da CEB e com a carga da Embaixada, estabelecendo conexão paralela com essa rede). Ele converte o sinal de contínuo (CC) para alternado (CA, com características senoidais), após ser gerado. Além disso, na Embaixada da Itália, os inversores atuam como dispositivos de proteção dos equipamentos elétricos que compõem o sistema eólico. Antes do sinal chegar nos inversores, ele é retificado pelos retificadores – a cada turbina está conectada um inversor e um retificador –, que transforma o sinal em CA, proveniente das turbinas, em um sinal CC (nos inversores esse sinal volta a ser CA). Logo em seguida, essa energia é dirigida, também por meio de cabos, para o QG; e de lá atende a demanda energética da Embaixada italiana. Há a possibilidade da energia gerada pelo SMGE ser maior que a necessária para suprir essa demanda; dessa forma, o excedente energético é direcionado à CEB.

Na Figura 3.9 tem-se a imagem do conjunto dos cinco inversores e dos cinco retificadores, referentes às cinco turbinas, junto ao QT. Já a Figura 3.10 mostra um dos inversores e também um dos retificadores instalados.

[4] O retificador é um dispositivo capaz de transformar um sinal senoidal, ou seja, um sinal alternado, de tensão ou de corrente para um sinal contínuo.

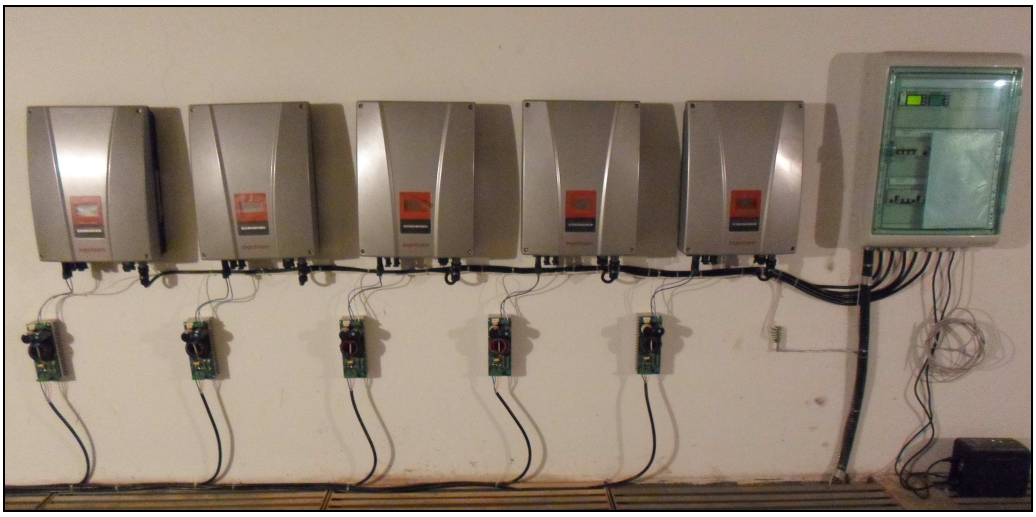


Figura 3.9 *Conjunto dos cinco inversores instalados, ao lado do QT, na Embaixada da Itália.*



Figura 3.10 *Inversor, à esquerda, e retificador, à direita, de uma das turbinas eólicas.*

A Figura 3.11 mostra detalhes do QT responsável por fazer a conexão da energia gerada com a rede elétrica da edificação. Ele está localizado ao lado dos inversores, como se vê na Figura 3.9. A energia convertida pelos inversores vai para esse quadro, de onde é destinada ao QG e em seguida distribuída em três fases para a carga da Embaixada (o QT está conectado ao QG por meio de cabos). Esse conjunto de equipamentos mostrado nas figuras está em uma sala localizada na laje do edifício da Embaixada italiana, ao lado das turbinas.



Figura 3.11 *Quadro Terminal do SMGE da Embaixada italiana.*

A empresa, de origem também italiana, que fabricou os inversores foi a Ingeteam, fabricante de equipamentos elétricos. Na Tabela 3.3 tem-se as especificações técnicas desse equipamento.

Tabela 3.3 *Características técnicas do inversor.*

Inversor	Ingecon Wind 2.5 TL
Potência	2.500 W
Tensão elétrica	230 V (AC)
Tensão de entrada	50 ~ 550 V (CC)
Frequência	50 ~ 60 Hz
Fator de potência	1
Eficiência máxima	96,6 %

Fonte: Ingeteam.

3.3.4 Diagrama Unifilar

O diagrama unifilar é muito importante para visualizar um sistema elétrico, contemplando toda a sua dimensão. A seguir, estão representados os diagramas unifilares do circuito de força e do circuito de comando do SMGE da Embaixada da Itália.

3.3.4.1 Descrição do Circuito de Força

Quando a turbina eólica é sensibilizada e acionada pela incidência do vento, ela rotaciona sob um determinado torque, gerando certa frequência. A corrente produzida é direcionada

para os retificadores, que convertem o sinal gerado – sinal alternado (CA) de frequência variável – em contínuo (CC). Logo em seguida, ele é direcionado para os inversores, que o convertem novamente em CA, sob uma frequência igual a da rede elétrica, ou seja, 60 Hz. Esse processo ocorre com as cinco turbinas que estão instaladas no edifício da Embaixada italiana; a cada uma delas estão associados um retificador e um inversor. Nas saídas dos inversores estão conectados disjuntores Diferencial Residual (DR) do fabricante italiano *Schneider Electric* (C40N VIGI 1P+N C10), com sensibilidade de 300mA; esses disjuntores são bipolares. Eles têm a função de proteger contra surtos elétricos, curtos-circuitos ou possíveis incêndios, além de proteger pessoas contra contatos indiretos e diretos (os DR's desligam o circuito instantaneamente ao detectar uma corrente de fuga na instalação elétrica). Esses dispositivos estão localizados no QT – Figura 3.11.

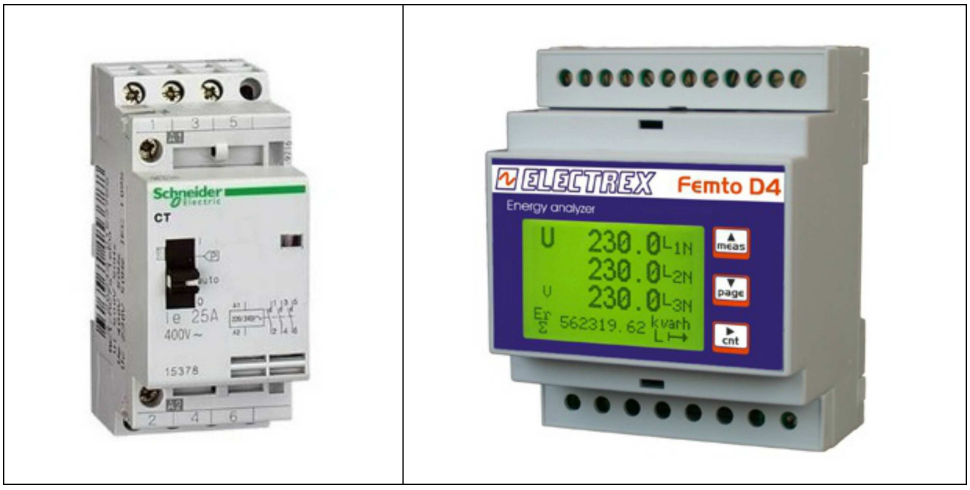


Fonte: Schneider Electric.

Figura 3.12 *Da esquerda para a direita: C40N VIGI 1P+N C10, C40N VIGI 3P+N C8, C60L 4P C20.*

Um dos polos do DR está conectado a uma das fases e o outro polo, ao neutro. Como são cinco turbinas, dois DR's estão ligados na fase L1, dois estão ligados na fase L2 e o outro é ligado na fase L3 (um dos polos ligados à fase e o outro ligado ao neutro N1); com o intuito de equilibrar a rede elétrica. Logo depois, há uma conexão entre as redes trifásicas: a que entra no edifício da Embaixada e a que chega nos DR's. Essa ligação é feita pela contatora modular DI (contato normalmente aberto), também do fabricante *Schneider Electric* (CT 4P 63A), com corrente nominal de 63A, de quatro polos. Esse equipamento também se encontra no QT.

Existe outro equipamento no QT responsável pela interface de segurança do sistema eólico, conectado à rede da CEB, em baixa tensão. Esse dispositivo é o Femto D4-SPI (PI) do fabricante italiano *ELECTREX*. Além de ter a capacidade de monitoramento do sistema elétrico, ele também tem as funções de contador/analisador de energia, permitindo o controle da "evolução da produção de eletricidade" do sistema eólico; avaliando, assim, o desempenho da rede elétrica durante a geração de energia (*ELECTREX – The Energy Saving Technology*). Esse equipamento está conectado à rede trifásica de entrada por meio de um disjuntor DR, do fabricante *Schneider Electric* (C40N VIGI 3P+N C8), com sensibilidade de 300mA e quatro polos.



Fonte: Schneider Electric e ELECTREX – The Energy Saving Technology.

Figura 3.13 *CT 4P 63A, à esquerda, e Femto D4-SPI, à direita.*

Além dessa conexão, o Femto estabelece uma ligação com três Contatores Modulares, de 40/5 A, que estão ligados na rede trifásica, um em cada fase. Esses contatores têm a função de controlar as três fases da rede elétrica, agindo como uma interface entre o sinal gerado pelas turbinas eólicas e a carga da Embaixada. Por fim, todo o sistema elétrico descrito está conectado a um disjuntor DR, com quatro polos, do fabricante *Schneider Electric* (C60L 4P C20), que está no QT, cuja sensibilidade em corrente não está especificada no diagrama unifilar; que, por sua vez, está ligado no QG de Baixa Tensão (BT) da edificação, que possui as seguintes especificações: 380/220 V – 60 Hz. As Figuras 3.12 e 3.13 mostram alguns modelos dos equipamentos descritos nesse sistema elétrico. E na Figura 3.15 tem-se o diagrama unifilar desse sistema – Circuito de Força.

3.3.4.2 Descrição do Circuito de Comando / Circuito Auxiliar

O Circuito de Comando, ou Circuito Auxiliar, é alimentado por uma fonte de alimentação ininterrupta (No-break). Este é um sistema de alimentação secundário de energia elétrica, que alimenta os dispositivos que estão ligados a ele, quando há uma interrupção do fornecimento de energia da fonte primária. A alimentação de uma UPS é fornecida por uma bateria, que é carregada quando a fonte primária de energia está funcionando corretamente. A autonomia (tempo de fornecimento de energia após o corte da fonte primária) desse tipo de equipamento é em torno de 10 a 15 minutos, dependendo também da quantidade de dispositivos eletrônicos que estão conectados a ele. A UPS da Embaixada da Itália possui as seguintes especificações: 230/230V, de tensão alternada (AC) para tensão alternada (AC), e 600 VA de potência. Ela alimenta uma ponte retificadora de tensão; dois terminais do Femto PI (um desses terminais está protegido por meio de um fusível com sensibilidade de 50mA); a bobina da contatora modular DI (os dois últimos equipamentos foram descritos no item 3.3.4.1) e o contato normalmente aberto da contatora modular K1, do fabricante italiano *Finder Componentes Ltda.*, cujas especificações técnicas de funcionamento não estão descritas no diagrama unifilar.

A ponte retificadora, que está sendo alimentada pelo No-break, possui as seguintes especificações: 230/24 Vdc, de tensão AC para tensão CC e sensibilidade de 400 mA. Esse equipamento alimenta a bobina da contatora modular K1, um dos terminais do Femto IP e dois terminais do equipamento *Yocto Net (To Ethernet Lan,* 10/100Mb*)*. Este último é um *gateway*[5] de rede que permite o acesso simultâneo a partir de PC's (computadores) e PLC's (via *Ethernet*[6] e RS-232[7] porta serial) para analisadores e dispositivos do fabricante *ELECTREX* ligados à rede RS-485[8]. Ele combina as funções de Modbus[9]/

[5] *Gateway*, ou ponte de ligação, é uma máquina que faz a interligação entre redes, separa domínios de colisão (área lógica) e traduz protocolos (controla e possibilita uma conexão, uma comunicação, uma transferência de dados entre dois sistemas computacionais).
[6] *Ethernet* é uma arquitetura de interconexão, baseada no envio de pacotes, para redes locais (Rede de Área Local).
[7] RS-232 (EIA RS-232C ou V.24) é um padrão de protocolo para troca serial (processo de enviar dados, sendo um bit de cada vez) de dados binários entre um DTE (terminal de dados, de *Data Terminal Equipment*) e um DCE (comunicador de dados, de *Data Communication Equipment*).
[8] RS-485, também conhecido como ANSI / TIA / EIA-485, TIA / EIA-485, EIA-485, é um padrão que define as características elétricas dos condutores e receptores para uso em sistemas digitais equilibrados (linha de transmissão composta por dois condutores do mesmo tipo) de multipontos.
[9] *Modbus* é um protocolo de comunicação de dados utilizados, principalmente, em sistemas de automação industrial.

TCP[10] e servidor, servidor web e servidor de FTP[11]. Além disso, ele também é atualizável por um código PUK[12] (*ELECTREX – The Eenergy Saving Technology*). Esse equipamento encontra-se conectado ao Femto PI, por meio de duas entradas; analisando, assim, os parâmetros da rede elétrica medidos por ele, cujos dados são destinados a um computador central. Na Figura 3.14 tem-se um modelo do equipamento *Yocto Net* e a Figura 3.16 mostra o diagrama unifilar para Circuito de Comando/Auxiliar, descrito acima.



Fonte: ELECTREX – The Energy Saving Technology.

Figura 3.14 *Yocto Net (To Ethernet Lan, 10/100 Mb).*

Avaliando o sistema eólico da Embaixada da Itália, nota-se que os Circuitos de Força e de Comando/Auxiliar estão relacionados. Um dos principais aspectos a ser notado é a questão do paralelismo da rede, ou seja, quando o sistema eólico entra com um percentual energético para alimentar a carga da Embaixada. O dispositivo Femto é o responsável pela realização desse paralelismo, juntamente com as contatoras modular DI e K1. Quando o Femto PI capta uma geração de eletricidade propiciada pelas turbinas eólicas, a bobina de K1 energiza, fazendo com que o seu contato, normalmente aberto, seja ligado, ou seja, que o contato se feche. Com isso, a bobina de DI é energizada fazendo com que o seu contato normalmente aberto seja ligado, ou seja, venha se fechar. Assim, a energia gerada pelas turbinas é direcionada para a carga da Embaixada.

[10] O TCP (*Transmission Control Protocol* – Protocolo de Controle de Transmissão) é um dos protocolos sob os quais o núcleo da internet se estabiliza.
[11] O FTP (File Transfer Protocol – Protocolo de Transferência de Arquivos) é um protocolo bastante utilizado na internet, na qual a sua forma é muito rápida e versátil para a transmissão de dados.
[12] O código PUK (*PIN Uniock Key*) é uma combinação numérica de oito algarismos, presente na maioria dos cartões de comunicação móvel (telemóveis). Ele tem a função de desbloquear um cartão, se um *PIN* errado for colocado mais de três vezes.

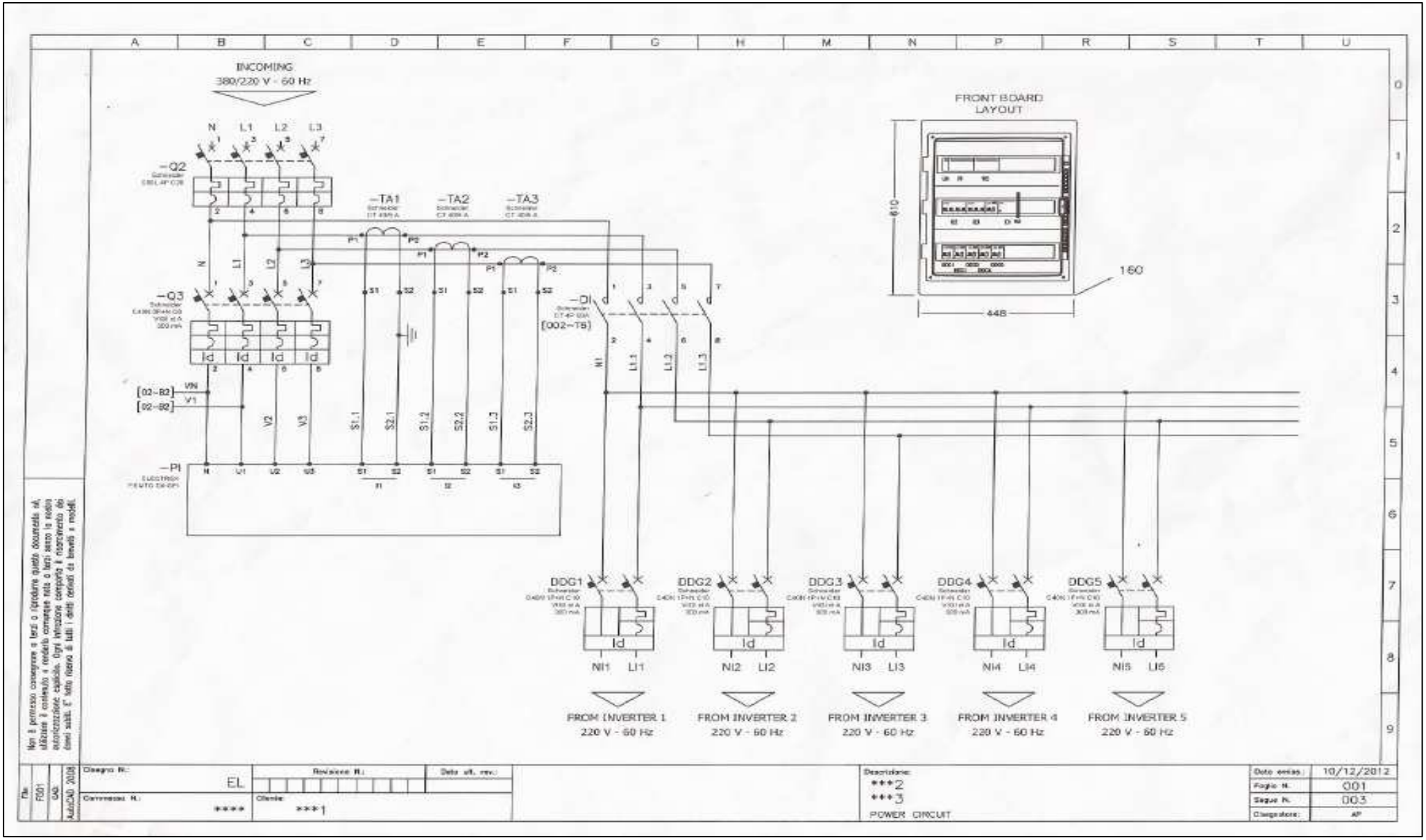


Figura 3.15 *Diagrama unifilar: circuito de força.*

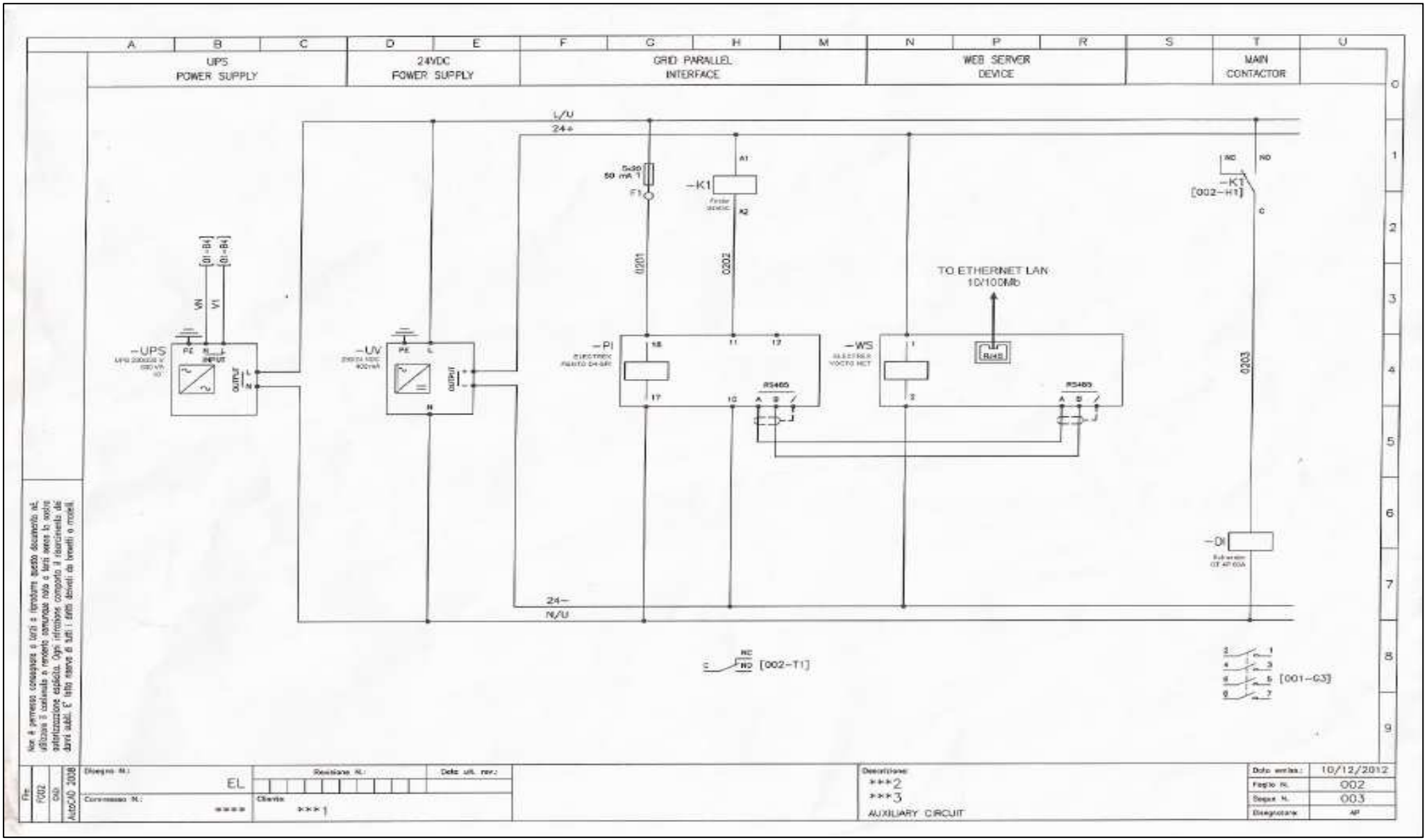


Figura 3.16 *Diagrama unifilar: circuito de comando.*

3.3.5 Ferramenta Computacional

Para desenvolver o presente estudo, utilizou-se o Excel – planilha eletrônica do pacote Office da Microsoft. Ele foi usado para realizar as simulações computacionais, fazer os cálculos pertinentes, construir os gráficos, produzir as tabelas e coletar os resultados pretendidos para a elaboração deste trabalho.

3.4 MÉTODOS

3.4.1 Modelagem

3.4.1.1 Aspectos Gerais

Para obter uma representação do funcionamento do SMGE da Embaixada italiana, foi realizada uma modelagem com os dados da velocidade do vento com a planilha eletrônica Excel, gerando tabelas e gráficos para avaliar o seu comportamento. Esse sistema eólico está interligado ao sistema da CEB e está conectado ao QG, que alimenta a carga da Embaixada – essa interligação entre o SMGE e a CEB foi representada por meio de um diagrama de blocos. Dessa forma, são avaliados os dados obtidos por meio das planilhas eletrônicas e as suas respectivas contribuições para as simulações. Também é apresentado o fluxo de energia estabelecido desde o acionamento das turbinas eólicas, causado pelo vento, até o QG. Além disso, algumas considerações serão realizadas a fim de simplificar as pretensões desse estudo. Este é baseado na metodologia criada no seguinte trabalho: (CHAGAS e SOARES, 2014), que é explicada e analisada adiante.

3.4.1.2 Modelagem do SMGE

Para todo tipo de sistema adotado e instalado em um determinado local, é fundamental ter o conhecimento do seu funcionamento e dos detalhes estruturais. Todo sistema de geração eólico depende, sobretudo, da velocidade de incidência do vento sobre as turbinas. Esse deslocamento de ar promove o movimento dessas turbinas, convertendo a energia cinética em mecânica e esta em energia elétrica. As turbinas instaladas na Embaixada são de eixo

vertical e, dessa maneira, a direção de incidência do vento sobre elas não é importante, mas sim, a velocidade com que ele as atinge.

Os dados obtidos para realizar o estudo do SMGE da Embaixada da Itália foram obtidos pelo SONDA, no ano de 2013, a 10m de altura, por uma torre anemométrica. Com esses dados em mãos tem-se como avaliar o comportamento do vento em Brasília durante o período de um ano, o que garante maior eficiência no estudo pretendido.

A metodologia empregada por (CHAGAS e SOARES, 2014) nas simulações é a adotada para a realização das simulações com o SMGE. A seguir, é detalhado o procedimento empregado para avaliar o comportamento da geração, das perdas e de todos os fatores pertinentes para a avaliação técnica do SMGE da Embaixada.

Para o cálculo da potência de um dos geradores eólicos, baseou-se na curva de potência – dada em W – *versus* a velocidade – dada em m/s –, fornecida pelo fabricante das turbinas eólicas (Gráfico 3.3). O fabricante, entretanto, não fornece a equação correspondente à curva de potência no catálogo. Escolheu-se, dessa maneira, uma forma mais simples para extrair os valores desejados, fazendo uma modelagem matemática que se aproxima consideravelmente da equação original da curva. Pegaram-se sete pontos da curva fornecida pelo fabricante (Gráfico 3.3, descrito anteriormente) e definiram-se seis retas; os pontos escolhidos para fazer essa modelagem foram: A = (1,8;0), B = (6;200), C = (7,6;400), D = (9,6;800), E = (10;930); F = (11;1.000) e G = (14;1.100). Com as retas definidas, constatou-se que toda geração proveniente do vento, cujo valor da velocidade seja inferior a 1,8 m/s, deve ser considerada nula (a Tabela 3.2 apresenta *cut-in* de 1,5 m/s para as turbinas eólicas, entretanto, estabeleceu-se o valor mencionado para seguir a metodologia adotada neste trabalho); assim como toda geração proveniente do vento, cujo valor da velocidade seja superior a 14 m/s, deve ser igual a 1.100 W. As retas obtidas, por meio da união entre dois pontos consecutivos, foram: $\overline{AB}$, $\overline{BC}$, $\overline{CD}$, $\overline{DE}$, $\overline{EF}$, $\overline{FG}$ e $\overline{H}$. Conhecendo um ponto pertencente a uma reta e a sua declividade podemos encontrar a sua equação, que é expressa da seguinte forma:

$$y - y_0 = m(x - x_0) \tag{3.2}$$

y e x = Incógnitas da equação;

m = Declividade da reta ou coeficiente angular da reta;

y_0 e x_0 = Pontos pertencentes à reta.

Foram obtidas, assim, as seguintes equações das retas, baseadas nos pontos desejados e na Equação (3.2) descrita acima:

$\overline{A}: \forall v \leq 1{,}8$, tem-se $P_1 = 0$;

$\overline{AB}: \forall 1{,}8 \leq v \leq 6$, tem-se $P_1 = 47{,}62(v - 1{,}8)$;

$\overline{BC}: \forall 6 \leq v \leq 7{,}6$, tem-se $P_1 = 200 + 125(v - 6)$;

$\overline{CD}: \forall 7{,}6 \leq v \leq 9{,}6$, tem-se $P_1 = 400 + 200(v - 7{,}6)$;

$\overline{DE}: \forall 9{,}6 \leq v \leq 10$, tem-se $P_1 = 800 + 325(v - 9{,}6)$;

$\overline{EF}: \forall 10 \leq v \leq 11$, tem-se $P_1 = 930 + 70(v - 10)$;

$\overline{FG}: \forall 11 \leq v \leq 14$, tem-se $P_1 = 1.000 + 33{,}33(v - 11)$;

$\overline{H}: \forall v > 14$, tem-se $P_1 = 1.100$.

P_1 = Potência gerada por apenas um dos geradores eólicos [W];

v = Velocidade do vento incidente nas turbinas eólicas [m/s].

O Gráfico 3.3 mostra a indicação dos pontos citados e as respectivas potências e velocidades do vento a eles associados.

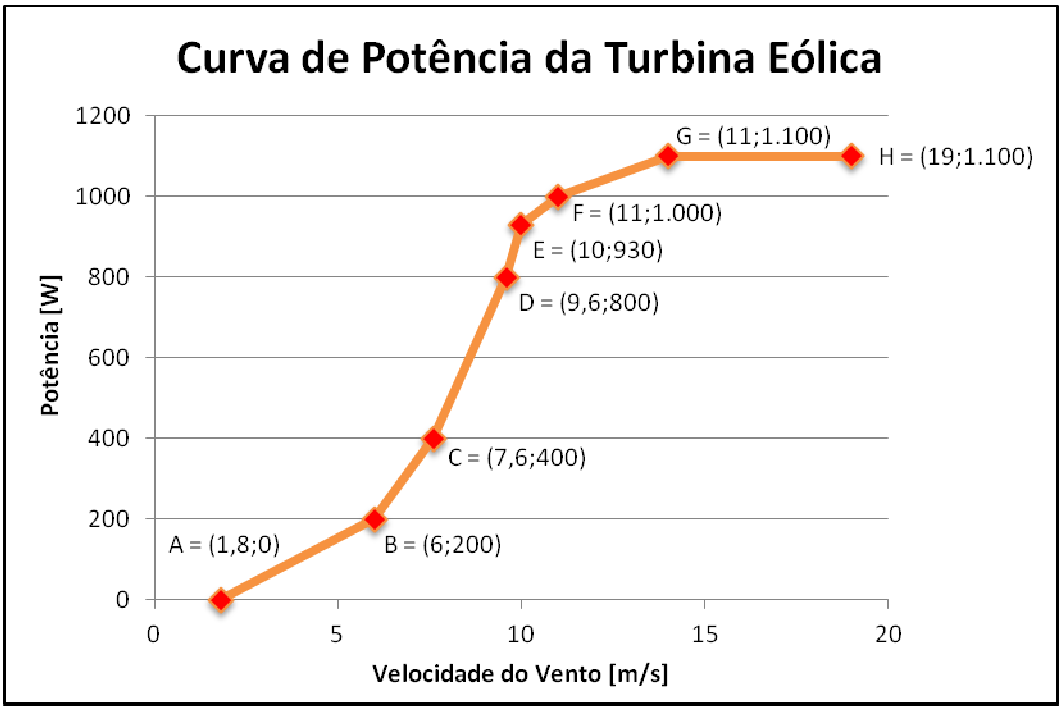


Gráfico 3.3 *Curva de potência modelada da turbina eólica.*

Tem-se, assim, uma forma de calcular a potência gerada por um dos geradores eólicos. Por meio da Excel, utilizando o caractere “SE”, criou-se uma fórmula que contêm todas as seis retas, de acordo com os intervalos associados. Obtêm-se, dessa forma, os valores correspondentes da potência da turbina, de acordo com a velocidade de vento incidente sobre elas.

Dado os cálculos para os aerogeradores, o próximo passo são os retificadores e, logo em seguida, os inversores. Para obter a potência de entrada neste último equipamento, é necessário apenas subtrair as perdas nos cabos – que fazem a ligação entre a turbina eólica e o inversor – da potência gerada. O cabo empregado é o Cabo Padrão Solar 1 kV e 6 mm² de diâmetro, cuja resistência é de 3,39 Ω/Km (CHAGAS e SOARES, 2014). Esse cabo possui um comprimento de aproximadamente 30m. A resistência, dessa maneira é de 0,1017 Ω (considerando a fase e o neutro, essa resistência dobra, passando para 0,2034 Ω). Encontra-se, assim, a corrente que passa por esse cabo, que é dada por:

$$I_1 = \frac{P_1}{V_1} \tag{3.3}$$

I_1 = Corrente que passa pelo cabo [A], que faz a ligação entre a turbina com o retificador e o inversor;

V_1 = Tensão nominal de saída da turbina eólica [V]; cujo valor é de 230 V, de acordo com a Tabela 3.1 (dados do fabricante);

P_1 = Potência gerada por apenas um dos geradores eólicos [W].

Temos, assim, a potência na entrada do inversor, que é dada pela seguinte equação:

$$P_2 = P_1 - (R_{C1} * I_1^{\,2}) \tag{3.4}$$

P_2 = Potência na entrada do inversor [W];

P_1 = Potência gerada por apenas um dos geradores eólicos [W];

I_1 = Corrente que passa pelo cabo [A], que faz a ligação entre a turbina com o retificador e o inversor;

R_{C1} = Resistência do cabo [Ω], que faz a conexão entre o gerador eólico com o retificador e o inversor.

Conhecendo a potência na entrada do inversor, pode-se obter também a potência na saída dele, por meio do seu rendimento, que é de 96,6% – de acordo com a Tabela 3.2 do fabricante. Tem-se, dessa forma, o seguinte cálculo:

$$P_3 = 0{,}966 * P_2 \tag{3.5}$$

P_3 = Potência na saída do inversor [W] – uma consideração a ser feita é que a saída do inversor esteja conectada ao barramento do QG, que fornece energia para a carga da Embaixada. Atualmente, não há essa conexão;

P_2 = Potência na entrada do inversor [W].

Depois desse procedimento, obtêm-se a potência total das três fases; cujo valor corresponde à soma da potência de saída dos cinco inversores, subtraído das perdas nos cabos que fazem a ligação entre o retificador e o inversor com o QG. Esses cabos possuem um comprimento de aproximadamente 7m; apresentando, assim, uma resistência de 0,02373 Ω (ao considerar a fase e o neutro essa resistência dobra, passando para

0,04746 Ω). Há, dessa forma, a necessidade de se calcular a corrente elétrica que sai do inversor e vai para o QG, por meio desse cabeamento. Essa corrente pode ser encontrada por meio da seguinte expressão:

$$I_2 = \frac{P_3}{V_2 * fp} \tag{3.6}$$

I_2 = Corrente que passa pelo cabo [A], que faz a ligação entre o inversor e o QG;

V_2 = Tensão nominal de saída dos inversores [V], cujo valor é de 230 V, de acordo com a Tabela 3.2 (dados do fabricante);

P_3 = Potência na saída do inversor [W];

fp = Fator de potência (Tabela 3.3: fp = 1).

Obtemos, por fim, a potência nas três fases; que é dada por:

$$P_4 = 5 * [P_3 - (R_{C2} * I_2{}^2)] \tag{3.7}$$

P_4 = Potência das três fases que chegam ao QG [W], gerada pelas cinco turbinas;

P_3 = Potência na saída do inversor [W];

I_2 = Corrente que passa pelo cabo [A], que faz a ligação entre o inversor e o QG;

R_{C2} = Resistência do cabo [Ω], que faz a conexão entre o retificador e o inversor com o QG.

Na Figura 3.17 tem-se o diagrama de fluxo de potência do SMGE da Embaixada indicando P_1, P_2, P_3 e P_4.

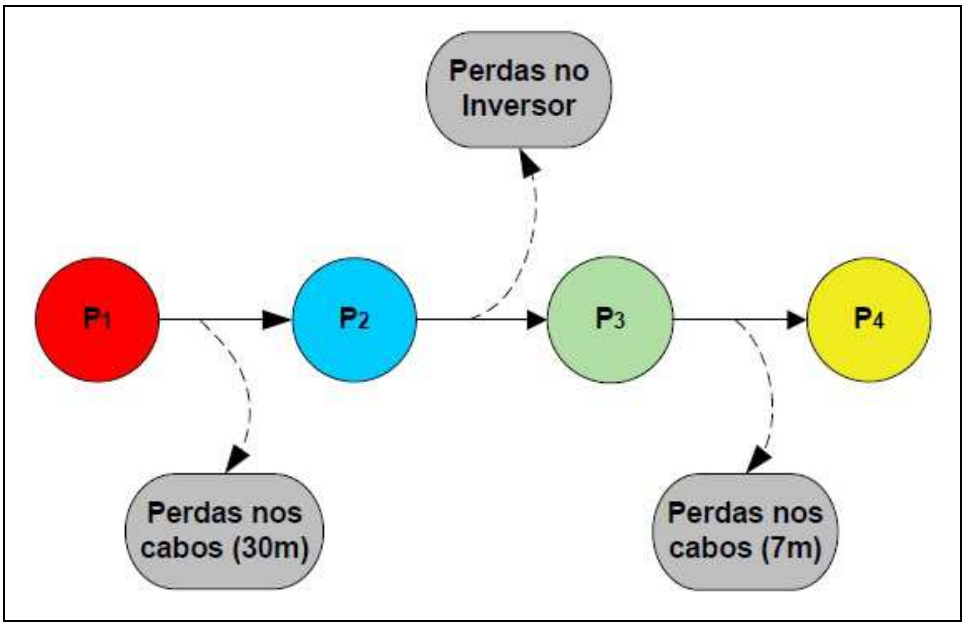


Figura 3.17 *Diagrama de fluxo de potência para o SMGE da Embaixada italiana.*

Para calcular a energia gerada, a cada minuto, por meio da potência P_4, empregou-se a seguinte relação:

$$E_1 = \frac{P_4}{60 * 1000} \tag{3.8}$$

E_1 = Energia gerada pelas cinco turbinas eólicas a cada minuto [kWh];

P_4 = Potência das três fases que chegam ao QG [W].

Como os dados do SONDA para a velocidade do vento são a cada minuto, para a cidade de Brasília, houve a necessidade de dividir o resultado da potência das três fases, P_4, por 60.000 (1 minuto = 1/60 hora e 1 W = 1/1000 kW); fazendo a energia gerada ficar em kWh. Tem-se, dessa forma, o resultado mensal de energia produzida pelo sistema eólico como sendo a soma de toda energia gerada, a cada minuto, durante o mês (Equação 3.9).

$$E_A = \sum_{i=1}^{n} (E_1)_i = \frac{1}{60 * 1000} \sum_{j=1}^{n} (P_4)_j \tag{3.9}$$

E_A = Energia mensal produzida pelo SMGE [kWh];

E_1 = Energia gerada pelas cinco turbinas eólicas a cada minuto [kWh];

P_4 = Potência das três fases que chegam ao QG [W];

n = Quantidade de dados referentes aos minutos em cada mês avaliado.

A metodologia apresentada (Figura 3.18) corresponde à empregada para fazer a modelagem da cidade de Brasília, referente ao SMGE.

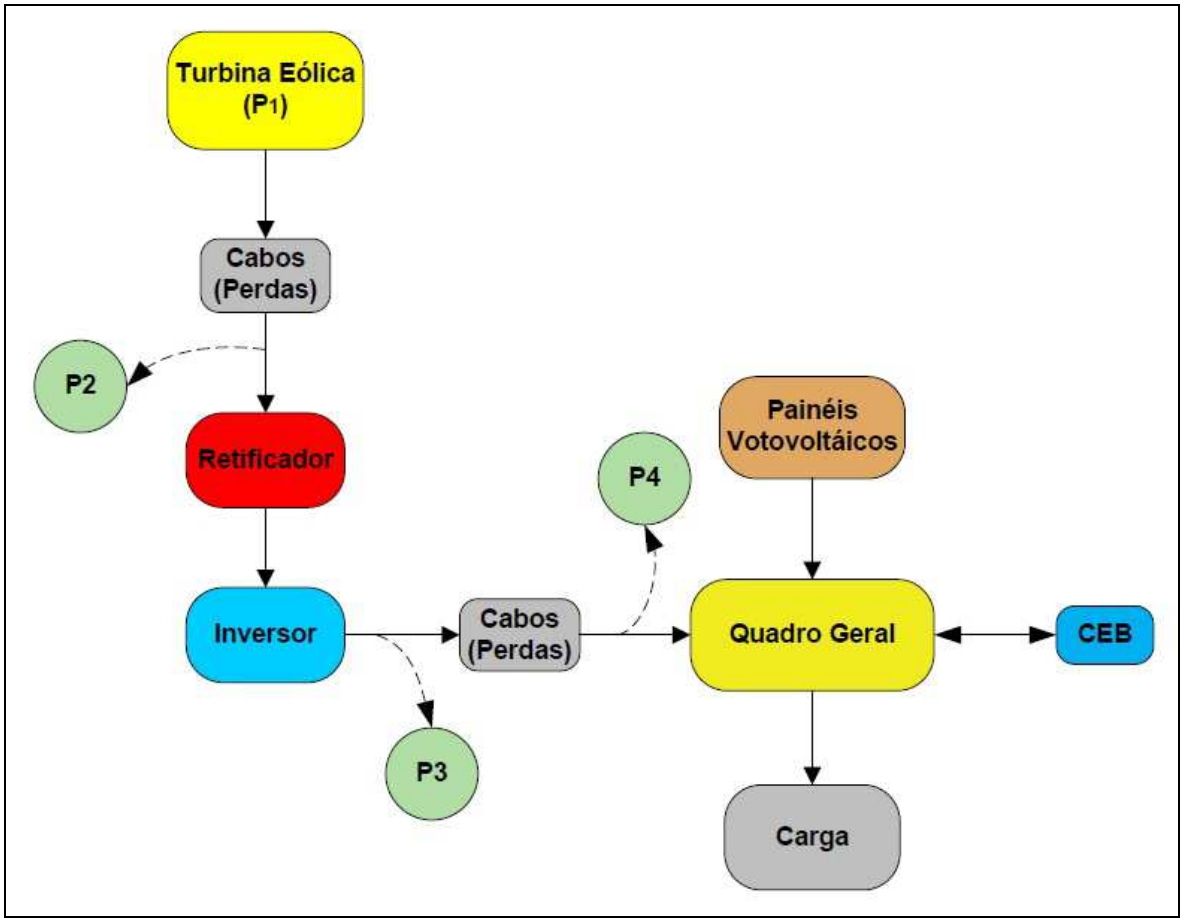


Figura 3.18 *Fluxograma do método empregado na modelagem do SMGE.*

Para o cálculo da energia mensal gerada para as cidades de Ourinhos – SP, Petrolina – PE e São Martinho da Serra – RS, foram desconsideradas todas as possíveis perdas de energia e utilizou-se a Equação 3.10 e a Equação 3.11.

$$E_2 = 5 * \left(\frac{P_1}{60 * 1000} \right) \tag{3.10}$$

E_2 = Energia gerada pelas cinco turbinas eólicas a cada minuto [kWh];

P_1 = Potência gerada por apenas um dos geradores eólicos [W].

$$E_B = \sum_{i=1}^{n} (E_2)_i = \frac{5}{60 * 1000} \sum_{j=1}^{n} (P_1)_j \tag{3.11}$$

E_B = Energia mensal produzida pelas cinco turbinas [kWh];

E_2 = Energia gerada pelas cinco turbinas eólicas a cada minuto [kWh];

P_1 = Potência gerada por apenas um dos geradores eólicos [W];

n = Quantidade de dados referentes aos minutos em cada mês avaliado.

Para o cálculo da energia mensal gerada para as cidades de Belo Jardim – PE, São João do Cariri – PB e Triunfo – PE, foram desconsideradas todas as possíveis perdas de energia e utilizou-se a Equação 3.12 e a Equação 3.13. Como os dados do SONDA para a velocidade do vento são a cada 10 minutos, para essas cidades, houve a necessidade de dividir a potência gerada, P_1, por 6.000 (10 minutos = 1/6 hora e 1 W = 1/1000 kW); fazendo a energia gerada ficar em kWh.

$$E_3 = 5 * \left(\frac{P_1}{6 * 1000} \right) \tag{3.12}$$

E_3 = Energia gerada pelas cinco turbinas eólicas a cada 10 minutos [kWh];

P_1 = Potência gerada por apenas um dos geradores eólicos [W].

$$E_C = \sum_{i=1}^{n} (E_3)_i = \frac{5}{6 * 1000} \sum_{j=1}^{n} (P_1)_j \tag{3.13}$$

E_C = Energia mensal produzida pelas cinco turbinas [kWh];

E_3 = Energia gerada pelas cinco turbinas eólicas a cada 10 minutos [kWh];

P_1 = Potência gerada por apenas um dos geradores eólicos [W];

n = Quantidade de dados referentes aos minutos em cada mês avaliado.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aspectos relacionados ao projeto de energia renovável da Embaixada Verde, os dados obtidos por meio do SONDA, as turbinas eólicas instaladas na Embaixada, os diagramas unifilares e, por fim, a metodologia empregada para avaliar a energia gerada por aquelas turbinas foram os principais tópicos discutidos neste capítulo. Mostraram-se, assim, os diferentes materiais empregados no desenvolvimento deste trabalho e a metodologia utilizada para a sua estruturação.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos capítulos anteriores destacaram-se os temas mais importantes a serem discutidos: geração eólica, GD, dados do SONDA, dados do sistema instalado na Embaixada da Itália e a metodologia usada para a modelagem pretendida. Com o detalhamento destas informações, foi possível realizar a modelagem proposta para a cidade de Brasília (para as demais cidades são apresentados apenas resultados pautados na modelagem realizada), baseada na metodologia adotada para a turbina eólica instalada na Embaixada da Itália. Originaram-se, dessa forma, resultados teóricos e computacionais, que serão expostos e avaliados. O presente capítulo discute, assim, os resultados gerados na realização da modelagem empregada e também da metodologia indicada.

4.2 ESTRUTURAÇÃO DA MODELAGEM

4.2.1 Aspectos Gerais

O SMGE instalado na Embaixada da Itália não está conectado com a carga do edifício da Embaixada; dessa forma, ele não contribui para o fornecimento de energia na alimentação dessa carga. Com isso, a análise apresentada é de cunho teórico, cujas informações deverão ser verificadas por meio de medições programadas, ou são suposições julgadas relevantes e resultantes de inferências.

Inicialmente é discutida a disponibilidade de recurso eólico na cidade de Brasília, onde se encontra a Embaixada italiana. As planilhas eletrônicas do Excel, utilizadas para fazer a modelagem dos dados para essa cidade, possuem as seguintes informações: dias; minutos; velocidade do vento a 10m, em m/s; potência do vento, em W; potência de saída do gerador eólico, em W; energia produzida pelo gerador, em kWh; potência na entrada do inversor, em W; potência na saída do inversor, em W; potência total nas fases, em W; e energia total gerada, após as perdas, em kWh. As planilhas usadas para fazer a modelagem das demais cidades possuem as mesmas informações das utilizadas para a cidade de Brasília, exceto: potência na entrada do inversor; potência na saída do inversor; potência

total das fases; e energia total gerada, após as perdas. Essas informações específicas estão relacionadas ao sistema instalado na Embaixada da Itália situada em Brasília, que não se aplicam para as outras cidades (os dados referentes à velocidade do vento estão de acordo como foi relatado no Capítulo 3, em relação às alturas).

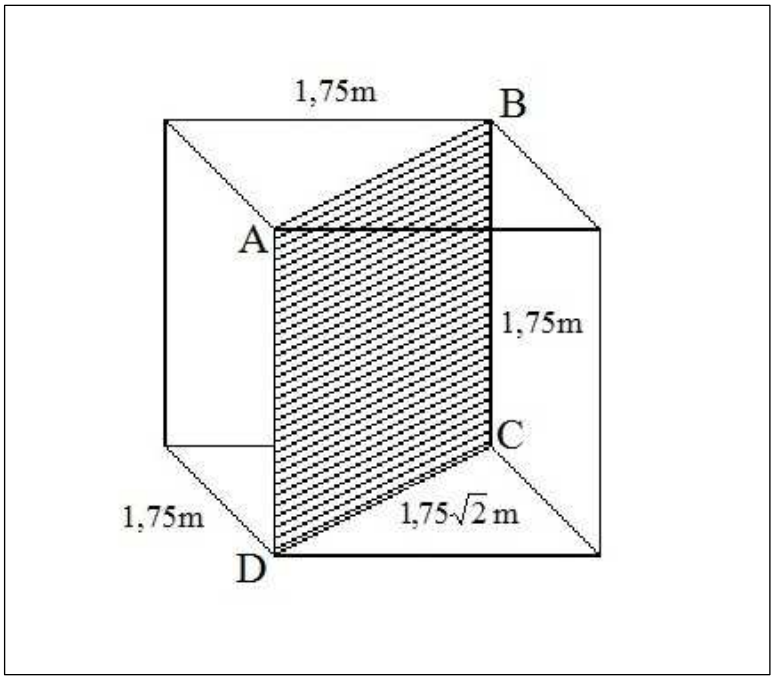
4.2.2 Planilha

Está representada na Tabela 4.1 uma pequena parte da planilha eletrônica do Excel, empregada para a realização do estudo desejado – ela corresponde à modelagem realizada no primeiro dia do mês de julho, em 2013, para a cidade de Brasília. Nessa planilha estão apresentadas apenas 24 linhas, referentes aos dados 960 a 983 da velocidade do vento, que correspondem aos minutos analisados no primeiro dia desse mês. Como essa planilha é constituída de 44.640 valores de velocidade (total de minutos em 31 dias), não é possível representá-la na sua totalidade. Percebe-se, dessa forma, por meio daquela tabela, todas as etapas do processo de geração de energia do SMGE da Embaixada da Itália. Todos os valores gerados pela planilha eletrônica são baseado nos dados da velocidade do vento do SONDA.

Na Tabela 4.1 tem-se, em azul, a potência do vento ao incidir em uma determinada área das turbinas eólicas instaladas na Embaixada; em vermelho, a potência gerada pelo aerogerador; e, em verde, está representada a energia gerada por esse equipamento e a energia total produzida após as perdas. Para obter a potência do vento, utilizou-se a Equação 2.6. A área adotada corresponde ao quadrilátero ABCD, cujas dimensões são de 1,75 x 1,75$\sqrt{2}$ m (onde o vento incide sobre as turbinas); essa área está representada na Figura 4.1. Esta traz um cubo com as dimensões dessas turbinas (1,75 x 1,75 x 1,75 m), dado que elas possuem um formato cúbico, conforme detalhado no Capítulo 3.

Tabela 4.1 *Valores referentes ao SMGE da Embaixada da Itália em Brasília, a partir dos dados da velocidade do vento do SONDA.*

Dados Gerados a Cada Minuto									
Dias	**Minutos**	**Velocidade do Vento [m/s] a 10m**	**Potência do Vento [W]**	**Potência na Saída do Gerador [W]**	**Energia Gerada [kWh]**	**Potência na Entrada do Inversor [W]**	**Potência na Saída do Inversor [W]**	**Potência Total nas Fases [W]**	**Energia Total Produzida [kWh]**
1	960	1,53	47,41	0	0	0	0	0	0
1	961	2,22	144,34	19,81	0,002	19,79	19,12	95,60	0,002
1	962	2,59	231,51	37,81	0,003	37,76	36,47	182,33	0,003
1	963	2,31	162,65	24,10	0,002	24,07	23,25	116,26	0,002
1	964	1,92	93,44	5,57	0,001	5,57	5,38	26,90	0,001
1	965	0,99	12,91	0	0	0	0	0	0
1	966	1,07	16,16	0	0	0	0	0	0
1	967	1,61	55,15	0	0	0	0	0	0
1	968	2,20	140,27	18,81	0,002	18,80	18,16	90,78	0,002
1	969	1,58	52,52	0	0	0	0	0	0
1	970	1,91	91,99	5,10	0,001	5,09	4,92	24,61	0,001
1	971	2,25	151,89	21,62	0,002	21,60	20,87	104,33	0,002
1	972	2,00	105,47	9,33	0,001	9,33	9,01	45,06	0,001
1	973	2,12	125,67	15,05	0,001	15,04	14,53	72,63	0,001
1	974	1,96	99,56	7,52	0,001	7,52	7,27	36,33	0,001
1	975	1,45	40,19	0	0	0	0	0	0
1	976	0,93	10,50	0	0	0	0	0	0
1	977	1,08	16,52	0	0	0	0	0	0
1	978	1,35	32,34	0	0	0	0	0	0
1	979	1,96	99,72	7,57	0,001	7,57	7,31	36,56	0,001
1	980	2,28	156,59	22,71	0,002	22,69	21,92	109,61	0,002
1	981	2,04	113,27	11,62	0,001	11,61	11,22	56,09	0,001
1	982	2,28	156,18	22,62	0,002	22,60	21,83	109,15	0,002
1	983	2,17	136,10	17,76	0,002	17,75	17,15	85,73	0,001



Fonte: Disponível em: <diadematematica.com/vestibular/conteudo/GE_PRI.htm>. Acesso em: 22 out. 2014. (modificado)

Figura 4.1 Área de incidência do vento sobre a turbina eólica.

A Figura 4.2 retrata o diagrama de blocos referente às etapas de geração do SMGE da Embaixada italiana, de acordo com a Figura 3.5 e com a Tabela 4.1. Naquela figura tem-se a representação, durante um dia, de um dos geradores eólicos – sendo acionado pelo vento, na representação a velocidade de incidência sobre a turbina corresponde a 2,46 m/s (valor aleatório entre os valores de mínimo, 2,35 m/s, e máximo, 2,48 m/s, para a realização da representação), tendo uma geração de 0,75 kWh –; as perdas no cabeamento entre o gerador e o inversor foram desprezíveis, mantendo os 0,75 kWh; um dos inversores – com um rendimento de 94,34%, valor apenas representativo (tendo na sua saída uma energia de 0,71 kWh) –; e novamente as perdas no cabeamento que são desprezíveis – ligação entre o inversor ao QT (a energia que chega ao QT possui o mesmo valor de 0,71 kWh). Na entrada do QG, a energia diária correspondente ao SMGE é 5 vezes a geração de uma das turbinas, totalizando 3,56 kWh. Na representação da figura, tem-se que a carga consumida pela Embaixada corresponde a 1.241 kWh e, como houve a geração de 3,56 kWh (na entrada das turbinas obteve 3,77 kWh) pelo SMGE, há a necessidade da CEB fornecer 1.237,44 kWh para atender a sua carga. O rendimento parcial do SMGE foi de 94,34% e esse sistema contribuiu com 0,287% do consumo da Embaixada.

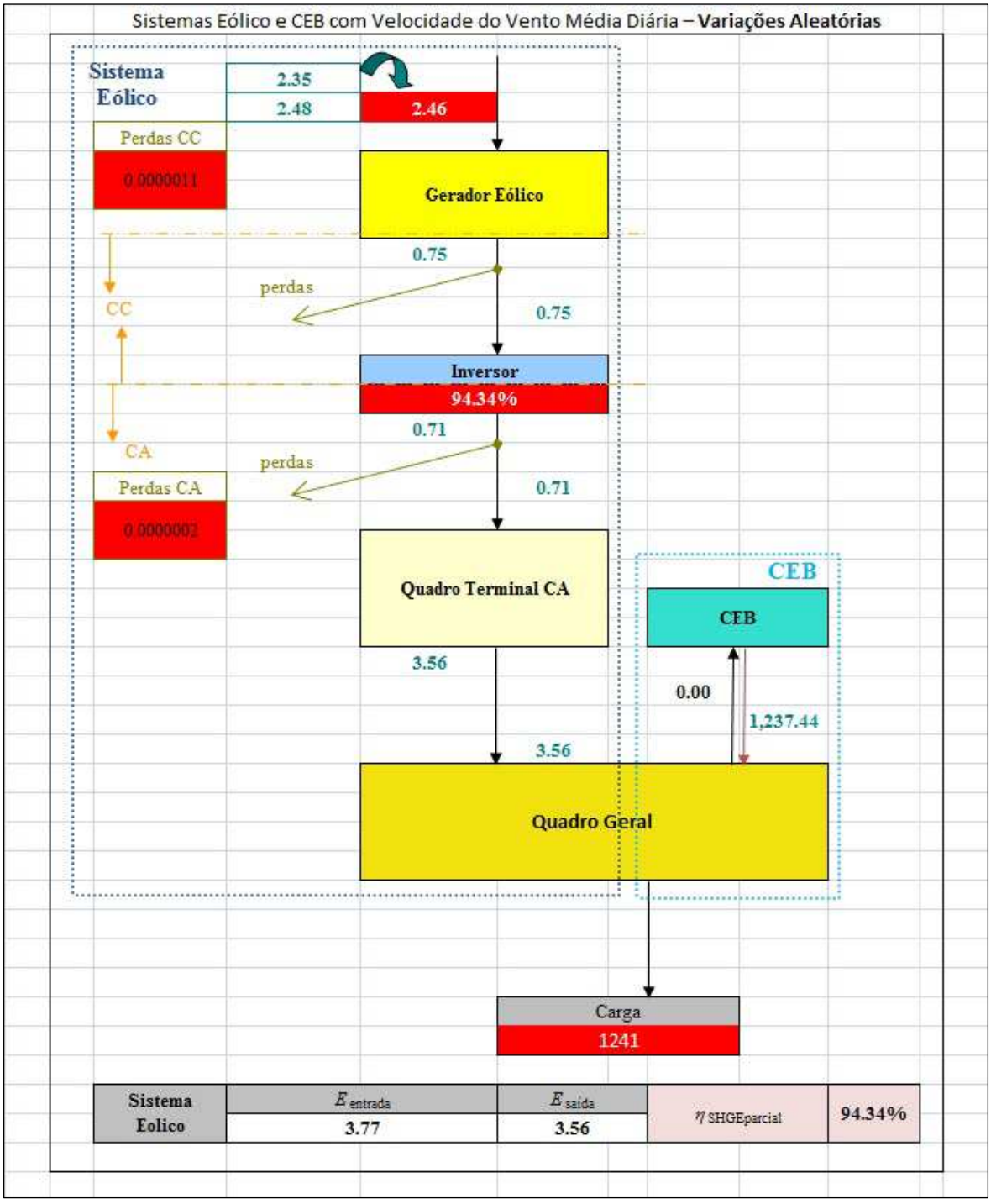


Figura 4.2 Diagrama de Blocos do SMGE da Embaixada da Itália.

4.3 CIDADE DE BRASÍLIA, DISTRITO FEDERAL

Os dados utilizados para a realização da modelagem foram obtidos do SONDA, referentes à velocidade do vento, dado a cada minuto, para a cidade de Brasília. Com esses dados, foi possível estimar a potência do vento que incide sobre as cinco turbinas, a potência gerada

por cada um destes equipamentos e também a energia gerada por todas elas, além da energia produzida após as perdas (ao passar pelos cabos condutores e inversores), para o SMGE da Embaixada italiana. A modelagem foi realizada para o ano de 2013. É realizada, para a cidade mencionada, uma análise mensal, correspondendo aos 12 meses do ano mencionado.

4.3.1 Mês de Janeiro

Para o mês de janeiro, verificou-se que a velocidade média do vento foi de 0,97 m/s. Para a modelagem empregada para o SMGE, constatou-se uma geração de 12,97 kWh e, devido às perdas, obteve um total de 12,51 kWh . Nesse mês a direção predominante do vento foi a Noroeste e o maior valor de velocidade do vento constatado foi 4,97 m/s.

O Gráfico 4.1 mostra a potência do vento, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência constatado foi de 1630,27 W, para o maior valor de velocidade do vento.

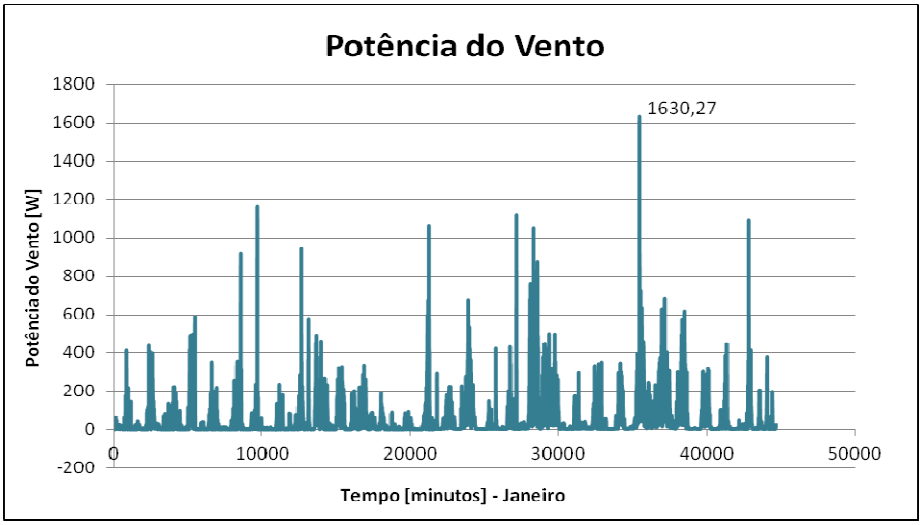


Gráfico 4.1 *Potência do vento ao longo do mês de janeiro.*

O Gráfico 4.2 revela a potência na saída do gerador, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência verificado foi de 151,05 W, para o maior valor de velocidade do vento. Verifica-se uma grande diferença entre a potência do vento incidente na turbina eólica e a que é realmente gerada por ela. Tomando como referência os valores das máximas potências mencionados, vê-se que a diferença entre tais valores são bastante

expressivos. A potência do vento chega a ser 979,29% maior que a potência gerada pela turbina. Uma das causas é que a modelagem considera que, para velocidades do vento inferiores a 1,8 m/s, a turbina não irá gerar nada de energia. Nos próximos meses avaliados, essa comparação entre as potências também é realizada; entretanto, são mencionados apenas os valores referentes a suas respectivas diferenças.

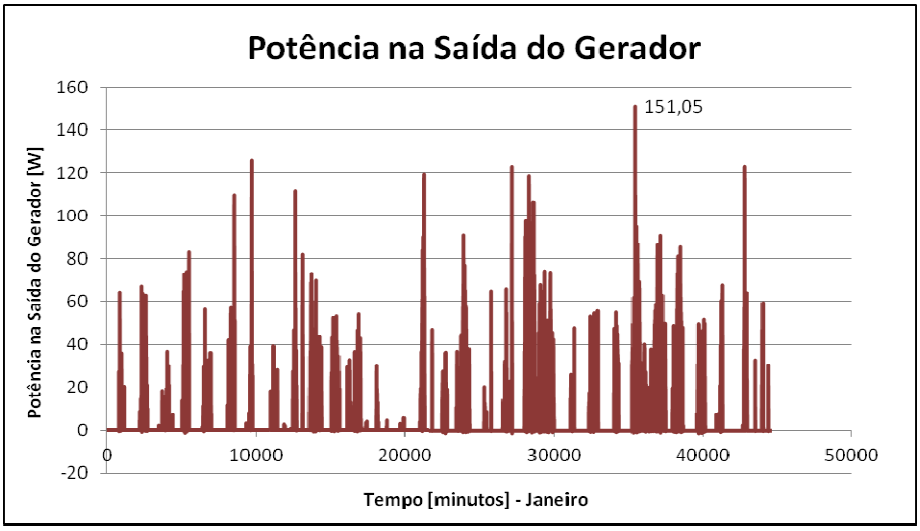


Gráfico 4.2 *Potência na saída do gerador eólico durante o mês de janeiro.*

O Gráfico 4.3 mostra a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de energia constatado foi de 0,0126 kWh, para o maior valor de velocidade do vento.

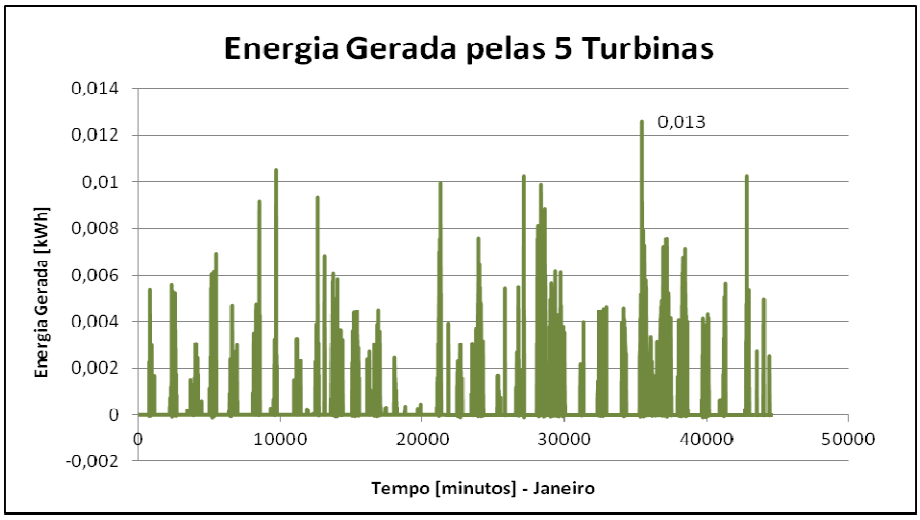


Gráfico 4.3 *Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de janeiro.*

O Gráfico 4.4, semelhante ao Gráfico 4.3, revela a energia total produzida pelas cinco turbinas, em kWh, durante o mês (expresso em minutos); após as perdas nos cabos condutores e nos inversores. O maior valor de energia verificado foi de 0,0121 kWh, para o maior valor de velocidade do vento. O valor total da energia gerada pelas turbinas e a energia total produzida por esses equipamentos, após as perdas, foram obtidas somando, a cada minuto, a energia produzida no mês; totalizando o valor mencionado no início desse tópico. Devido as perdas, a energia total produzida corresponde a 96,45%, ou seja, essas perdas correspondem 3,55% de toda energia gerada pelas turbinas.

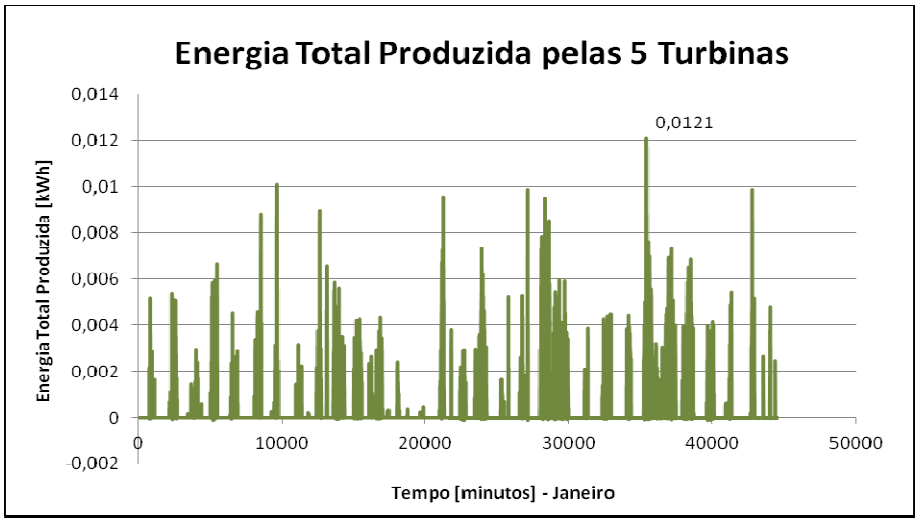


Gráfico 4.4 *Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de janeiro.*

No Gráfico 4.5 tem-se a Distribuição de Weibull, a qual relaciona a velocidade do vento e a sua frequência ao longo do mês. Esse gráfico foi construído por meio do Histograma, uma ferramenta de análise do Excel, com intervalo do bloco de 0 a 4 e variações a cada 0,25 unidades. Essa distribuição é importante para compreender o motivo da baixa geração de energia pelo sistema eólico, ao verificar o valor de velocidade que mais aparece ao longo do período analisado. Para o mês de janeiro, percebe-se que o valor da velocidade que possui maior frequência é de 0,5 m/s, o que é um valor bastante baixo – em relação à geração de energia a partir do vento. A modelagem empregada desconsidera geração de energia para as turbinas eólicas, para ventos inferiores a 1,8 m/s. Tal razão justifica a grande diferença entre a potência do vento incidente em determinada área da turbina e o que ela realmente produz. Além disso, por meio desse gráfico, obtêm-se o valor da energia gerada em uma determinada região; para isso, basta multiplicar os valores das velocidades

por suas respectivas frequências e também multiplicar o valor do resultado encontrado com a curva característica dessa distribuição, e depois somar todos os valores encontrados. Percebe-se, dessa forma, que conhecendo a curva de Distribuição de Weibull para uma determinada região, ao longo do ano, sabe-se o potencial eólico desse lugar, o que facilita os estudos referentes às implantações de turbinas e usinas eólicas nas regiões estudadas.

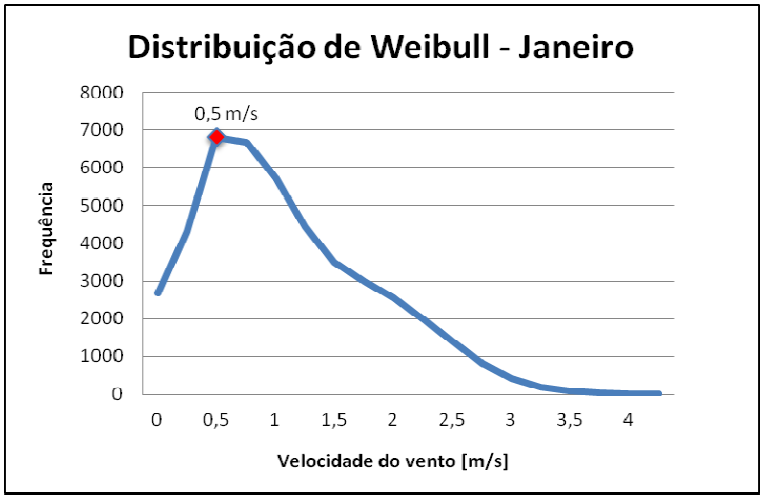
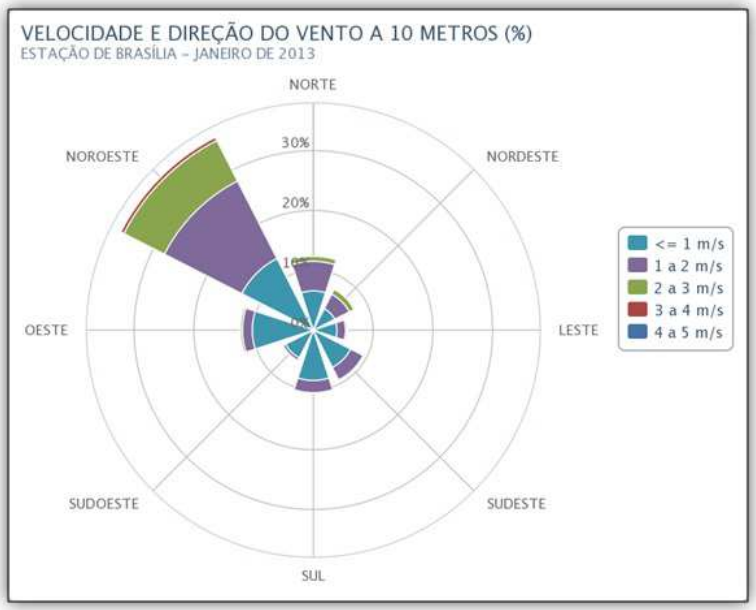


Gráfico 4.5 *Distribuição de Weibull para o mês de janeiro.*

O Gráfico 4.6 revela as direções de incidência do vento, a 10 m de altura, ao longo do mês de janeiro, e a sua velocidade. Percebe-se nesse gráfico que a direção predominante é a Noroeste e que a velocidade predominante (acima de 30%) é a que está entre 2 e 3 m/s.

Todo este estudo realizado para o mês de janeiro também foi feito para os demais meses do ano de 2013. Ele pode ser visto no Apêndice A.



Fonte: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). (modificado)

Gráfico 4.6 *Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de janeiro.*

4.3.2 Avaliação Anual

Na Tabela 4.2 têm-se os valores da velocidade média de cada mês, a 10 m de altura, em m/s; a energia mensal gerada pelas turbinas eólicas, em kWh; e, durante o mês, a energia total produzida após as perdas, em kWh. Dela também se obtém a velocidade média anual do vento em Brasília, que é 1,09 m/s; a energia anual gerada pelas turbinas eólicas que corresponde a 167,46 kWh (energia média anual gerada é igual a 13,95 kWh); e a energia anual total produzida que é 161,49 kWh (energia média anual produzida é igual a 13,46 kWh). Verifica-se também que as direções predominantes do vento, ao longo do ano de 2013, foram a Sul e a Sudeste; a pesar das turbinas eólicas do SMGE serem de eixo vertical – captam o vento de todas as direções –, foram inseridas na tabela as direções do vento com o intuito de enriquecer os dados avaliados.

Nos Gráficos 4.7 e 4.8, verificam-se a estimativa de energia gerada e a energia total que poderia ser produzida ao longo do ano de 2013, pelo SMGE da Embaixada da Itália. Verifica-se que o mês que obteve maior geração de energia foi setembro, com um total de 29,98 kWh. Devido às perdas nos cabos e nos inversores, esse valor caiu para 28,90 kWh; tendo, assim, um rendimento de 96,40% (as perdas equivaleram a 3,60% da energia

gerada). O último valor de energia mencionado refere-se à energia total produzida. O segundo mês que possui maior geração é agosto, com 20,83 kWh (20,09 kWh, após as perdas – 3,57%) e com rendimento de 96,43%; seguido pelo mês de outubro, com 18,35 kWh (17,70 kWh, depois das perdas – 3,56%) e com um rendimento de 96,44%. Ao longo de todos os meses do ano de 2013 a energia total produzida equivaleu a cerca de 96% da energia gerada; dessa forma, pode-se dizer que o rendimento do SMGE da Embaixada da Itália está em torno desse valor.

Tabela 4.2 *Avaliação anual para a cidade de Brasília – DF, baseado no SMGE da Embaixada da Itália.*

Meses	Direção Predominante do Vento	Velocidade Média do Vento [m/s]	Energia Gerada [kWh]	Energia Total Produzida [kWh]
Janeiro	Noroeste	0,97	12,97	12,51
Fevereiro	Sul	0,98	7,50	7,23
Março	Sul e Sudeste	0,97	10,10	9,74
Abril	Sul	0,97	5,74	5,53
Maio	Sul	1,10	8,49	8,19
Junho	Sul	1,11	8,22	7,93
Julho	Sul	1,22	16,32	15,74
Agosto	Sul e Sudeste	1,07	20,83	20,09
Setembro	Sul e Sudeste	1,28	29,98	28,90
Outubro	Sul e Sudeste	1,24	18,35	17,70
Novembro	Noroeste, Sul e Sudeste	1,04	12,30	11,87
Dezembro	Noroeste	1,09	16,66	16,07
Velocidade Média Anual do Vento e Energia Média		**1,09**	**13,95**	**13,46**
Total de Energia			**167,46**	**161,49**

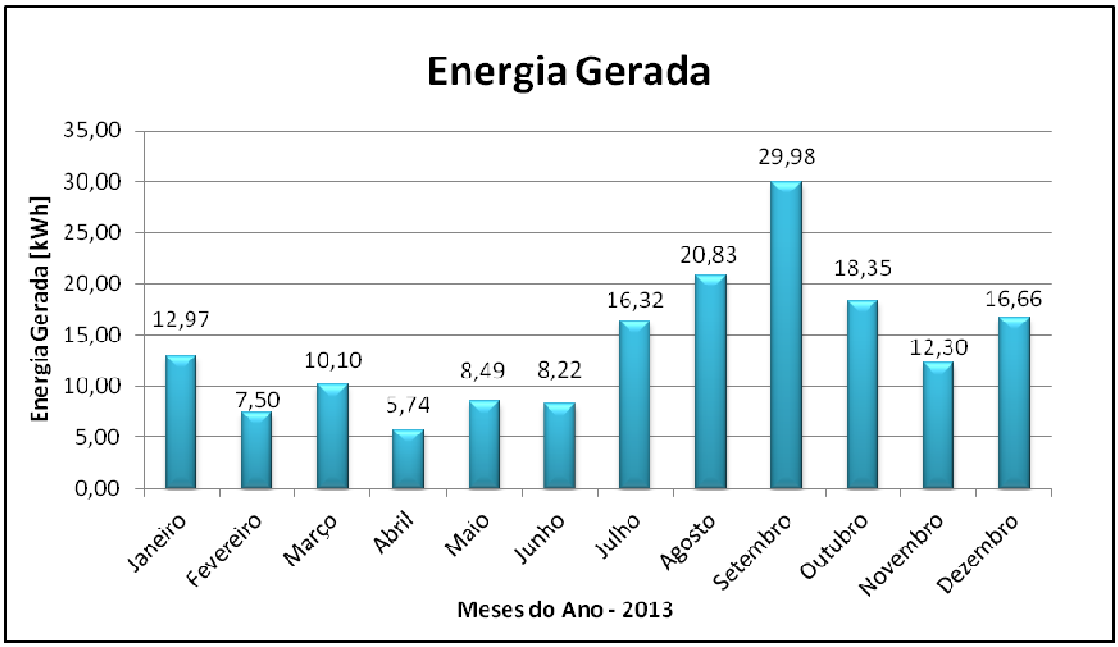


Gráfico 4.7 *Energia gerada pelos aerogeradores na cidade de Brasília – DF.*

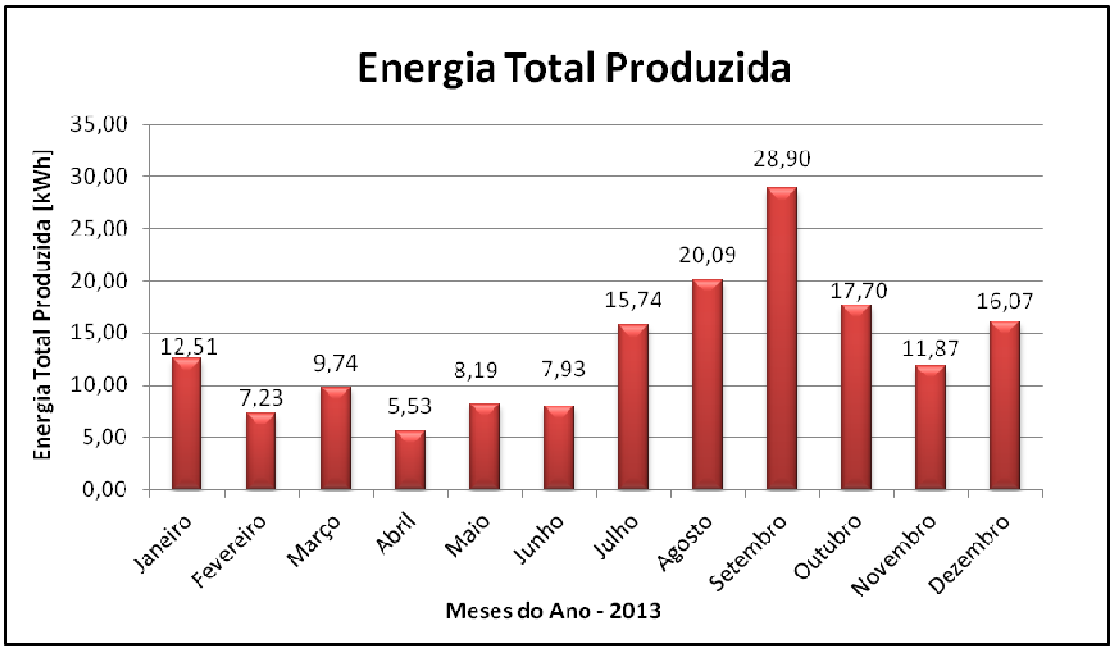


Gráfico 4.8 *Energia total produzida pelos aerogeradores na cidade de Brasília – DF.*

Em termos de potência, o SMGE da Embaixada italiana está classificado – de acordo com o exposto na Figura 2.11 – como um sistema de microgeração distribuída, correspondendo como uma central geradora de energia elétrica com potência instalada menor que 100 kW (cada turbina eólica tem uma potência nominal de 1,50 kW; totalizando para as cinco

turbinas do SMGE um total de 7,5 kW). Em termos da velocidade média do vento, ao longo do ano de 2013, obteve-se o seguinte comportamento, descrito no Gráfico 4.9:

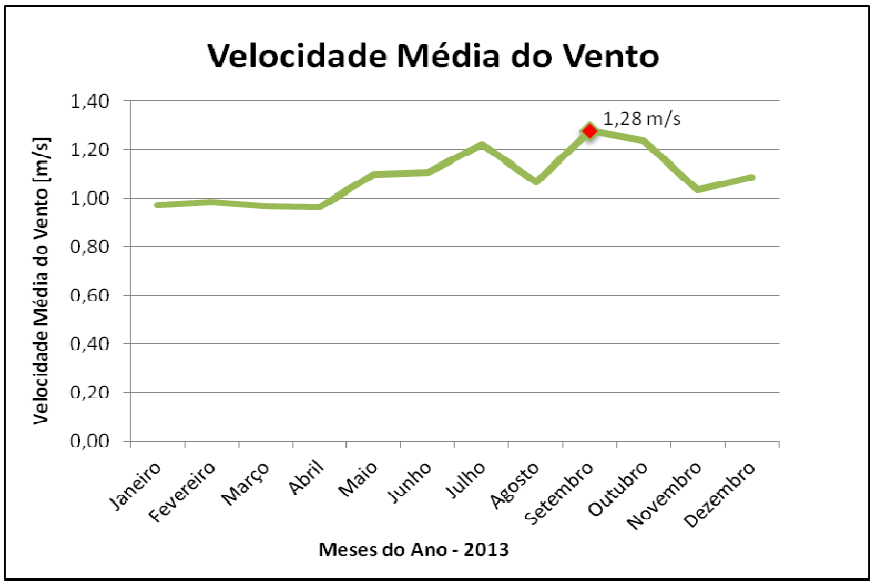


Gráfico 4.9 *Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2013, na cidade de Brasília – DF.*

Percebe-se que a maior velocidade média obtida foi a do mês de setembro, com um valor de 1,28 m/s; correspondendo ao período em que se obteve a maior geração de energia. O Gráfico 4.10 mostra a velocidade média do vento ao longo do ano de 2013 de forma radial; tendo, assim, outra maneira para representar a velocidade média do vento.

A cidade de Brasília possui ventos com velocidades muito baixas para ser aproveitada por usinas eólicas. Para a turbina eólica instalada na Embaixada da Itália não é aconselhável que ela seja utilizada em locais dessa cidade, uma vez que esse equipamento gera energia apenas para velocidades superiores a 1,8 m/s (de acordo com o exposto neste trabalho). A máxima velocidade média constada para Brasília está abaixo dessa condição empregada para a geração de eletricidade.

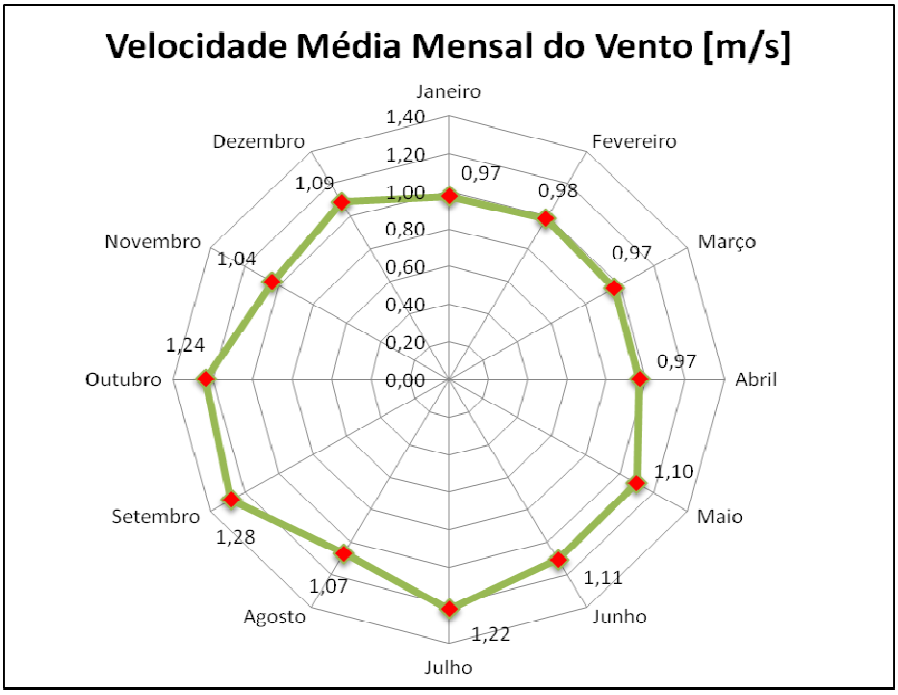


Gráfico 4.10 *Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2013, na cidade de Brasília – DF (representação radial).*

No Gráfico 4.11 tem-se a Distribuição de Weibull, a qual relaciona a velocidade do vento e a sua frequência ao longo do ano de 2013. Para este ano, verifica-se que a velocidade que possui maior frequência é a de 1,25 m/s.

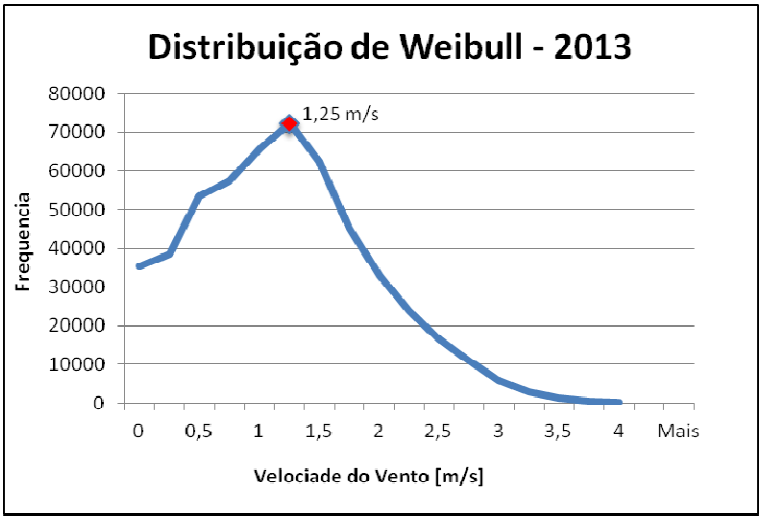


Gráfico 4.11 *Distribuição de Weibull para o ano de 2013.*

4.4 CIDADE DE OURINHOS, SÃO PAULO

Para a cidade Ourinhos, localizada no Estado de São Paulo, foram utilizados dados do SONDA, referentes à velocidade do vento no ano de 2008, para a realização da modelagem. Por meio deles, obteve-se a potência do vento, em W; a potência na saída do gerador, em W; e a energia gerada, em kWh – verificados na Tabela 4.3. Esta mostra essas grandezas, que estão associadas às seguintes cores, respectivamente: azul, vermelho e verde. Essa tabela refere-se aos valores da modelagem realizada para o mês de janeiro; nela estão representados apenas os 16 primeiros minutos do primeiro dia desse mês. Assim como a cidade de Brasília, há na tabela original 44.640 linhas, referentes aos minutos do mês de janeiro; mas apenas uma pequena parte da tabela foi transcorrida para este trabalho – para ser representada. Nota-se que na Tabela 4.3, ao contrário da Tabela 4.1, não se encontram os valores da potência na entrada do inversor, da potência na saída do inversor, da potência total nas fases e da energia total produzida; pois essas grandezas estão associadas à Embaixada da Itália, em Brasília, onde se conhece todo o SMGE. Assim, o que será avaliado para as demais cidades será apenas a energia gerada pelo modelo de turbina eólico instalado na Embaixada italiana; e essa geração obedece à metodologia abordada no Capítulo 3.

Na Tabela 4.4 tem-se uma avaliação mensal, referente ao ano de 2008, para a cidade de Ourinhos. Constata-se nela a direção predominante do vento; a velocidade média do vento, a 10 m de altura, em m/s; e a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh. Essa cidade apresentou uma velocidade média anual de 2,10 m/s (93,09% maior que a velocidade média do vento na cidade de Brasília) e uma geração de 1.496,01 kWh (energia média anual gerada é igual a 124,67 kWh); sendo esta 793,36% maior que a cidade de Brasília, em termos de geração anual de energia. O mês que produziu mais eletricidade foi setembro, com 281,71 kWh; acompanhado do mês de outubro, com 277,80 kWh e do mês de novembro, com 248,38 kWh. Nesses meses foram registradas as maiores velocidades do vento e suas médias são, respectivamente: 3,21; 3,15 e 2,98 m/s. Além disso, verifica-se que a direção predominante do vento ao longo do ano foi a Leste. Os valores da energia gerada também são observados no Gráfico 4.12, que mostra a geração mensal do ano avaliado.

Tabela 4.3 *Valores referentes à cidade de Ourinhos, em São Paulo.*

Dados Gerados a Cada Minuto					
Dias	**Minutos**	**Velocidade do Vento [m/s] a 10m**	**Potência do Vento [W]**	**Potência na Saída do Gerador [W]**	**Energia Gerada [kWh]**
1	1	4,592	1816,30	132,96	0,011
1	2	2,449	275,52	30,91	0,003
1	3	4,457	1660,77	126,53	0,011
1	4	3,500	804,24	80,96	0,007
1	5	3,679	934,05	89,48	0,007
1	6	2,962	487,46	55,33	0,005
1	7	2,943	478,14	54,43	0,005
1	8	4,013	1212,24	105,38	0,009
1	9	5,654	3390,39	183,53	0,015
1	10	5,055	2422,96	155,00	0,013
1	11	4,141	1331,98	111,48	0,009
1	12	3,667	924,19	88,86	0,007
1	13	3,427	754,96	77,48	0,006
1	14	4,492	1700,21	128,19	0,011
1	15	3,926	1135,10	101,24	0,008
1	16	2,810	416,20	48,10	0,004

Tabela 4.4 *Avaliação anual para a cidade de Ourinhos – SP.*

Meses	**Direção Predominante do Vento**	**Velocidade Média do Vento [m/s]**	**Energia Gerada [kWh]**
Janeiro	Leste	2,33	144,09
Fevereiro	Leste	1,84	74,50
Março	Leste e Sudeste	1,87	90,39
Abril	Leste	1,55	52,27
Maio	Leste	1,49	51,39
Junho	Leste	1,35	35,44
Julho	Leste	1,40	34,61
Agosto	Leste	1,73	74,15
Setembro	Leste e Sudeste	3,21	281,71
Outubro	Leste e Noroeste	3,15	277,80
Novembro	Leste e Sudeste	2,98	248,38
Dezembro	Leste	2,25	131,27
Velocidade Média Anual do Vento e Energia Média		**2,25**	**124,67**
Total de Energia			**1.496,01**

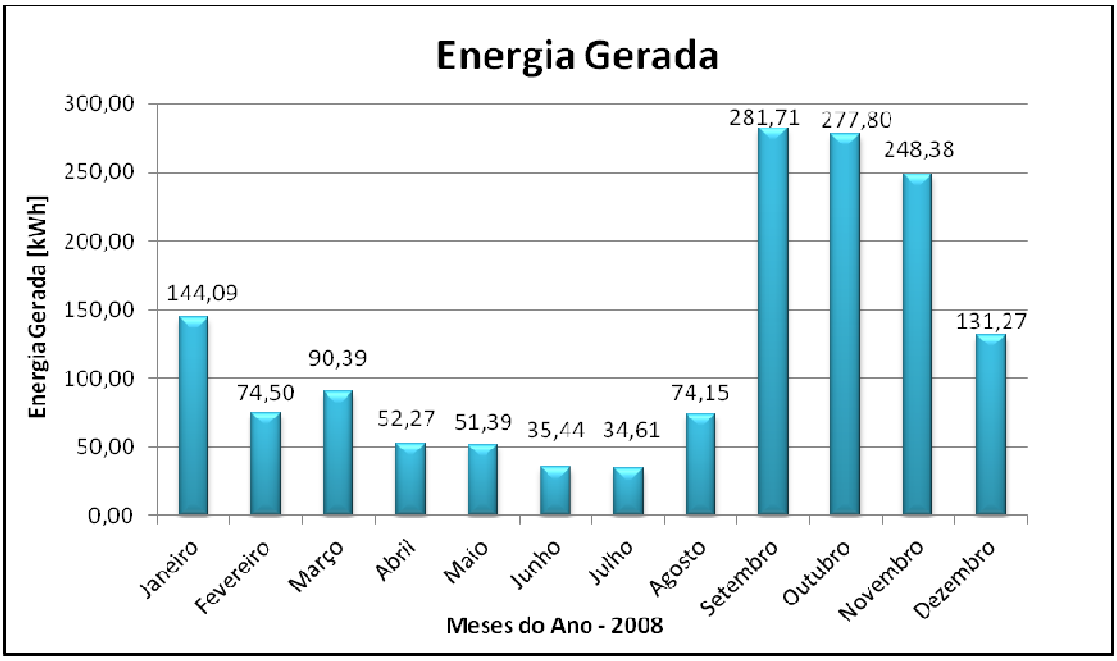


Gráfico 4.12 *Energia gerada pelas turbinas eólicas na cidade de Ourinhos – SP.*

O comportamento da velocidade média do vento está expresso nos Gráficos 4.13 e 4.14. O primeiro evidencia os valores da velocidade de forma sequencial, ao longo do mês, e o segundo de forma radial. Nota-se no Gráfico 4.13 que a velocidade média máxima mensal atingida foi de 3,21 m/s, no mês de setembro; mês que se obteve a maior energia gerada.

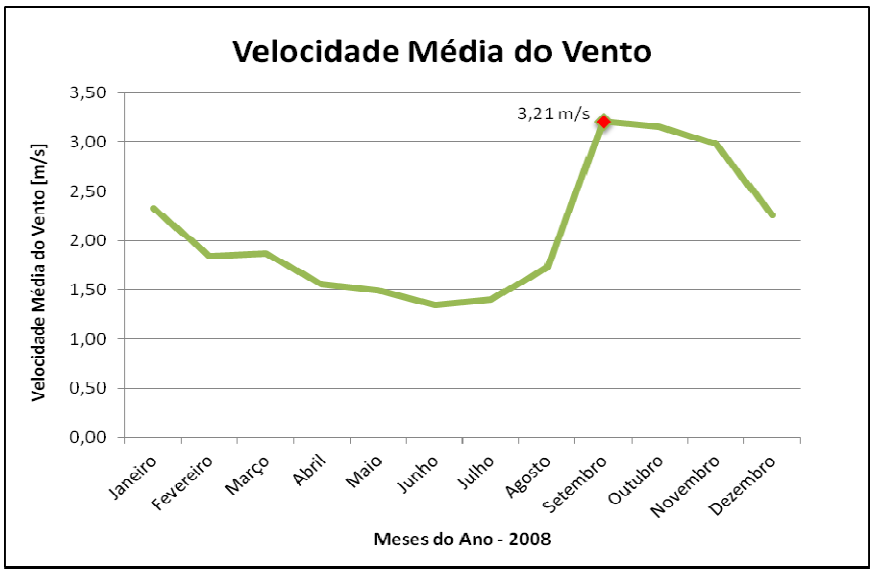


Gráfico 4.13 *Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2008, na cidade de Ourinhos – SP.*

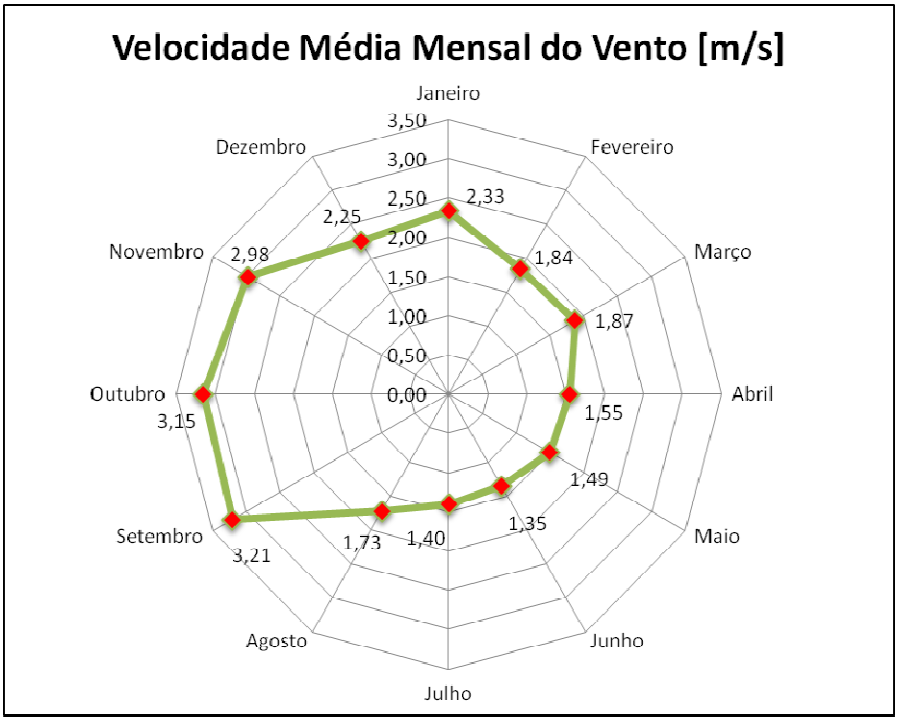


Gráfico 4.14 *Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2008, na cidade de Ourinhos – SP (representação radial).*

4.5 CIDADE DE PETROLINA, PERNAMBUCO

A modelagem realizada para a cidade de Petrolina, localizada no Estado de Pernambuco, foi análoga à realizada para a cidade de Ourinhos; e as grandezas analisadas são idênticas às da Tabela 4.3. O resultado da modelagem para essa cidade, para o ano de 2013, está representado na Tabela 4.5; onde estão representadas, de forma mensal, as direções predominantes do vento; a velocidade média do vento, a 10 m de altura, em m/s; e a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh. A média anual da velocidade do vento foi de 2,78 m/s (155,98% maior que a velocidade média do vento na cidade de Brasília) e a energia gerada ao longo do ano foi de 2.425,44 kWh (energia média anual gerada é igual a 202,12 kWh). Esta é 1.401,88% maior que a energia gerada pelas turbinas na cidade de Brasília.

Percebe-se também, na Tabela 4.5, que o mês de outubro foi o que obteve maior geração de energia, com 295,19 kWh; seguido pelo mês de setembro, com 288,58 kWh; e pelo mês de agosto, com 268,53 kWh. As velocidades médias para esses meses foram, respectivamente: 3,38; 3,40 e 3,22 m/s. Além disso, verifica-se que a direção predominante

do vento, ao longo do ano, foi a Sudeste. No Gráfico 4.15 tem-se a representação mensal da energia gerada pelas turbinas eólicas para o ano avaliado.

Tabela 4.5 *Avaliação anual para a cidade de Petrolina – PE.*

Meses	Direção Predominante do Vento	Velocidade Média do Vento [m/s]	Energia Gerada [kWh]
Janeiro	Sudeste e Leste	2,47	162,81
Fevereiro	Sudeste	2,88	195,74
Março	Sudeste	2,44	164,55
Abril	Sudeste	2,49	156,61
Maio	Sudeste	2,60	171,37
Junho	Sudeste	2,66	171,15
Julho	Sudeste	2,88	213,19
Agosto	Sudeste	3,22	268,53
Setembro	Sudeste	3,40	288,58
Outubro	Sudeste	3,38	295,19
Novembro	Sudeste	2,94	222,10
Dezembro	Sudeste e Leste	2,00	115,62
Velocidade Média Anual do Vento e Energia Média		**2,78**	**202,12**
Total de Energia			**2.425,44**

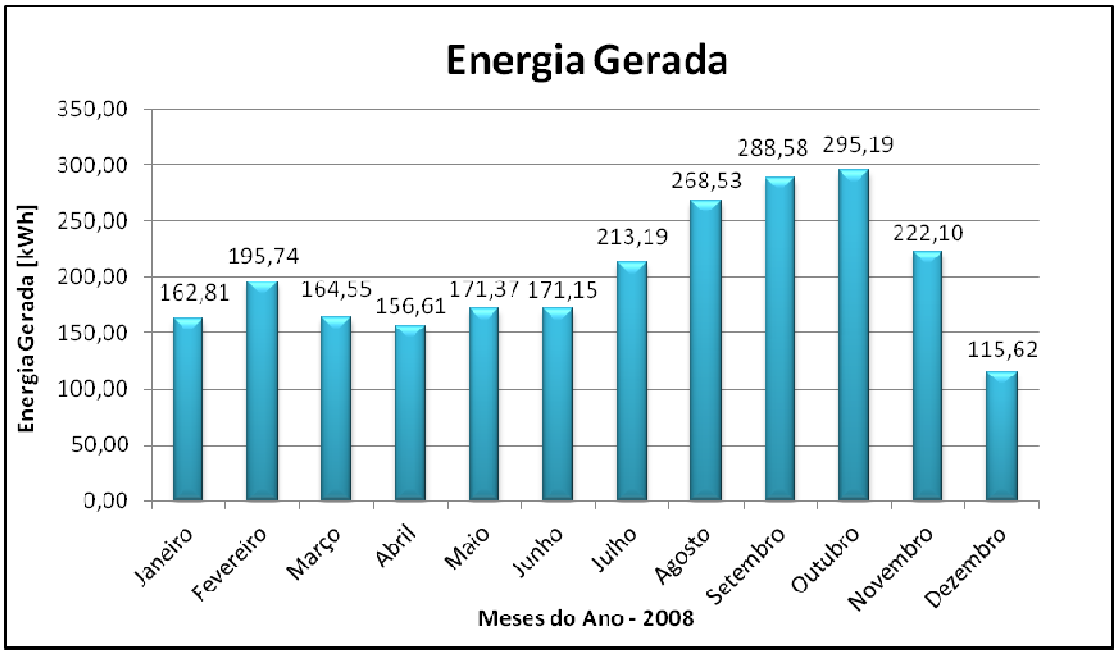


Gráfico 4.15 *Energia gerada pelas turbinas eólicas na cidade de Petrolina – PE.*

Nos Gráficos 4.16 e 4.17, tem-se a representação para a velocidade média do vento, expressa a cada mês, ao longo ano de 2013. No primeiro gráfico, a velocidade média do vento possui um aspecto sequencial e, no segundo, um aspecto radial.

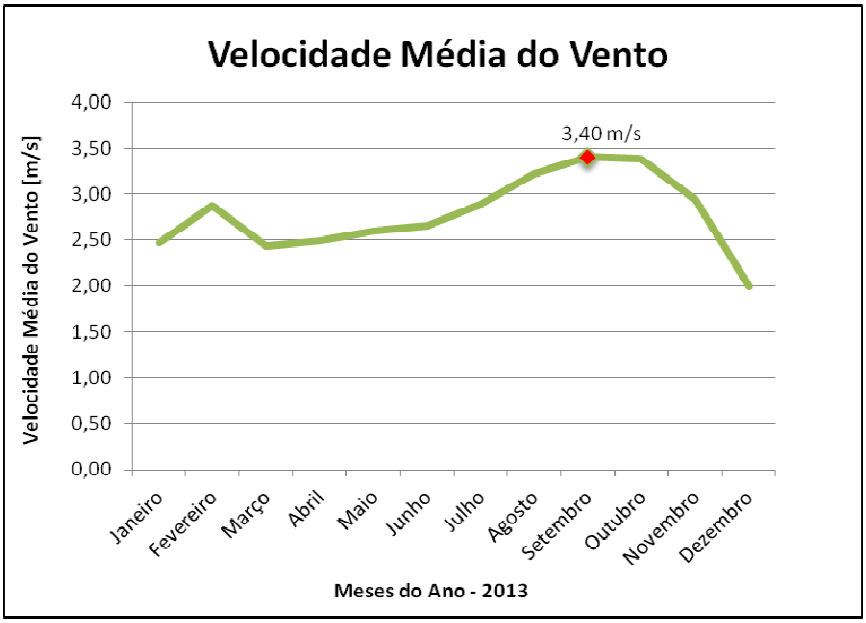


Gráfico 4.16 *Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2013, na cidade de Petrolina – PE.*

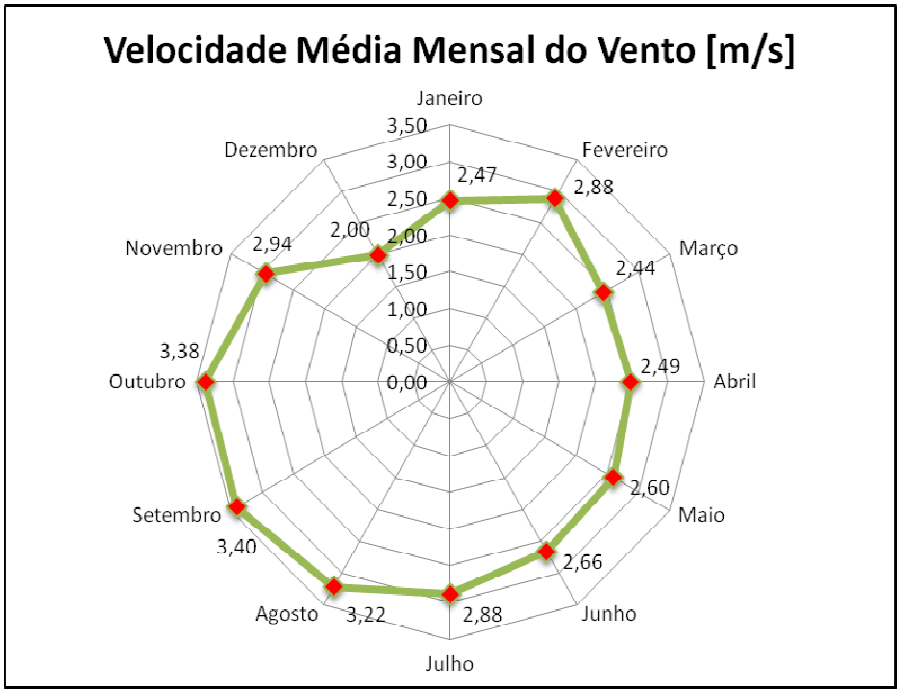


Gráfico 4.17 *Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2013, na cidade de Petrolina – PE (representação radial).*

Percebe-se que no Gráfico 4.16 a máxima velocidade média do vento verificada foi a do mês de setembro, cujo valor é 3,40 m/s. Nesse mês obteve-se a segundo maior geração de energia durante o ano de 2013.

4.6 CIDADE DE SÃO MARTINHO DA SERRA, RIO GRANDE DO SUL

A modelagem realizada para a cidade de São Martinho da Serra, situada no Estado do Rio Grande do Sul, para o ano de 2013, foi idêntica à realizada para a cidade de Ourinhos e Petrolina. As grandezas analisadas foram as que estão representados na Tabela 4.3. Dessa forma, foram obtidos os valores mensais da velocidade média do vento, a 10 m de altura, em m/s; a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh; e também é a direção predominante do vento em cada mês, avaliando o ano de 2013. A velocidade média anual do vento, para essa cidade, foi de 2,10 m/s (93,65% maior que a velocidade média do vento na cidade de Brasília) e a energia gerada foi de 1.165,13 kWh (energia média anual gerada é igual a 97,09 kWh). Esta é 595,77% maior que a energia gerada na cidade de Brasília. Na Tabela 4.6 encontram-se os valores mensais das grandezas mencionadas. Ao avaliar essa tabela, percebe-se que o mês de agosto foi o que proporcionou maior geração de energia, com 158,59 kWh; acompanhado do mês de novembro, com 153,86 kWh. As velocidades médias do vento para esses períodos foram, respectivamente: 2,48 e 2,56 m/s. Além disso, nota-se que a direção predominante do vento ao longo do ano foi a Oeste, seguida pela direção Nordeste e Sudeste. No Gráfico 4.18 tem-se a energia gerada na cidade de São Martinho da Serra para cada mês do ano avaliado.

Tabela 4.6 *Avaliação anual para a cidade de São Martinho da Serra – RS.*

Meses	Direção Predominante do Vento	Velocidade Média do Vento [m/s]	Energia Gerada [kWh]
Janeiro	Oeste	2,04	80,32
Fevereiro	Oeste	1,94	60,80
Março	Oeste	2,00	83,51
Abril	Oeste	1,92	70,85
Maio	Oeste	2,03	89,73
Junho	Oeste	1,88	72,10
Julho	Oeste e Nordeste	1,87	94,00
Agosto	Sul e Nordeste	2,48	158,59
Setembro	Sudeste e Nordeste	2,31	115,69
Outubro	Sudeste	2,18	107,36
Novembro	Sudeste, Nordeste e Leste	2,56	153,86
Dezembro	Sudeste	2,01	78,32
Velocidade Média Anual do Vento e Energia Média		**2,10**	**97,09**
Total de Energia			**1.165,13**

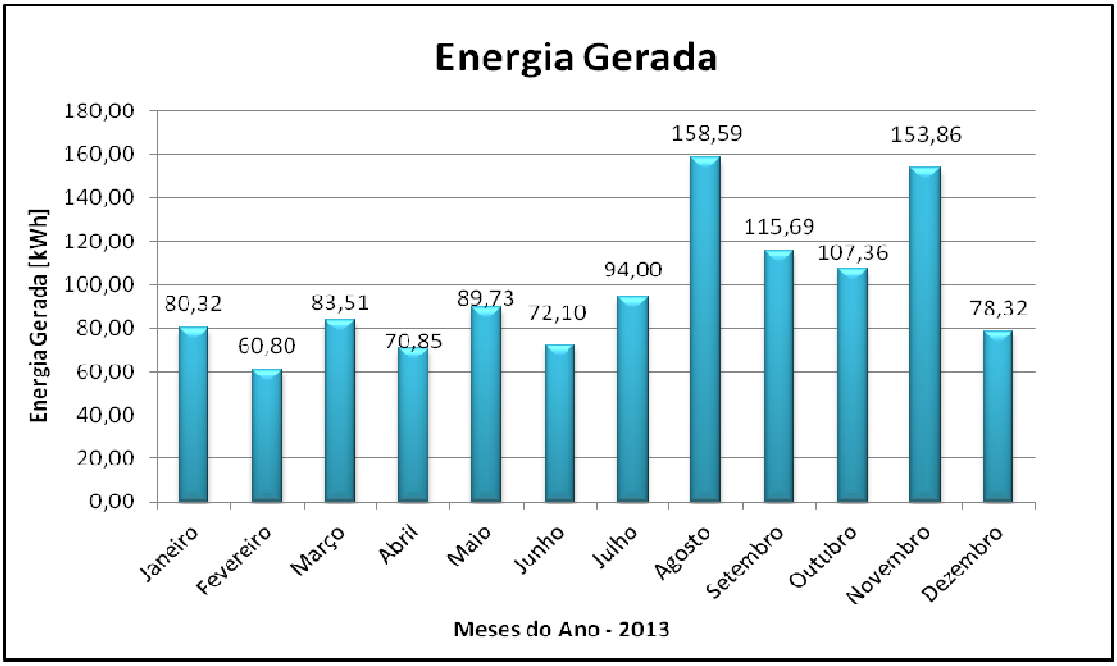


Gráfico 4.18 *Energia gerada, ao longo do ano de 2013, pelas turbinas eólicas na cidade de São Martinho da Serra – RS.*

Nos Gráficos 4.19 e 4.20, observa-se o comportamento da velocidade média do vento durante o ano de 2013. O primeiro gráfico evidencia uma representação sequencial do

vento durante os meses do ano e o segundo mostra a velocidade média do vento de forma radial para o mesmo período.

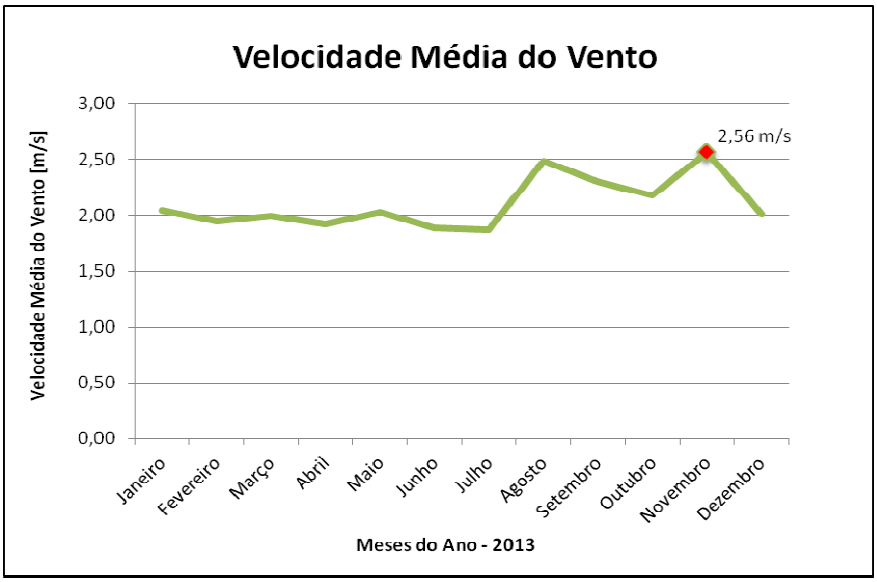


Gráfico 4.19 *Velocidade média do vento, ao longo do ano de 2013, na cidade de São Martinho da Serra – RS.*

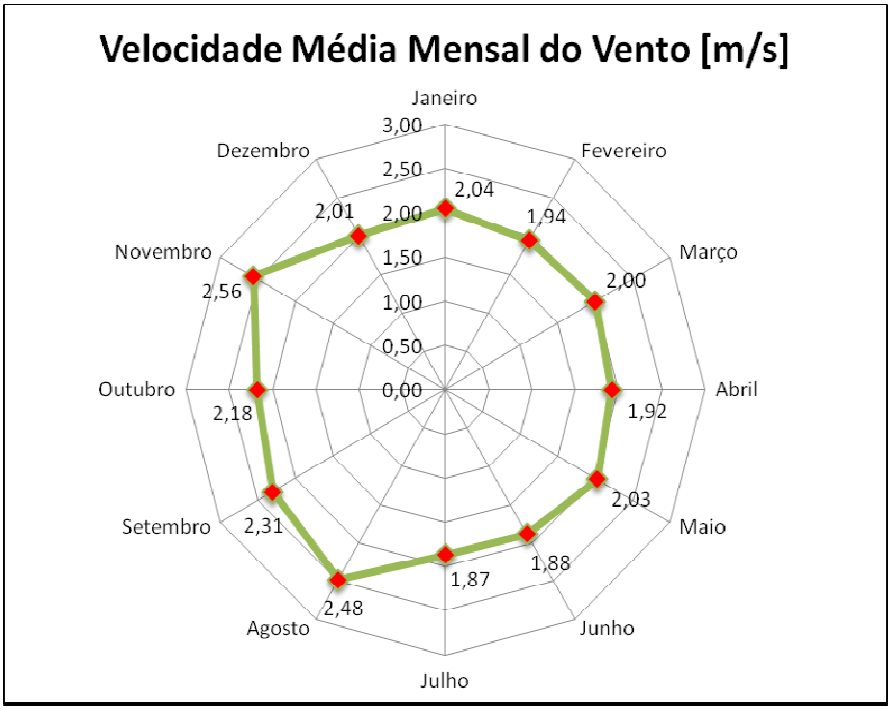


Gráfico 4.20 *Velocidade média mensal do vento, ao longo do ano de 2013, na cidade de Martinho da Serra – RS (representação radial).*

Outra constatação importante no Gráfico 4.19 é a maior velocidade média do vento, que foi de 2,56 m/s, no mês de novembro – mês que se obteve a segunda maior geração mensal de energia.

4.7 CIDADE DE BELO JARDIM, PERNAMBUCO

A modelagem realizada para a cidade de Belo Jardim, localizada no Estado de Pernambuco, foi análoga às modelagens realizada para as cidades descritas anteriormente. Os únicos aspectos diferentes no estudo realizado para essa cidade são os dados da velocidade do vento que foram extraídos a 25 e a 50 m de altura e a cada 10 minutos; ao contrário das demais cidades, que foram obtidos a 10 m de altura, a cada minuto. Além disso, não há para essa cidade um estudo das direções do vento ao longo do ano. As Tabelas 4.7 e 4.8 evidenciam a modelagem realizada, mostrando as grandezas calculadas. Elas correspondem aos 16 primeiros valores de velocidade do vento do mês de maio (no total, as tabelas possuem 4.464 linhas referentes aos dados dessa velocidade durante todo o mês, a cada 10 minutos – apenas uma pequena parte das tabelas estão representadas).

Tabela 4.7 *Valores referentes, a 25 m de altura, à cidade de Belo Jardim, Pernambuco.*

Dados Gerados a Cada 10 Minutos					
Dias	**Minutos**	**Velocidade do Vento [m/s] a 25m**	**Potência do Vento [W]**	**Potência na Saída do Gerador [W]**	**Energia Gerada [kWh]**
1	0	4,470	167,54	127,15	0,106
1	10	4,390	158,70	123,34	0,103
1	20	4,210	139,97	114,76	0,096
1	30	5,660	340,12	183,81	0,153
1	40	3,750	98,92	92,86	0,077
1	50	3,540	83,21	82,86	0,069
1	60	3,750	98,92	92,86	0,077
1	70	4,280	147,07	118,10	0,098
1	80	3,870	108,72	98,57	0,082
1	90	3,670	92,72	89,05	0,074
1	100	3,180	60,32	65,72	0,055
1	110	3,490	79,74	80,48	0,067
1	120	3,960	116,48	102,86	0,086
1	130	3,640	90,47	87,62	0,073
1	140	3,930	113,86	101,43	0,085
1	150	4,120	131,18	110,48	0,092

Nessas tabelas tem-se a medição da velocidade do vento a 25 m (Tabela 4.7) e a 50 m (Tabela 4.8), em m/s; a potência do vento, em W; a potência na saída do gerador, W; e a energia gerada, kWh.

Tabela 4.8 *Valores referentes, a 50 m de altura, à cidade de Belo Jardim, Pernambuco.*

Dados Gerados a Cada 10 Minutos					
Dias	**Minutos**	**Velocidade do Vento [m/s] a 50m**	**Potência do Vento [W]**	**Potência na Saída do Gerador [W]**	**Energia Gerada [kWh]**
1	0	4,47	167,54	127,15	0,106
1	10	4,39	158,70	123,34	0,103
1	20	4,21	139,97	114,76	0,096
1	30	5,66	340,12	183,81	0,153
1	40	3,75	98,92	92,86	0,077
1	50	3,54	83,21	82,86	0,069
1	60	3,75	98,92	92,86	0,077
1	70	4,28	147,07	118,10	0,098
1	80	3,87	108,72	98,57	0,082
1	90	3,67	92,72	89,05	0,074
1	100	3,18	60,32	65,72	0,055
1	110	3,49	79,74	80,48	0,067
1	120	3,96	116,48	102,86	0,086
1	130	3,64	90,47	87,62	0,073
1	140	3,93	113,86	101,43	0,085
1	150	4,12	131,18	110,48	0,092

Ao realizar a modelagem para a cidade de Belo Jardim (os dados da velocidade do vento foram extraídos do ano de 2005, janeiro a agosto, e de 2004, setembro a dezembro), empregando a geração por meio das cinco turbinas eólicas, obtiveram-se os resultados expressos nas Tabelas 4.9 e 4.10. A velocidade média anual do vento a 25 m foi de 4,84 m/s (346,12% maior que a velocidade média do vento na cidade de Brasília) e a 50 m foi de 5,01 m/s (360,96% maior que a velocidade média do vento na cidade de Brasília). Já a energia anual gerada a 25 m correspondeu a 7.801,41 kWh (4.558,72% maior que a energia gerada na cidade de Brasília e a energia média anual gerada é igual a 650,12 kWh) e a 50 m correspondeu a 8.306,83 kWh (4.860,55% maior que a energia gerada na cidade de Brasília e a energia média anual gerada é igual a 692,24 kWh). Para a primeira altura analisada, tem-se que o mês de novembro foi o que teve maior geração de energia, com 943,00 kWh; acompanhado pelo mês de outubro, com 838,36 kWh; e pelo mês de dezembro, com 824,20 kWh. As velocidades médias do vento para esses meses foram,

respectivamente: 5,92; 5,59 e 5,51 m/s. Já para a segundo altura, os meses que obtiveram maiores valores de geração de energia também foram os citados para a primeira altura, e os seus valores são, respectivamente: 977,82; 882,22 e 858,49 kWh. As velocidades médias do vento, para esses meses foram, respectivamente: 6,01; 5,73 e 5,61 m/s.

Tabela 4.9 *Avaliação anual, a uma altura de 25 m, para a cidade de Belo Jardim – PE.*

Meses	Velocidade Média do Vento [m/s]	Energia Gerada [kWh]
Janeiro	5,33	789,24
Fevereiro	5,32	736,16
Março	4,64	621,62
Abril	4,14	455,06
Maio	3,96	448,30
Junho	4,02	428,13
Julho	4,19	481,41
Agosto	4,48	552,09
Setembro	5,04	683,84
Outubro	5,59	838,36
Novembro	5,92	943,00
Dezembro	5,51	824,20
Velocidade Média Anual do Vento e Energia Média	**4,85**	**650,12**
Total de Energia		**7.801,41**

Os gráficos referentes à energia gerada e à velocidade média do vento, assim como mostrados para as demais cidades, também serão analisados para a cidade de Belo Jardim. Para questão de simplificação, entretanto, apenas os gráficos obtidos para a altura de 25 m serão evidenciados – por ser a altura mais próxima a de 10 m e os resultados poderão ser mais facilmente comparados com os obtidos para a cidade de Brasília. O Gráfico 4.21 mostra a energia gerada durante os meses dos anos analisados para a altura de 25 m.

Os Gráficos 4.22 e 4.23, mostram a velocidade média do vento ao longo dos anos de 2004 e 2005. O primeiro gráfico apenas evidencia, de forma sequencial, essa velocidade. Além disso, ele traz a velocidade média máxima do vento, referente ao mês de novembro, que foi de 5,92 m/s – sendo este o mês em que se obteve a maior geração de energia ao longo dos

anos avaliados. O segundo gráfico trata de forma radial os valores das velocidades média do vento de acordo com os meses do ano.

Tabela 4.10 *Avaliação anual, a uma altura de 50 m, para a cidade de Belo Jardim – PE.*

Meses	Velocidade Média do Vento [m/s]	Energia Gerada [kWh]
Janeiro	5,48	844,94
Fevereiro	5,50	786,66
Março	4,77	657,59
Abril	4,31	489,89
Maio	4,18	499,82
Junho	4,34	498,35
Julho	4,30	501,99
Agosto	4,62	581,89
Setembro	5,21	727,19
Outubro	5,73	882,22
Novembro	6,01	977,82
Dezembro	5,61	858,49
Velocidade Média Anual do Vento e Energia Média	**5,01**	**692,24**
Total de Energia		**8.306,83**

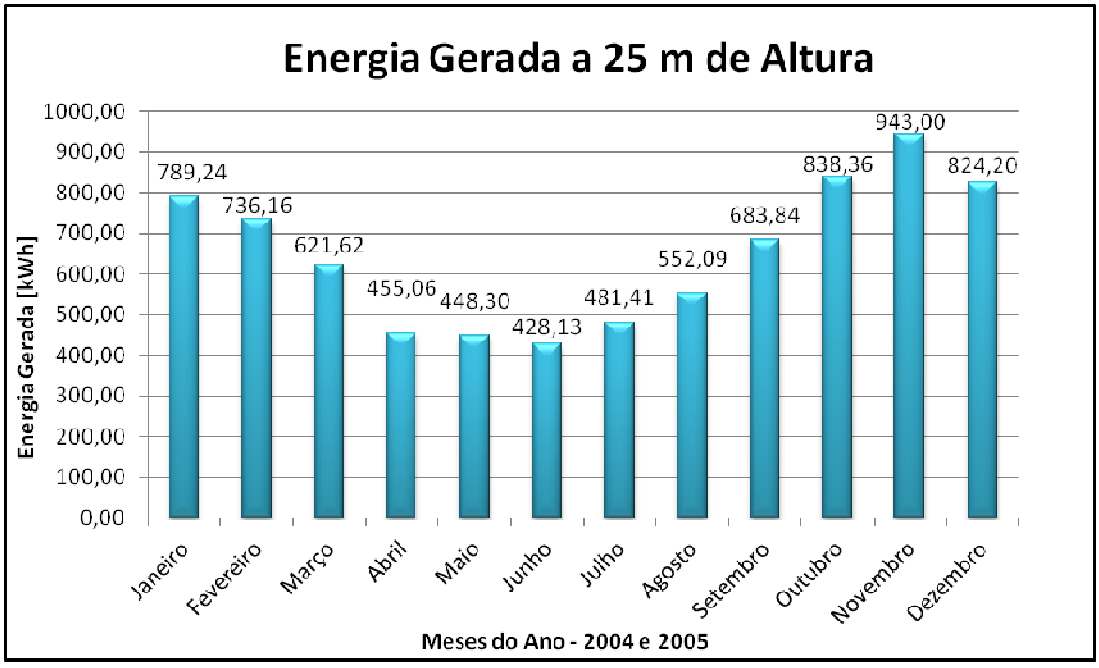


Gráfico 4.21 *Energia gerada, a 25 m de altura, ao longo dos anos de 2004 e 2005, pelas turbinas eólicas na cidade de Belo Jardim – PE.*

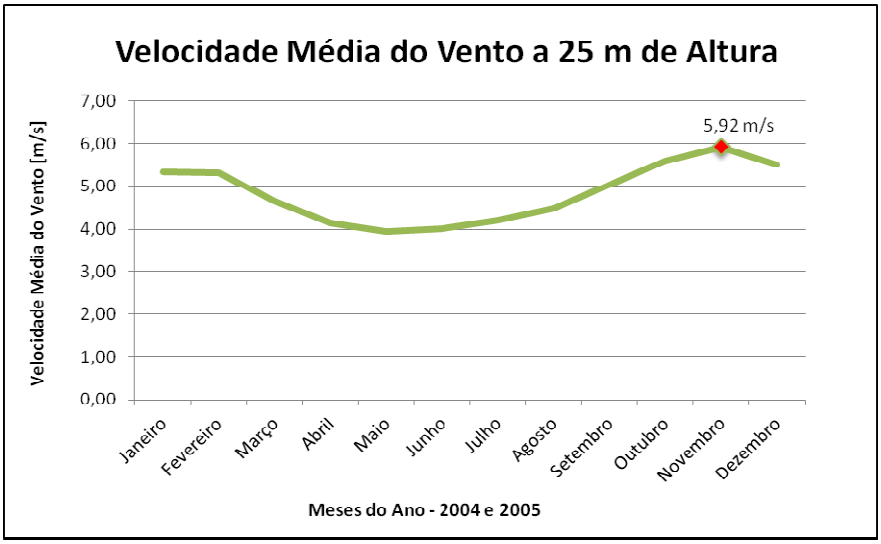


Gráfico 4.22 *Velocidade média do vento a 25 m de altura, ao longo dos anos de 2004 e 2005, na cidade de Belo Jardim – PE.*

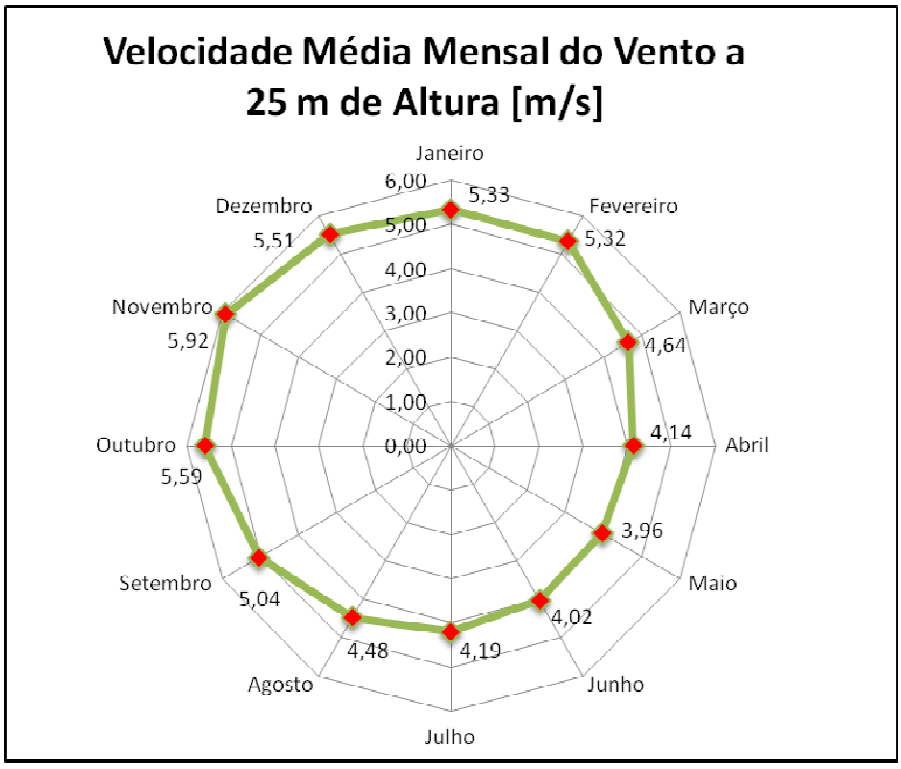


Gráfico 4.23 *Velocidade média mensal do vento a 25 m de altura, ao longo dos anos de 2004 e 2005, na cidade de Belo Jardim – PE (representação radial).*

4.8 CIDADE DE SÃO JOÃO DO CARIRI, PARAÍBA

A modelagem feita para a cidade de São João do Cariri, localizada no Estado da Paraíba, para os anos de 2008 (outubro a dezembro) e 2009 (janeiro a setembro), foi semelhante à realizada para a cidade de Belo Jardim. Da mesma maneira, foram averiguadas a velocidade média do vento para cada mês do ano, a 25 e 50 m de altura, em m/s, e a energia gerada em cada um dos meses, em kWh. A direção do vento para a cidade de São João do Cariri também não é fornecida – para as cidades em que os dados do SONDA são coletados a cada 10 minutos não se fornece a direção do vento. Para a altura de 25 m, a velocidade média anual do vento foi de 4,22 m/s (288,21% maior que a velocidade média do vento na cidade de Brasília) e a energia anual gerada, pelos cinco aerogeradores, foi de 5.877,91 kWh (3.410,08% maior que a energia gerada na cidade de Brasília) e a energia média anual gerada é igual a 489,83 kWh. Já para a altura de 50 m, a velocidade média anual do vento foi de 4,86 m/s (347,51% maior que a velocidade média do vento na cidade de Brasília) e a energia anual gerada foi de 8.907,04 kWh (5.218,97% maior que a energia gerada na cidade de Brasília) e a energia média anual gerada é igual a 742,25 kWh. Nas Tabelas 4.11 e 4.12, estão representadas as velocidades médias do vento e a energia gerada pelas turbinas eólicas em cada mês.

Na Tabela 4.11 tem-se que o mês que apresentou maior quantidade de energia gerada foi outubro, com 1.072,31 kWh (para uma velocidade média do vento igual a 6,05 m/s); seguido pelo mês de novembro, com 951,21 kWh (para uma velocidade média do vento igual a 5,95 m/s); e por janeiro, com 734,74 kWh (para uma velocidade média do vento igual a 5,00 m/s). A Tabela 4.12 mostra que os meses que apresentaram maior geração de energia foram: outubro, com 1.437,50 kWh; novembro, com 1.272,15 kWh; dezembro, com 1.064,65 kWh; e janeiro, com 973,39 kWh. As velocidades médias do vento para esses meses foram, respectivamente: 6,85; 6,67; 5,95 e 5,61 m/s.

O Gráfico 4.24 apresenta a energia mensal gerada nos anos de 2008 e 2009 e os Gráficos 4.25 e 4.26 mostram a velocidade média mensal ao longo dos mesmos anos. O primeiro gráfico evidencia essa velocidade de forma sequencial e o segundo gráfico, de forma radial.

Tabela 4.11 *Avaliação anual, a uma altura de 25 m, para a cidade de São João do Cariri – PB.*

Meses	Velocidade Média do Vento [m/s]	Energia Gerada [kWh]
Janeiro	5,00	734,74
Fevereiro	4,08	429,04
Março	3,77	396,59
Abril	2,90	235,91
Maio	2,76	216,66
Junho	3,41	322,79
Julho	3,88	425,15
Agosto	4,09	481,92
Setembro	3,41	451,44
Outubro	6,05	1.072,31
Novembro	5,95	951,21
Dezembro	5,30	160,15
Velocidade Média Anual do Vento e Energia Média	**4,22**	**489,83**
Total de Energia		**5.877,91**

Tabela 4.12 *Avaliação anual, a uma altura de 50 m, para a cidade de São João do Cariri – PB.*

Meses	Velocidade Média do Vento [m/s]	Energia Gerada [kWh]
Janeiro	5,61	973,39
Fevereiro	4,69	584,80
Março	4,32	541,63
Abril	3,42	341,67
Maio	3,28	311,81
Junho	4,13	470,07
Julho	4,61	600,65
Agosto	4,87	684,43
Setembro	3,94	624,30
Outubro	6,85	1.437,50
Novembro	6,67	1.272,15
Dezembro	5,95	1.064,65
Velocidade Média Anual do Vento e Energia Média	**4,86**	**742,25**
Total de Energia		**8.907,04**

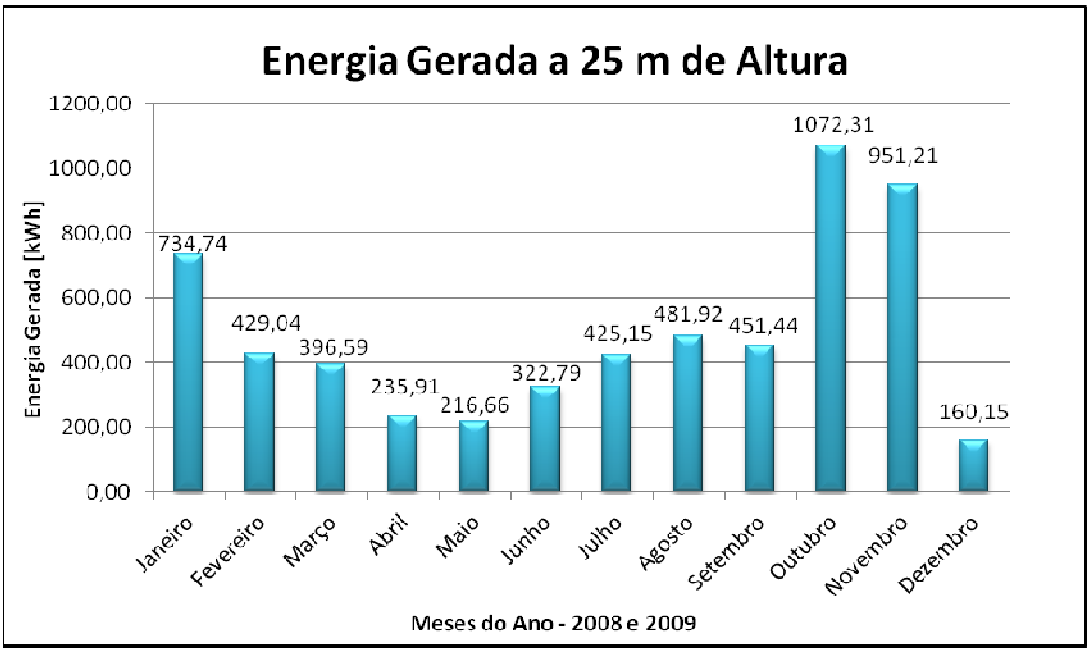


Gráfico 4.24 *Energia gerada, a 25 m de altura, ao longo dos anos de 2008 e 2009, pelas turbinas eólicas na cidade de São João do Cariri – PB.*

O Gráfico 4.25 também evidencia o mês em que se obteve a maior velocidade média do vento e, consequentemente, a maior geração de energia: novembro com 6,05 m/s e 1.072,31 kWh.

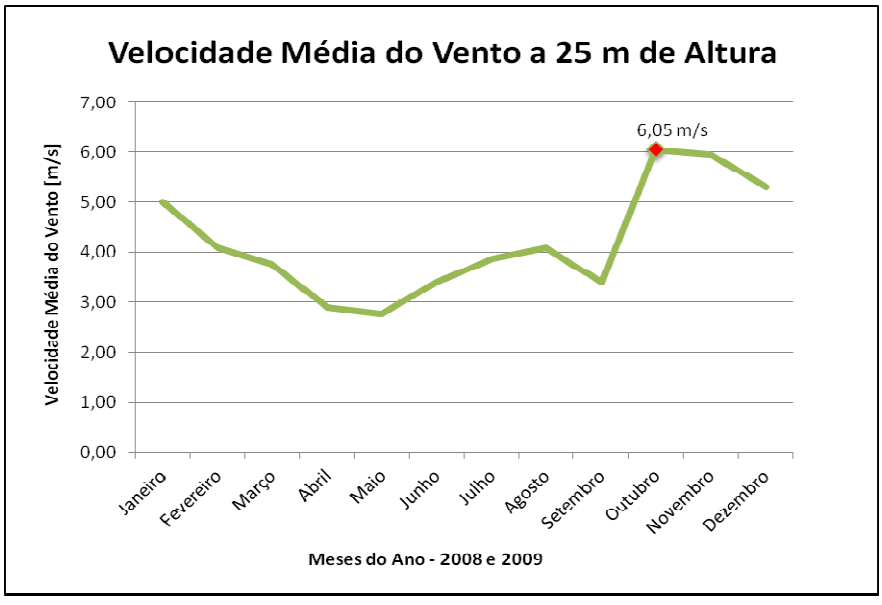


Gráfico 4.25 *Velocidade média do vento a 25 m de altura, ao longo dos anos de 2008 e 2009, na cidade de São João do Cariri – PB.*

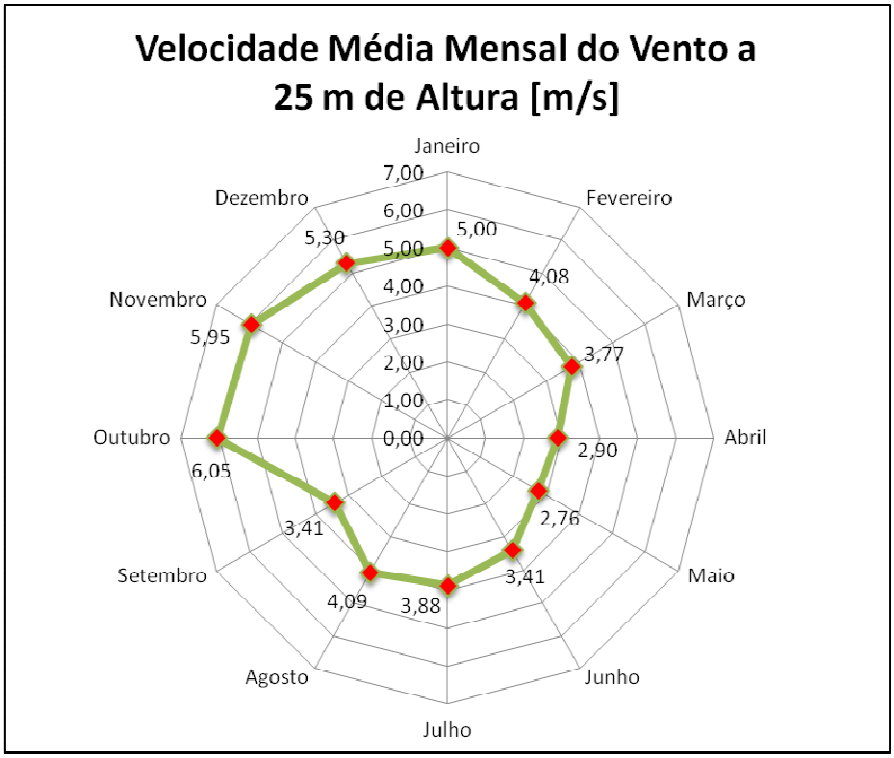


Gráfico 4.26 *Velocidade média mensal do vento a 25 m de altura, ao longo dos anos de 2004 e 2005, na cidade de São João do Cariri – PB (representação radial).*

Nas Tabelas 4.10 e 4.11, percebe-se que houve uma grande variação da energia gerada no mês de dezembro. A 25 m de altura, a geração de energia correspondeu a 160,15 kWh; enquanto que a 50 m, o valor da geração foi de 1.064,65 kWh. Nenhum erro foi constatado na modelagem realizada para a cidade de São João do Cariri que justificasse essa diferença na geração de energia.

4.9 CIDADE DE TRIUNFO, PERNAMBUCO

A modelagem realizada para a cidade de Triunfo, situada no Estado de Pernambuco, para os anos de 2006 (maio a dezembro) e 2007 (janeiro a abril), foi idêntica a realizada para as cidades de Belo Jardim e São João do Cariri. O que irá diferencia a análise da cidade de Triunfo, comparada às outras duas cidades, é que ela é realizada somente a 50 m de altura; uma vez que todos os dados da velocidade do vento para a altura de 25 m estão com a designação “N/A”, as quais foram atribuídas o valor zero. Assim, não houve nenhuma geração de energia a 25 m.

Percebe-se, dessa forma, que a velocidade média anual constatada para o vento, a 50m de altura, foi de 11,47 m/s (955,98% maior que a velocidade média do vento na cidade de Brasília). Já a energia anual gerada, pelas cinco turbinas eólicas, foi de 34.947,94 kWh (20.769,67% maior que a energia gerada na cidade de Brasília) e a energia média anual gerada é igual a 2.912,33 kWh. A Tabela 4.13 mostra os valores da velocidade média de cada mês e as correspondentes energias geradas.

Tabela 4.13 *Avaliação anual, a uma altura de 50 m, para a cidade de Triunfo – PE.*

Meses	Velocidade Média do Vento [m/s]	Energia Gerada [kWh]
Janeiro	8,64	2.241,42
Fevereiro	8,12	1.813,03
Março	9,29	2.589,81
Abril	8,87	2.328,61
Maio	19,54	4.089,77
Junho	17,58	3.871,82
Julho	13,58	3.784,38
Agosto	12,63	3.680,21
Setembro	11,31	3.050,82
Outubro	9,64	2.663,83
Novembro	9,39	2.481,13
Dezembro	9,02	2.353,11
Velocidade Média Anual do Vento e Energia Média	**11,47**	**2.912,33**
Total de Energia		**34.947,94**

O mês em que se obteve maior geração de energia foi maio, com 4.089,77 kWh; seguido pelos meses de junho, com 3.871,82 kWh; julho, com 3.784,38 kWh; e agosto, com 3.680,201 kWh. As velocidades médias do vento nesses meses foram, respectivamente: 19,54; 17,58; 13,58 e 12,63 m/s.

O Gráfico 4.27 mostra a energia gerada em cada mês nos anos avaliados (2006 e 2007). Já os Gráficos 4.28 e 4.29, referem-se à velocidade do vento, sendo que o primeiro mostra o seu comportamento de forma sequencial e o segundo, de forma radial.

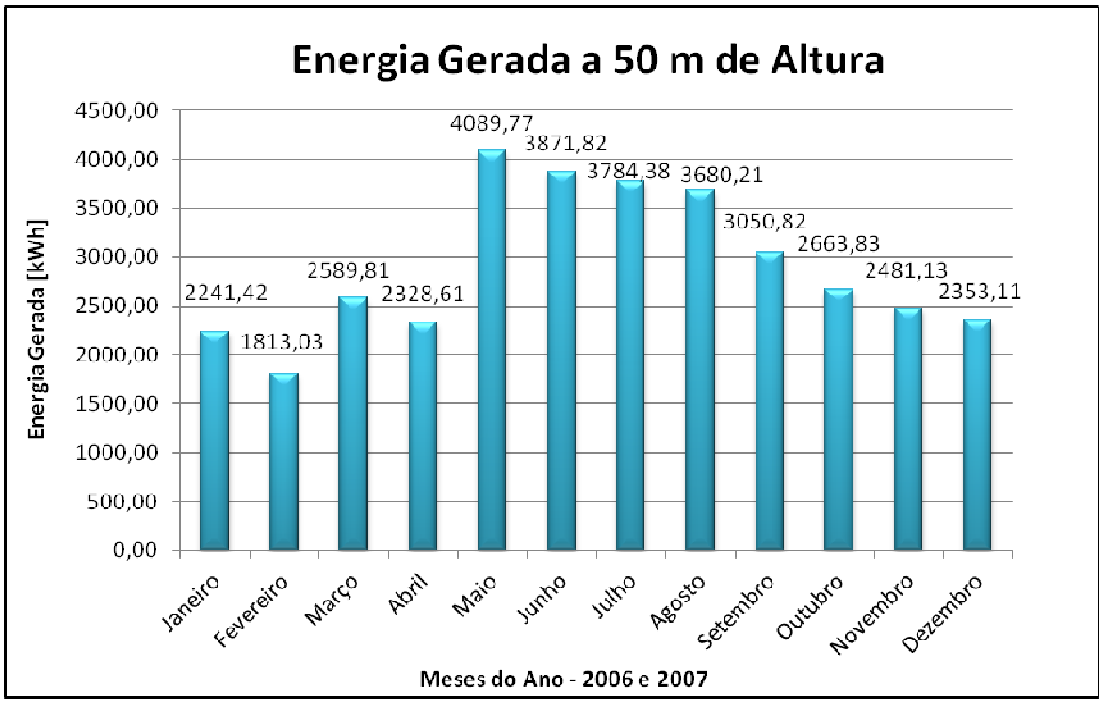


Gráfico 4.27 *Energia gerada, a 50 m de altura, ao longo dos anos de 2006 e 2007, pelas turbinas eólicas na cidade de Triunfo – PE.*

Verifica-se também, no Gráfico 4.28, a maior velocidade média constatada para o vento (19,54 m/s), correspondente ao mês de maio; cuja geração de energia (4.089,77 kWh) foi a maior observada nos anos avaliados.

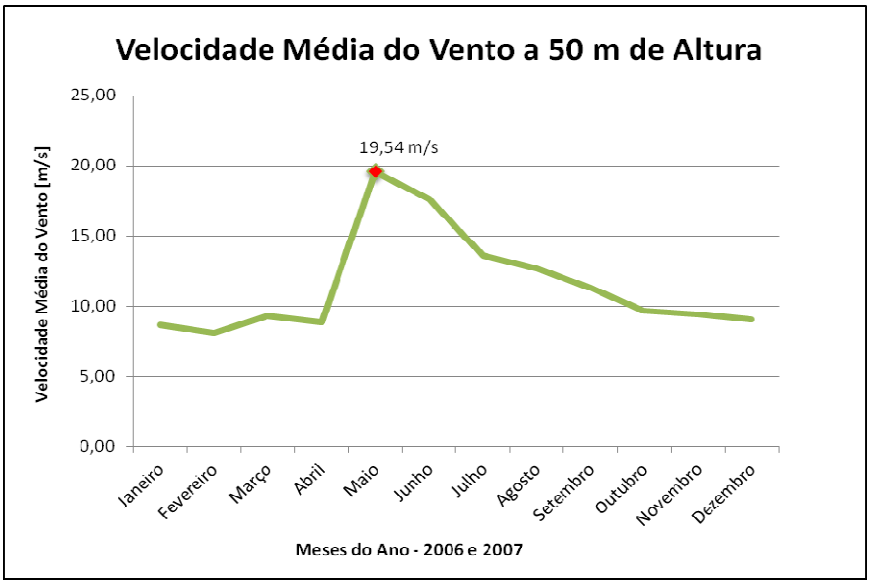


Gráfico 4.28 *Velocidade média do vento a 50 m de altura, ao longo dos anos de 2006 e 2007, na cidade de Triunfo – PE.*

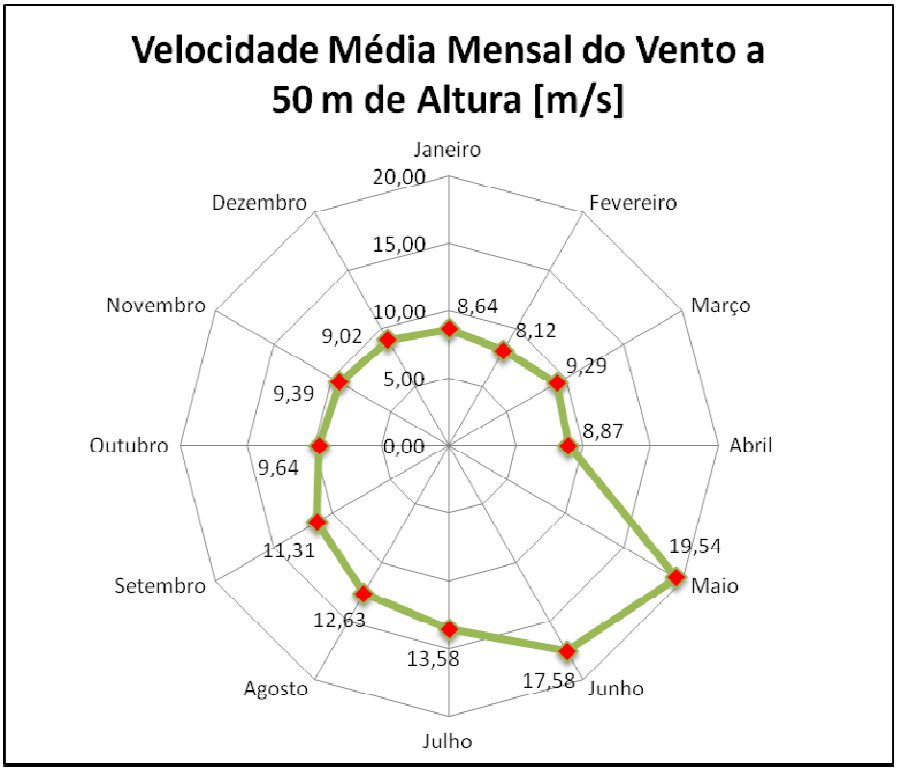


Gráfico 4.29 *Velocidade média mensal do vento a 50 m de altura, ao longo dos anos de 2006 e 2007, na cidade de Triunfo – PE (representação radial).*

4.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma análise minuciosa da velocidade do vento foi realizada para sete cidades do Brasil, por meio de dados anemométricos do SONDA. O principal objeto de estudo neste capítulo foi o SMGE da Embaixada da Itália, em que se avaliou o comportamento do vento na cidade de Brasília, onde a Embaixada está localizada, para verificar se realmente as cinco turbinas eólicas instaladas em seu edifício funcionam de forma adequada. Foi constatado, devido à baixa velocidade dos ventos em Brasília, que as turbinas não funcionam de forma satisfatória, pois a quantidade de energia gerada por elas é bastante baixa. Por outro lado, não foram realizadas medições da velocidade do vento no local onde às turbinas se encontram instaladas, o que tornaria os resultados mais precisos.

Avaliando as demais cidades, percebe-se que a média anual da velocidade do vento em todas elas é maior que 2 m/s. Dessa maneira, o modelo da turbina eólica instalado na Embaixada italiana poderia ser empregado em qualquer uma das cidades analisadas neste trabalho; uma vez que elas possuem ventos com velocidade médias mensais maiores que a

exigida pela turbinas – principalmente nos últimos meses do ano. Além disso, percebe-se que a cidade de Triunfo, localizada no Estado de Pernambuco, possui as maiores velocidades de vento, comparada com as outras cidades, durante os meses do ano; gerando, assim, uma grande quantidade de energia (a análise da velocidade do vento realizada para essa cidade foi a 50 m de altura, o que a favorece, uma vez que as análises empregadas nas demais cidades foram a 10 m e a 25 m).

A Embaixada da Itália, dessa forma, não possui grandes contribuições na geração de energia proveniente de suas cinco turbinas eólica. Isso se deve aos baixos valores da velocidade do vento em Brasília ao longo do ano.

5 CONCLUSÕES

5.1 ASPECTOS GERAIS

Com o intuito de avaliar o comportamento do SMGE da Embaixada da Itália, foi realizado o estudo proposto neste trabalho. Esse sistema é um típico exemplo de GD, em que a unidade geradora está próxima da carga consumidora. Para avaliar o aspecto quantitativo do SMGE, em termos de geração de energia, precisou-se partir de determinadas premissas e considerações; como, por exemplo, a de que esse sistema está conectado à carga da Embaixada e contribui com parte da energia consumida por ela. Além disso, esse estudo baseou-se nos dados da velocidade do vento fornecidos pelo SONDA, permitindo, assim, a realização de toda modelagem desejada, de acordo com a metodologia proposta.

Este trabalho também expandiu o estudo do SMGE da Embaixada para outras cidades brasileiras localizadas em diversas regiões do Brasil, o que possibilitou realizar uma estimativa da energia gerada nesses lugares – conhecendo o comportamento do vento. Além disso, foi possível comparar o desempenho entre essas regiões, verificando quais delas melhor se adequariam à instalação das turbinas eólicas que estão na Embaixada italiana.

Diante de tal cenário, o Capítulo 2 procurou apresentar uma contextualização global das fontes de energia mais utilizadas no Brasil e no mundo. Essa mesma análise foi empregada para a energia eólica. Avaliaram-se também os tipos de turbinas eólicas usadas atualmente para a geração de eletricidade. Diante disso, definiu-se o conceito de GD, perante o SMGE da Embaixada, e caracterizaram-se os seus respectivos aspectos positivos e negativos.

No Capítulo 3, inicialmente, foram apresentadas a Embaixada da Itália e sua arquitetura inovadora. Logo em seguida, foram mostradas as variáveis pertinentes e a origem dos dados da velocidade do vento, obtidos do SONDA. Foram apresentados também todos os materiais que compõe o SMGE, a descrição dos equipamentos que o constituem e a análise dos diagramas unifilares que o representam. Esse capítulo foi finalizado com a apresentação da metodologia empregada na realização da modelagem.

Diante de tudo o que foi exemplificado nos capítulos anteriores, o Capítulo 4 apresenta os resultados verificados na apuração da modelagem. Assim, pôde-se constatar a quantidade de energia gerada pelas turbinas eólicas em Brasília, na Embaixada italiana, durante os meses do ano, além de verificar a geração de eletricidade, durante o mesmo período, em outras cidades do Brasil. Isso permitiu fazer determinadas comparações a cerca da quantidade total de energia produzida, além da melhor localidade para se instalar as turbinas que estão na Embaixada da Itália.

5.2 PRINCIAIS CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

Uma importante observação, em relação aos resultados das modelagens realizadas, é acerca do bom desempenho que um sistema de GD deve possuir. Para o SMGE da Embaixada italiana o bom funcionamento das turbinas eólicas está entrelaçado com a velocidade do vento que incide sobre elas. Se o vento possuir uma velocidade baixa, consequentemente a geração de energia também será baixa; a afirmação oposta também é verdadeira. A velocidade do vento na cidade de Brasília possui valores muito pequenos ao longo do ano, o que não favorece a geração de energia por aqueles equipamentos. Com a extensão da modelagem para outras cidades brasileiras, entretanto, percebeu-se que as turbinas da Embaixada teriam um melhor desempenho, e consequentemente uma maior geração de energia, se fossem utilizadas em outras regiões do Brasil. Por outro lado, não foram realizadas medições da velocidade do vento no local onde estão instaladas as turbinas eólicas do SMGE; os possíveis dados coletados por meio dessas medições trariam resultados mais precisos para estimar a geração de energia elétrica proveniente daqueles equipamentos.

Como a principal análise deste trabalho está voltada para os aspectos técnicos do SMGE da Embaixada da Itália, percebeu-se a seguinte avaliação: as turbinas eólicas instaladas no edifício da Embaixada contribuem com uma parcela muito pequena na geração de energia, para o atendimento de sua carga (considerando que tal sistema esteja conectado à carga da Embaixada). Um dos fatores que contribuem para esse baixo desempenho são os pequenos valores da velocidade do vento na cidade de Brasília ao longo do ano, não atendendo satisfatoriamente às necessidades de geração de energia. Como mencionado, essas turbinas

seriam mais bem aproveitadas, com desempenho satisfatório, em outras regiões do Brasil, onde o vento possui velocidades significantes para a geração de eletricidade.

As cidades estudadas e as estimativas de geração anual de energia elétrica foram: Brasília – DF (167,46 kWh e, após as perdas, 161,49 kWh, a 10 m de altura), Ourinhos – SP (1.496,41 kWh, a 10 m de altura), Petrolina – PE (2.425,44 kWh, a 10 m de altura), São Martinho da Serra – RS (1.165,13 kWh, a 10 m de altura), Belo Jardim – PE (7.801, 41 kWh, a 25 m de altura, e 8.306,83 kWh, a 50 m de altura), São João do Cariri – PB (5.877,91 kWh, a 25 m de altura, e 8.907,04 kWh, a 50 m de altura) e Triunfo – PE (34.947,94 kWh, a 50 m de altura).

5.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Sabendo das contribuições técnicas propiciadas por este trabalho, há ainda importantes estudos a serem realizados para a complementação e aprimoramento deste. Dessa maneira, seguem algumas recomendações para o aprofundamento das análises feitas e sugestões para futuros trabalhos:

(1) Propor uma carga fixa, em substituição à carga da Embaixada da Itália, e instalá-la nos terminais do SMGE, com o intuito de realizar medições de tensão e corrente em sua estrutura. Assim, poderá ser avaliado o funcionamento do SMGE e a sua respectiva contribuição energética. Além disso, podem-se fazer diferentes níveis de "consumo de energia" (carga baixa, média e alta) com essa carga, dependendo dos valores que serão atribuídos a ela.
(2) Realizar medições da velocidade do vento, por meio de um anemômetro, exatamente onde estão instaladas as turbinas eólicas, na laje do edifício da Embaixada italiana. Para obter um excelente estudo, seria necessário realizar tais medições durante um ano. Dessa forma, poder-se-ia avaliar a energia gerada pelo SMGE com uma precisão ainda melhor.
(3) Com os resultados em mãos, em relação à geração de energia promovida pelo SMGE, há a possibilidade de realizar um estudo econômico. Assim, será constatado o quanto a Embaixada italiana iria economizar, durante o mês e durante o ano, com a utilização da energia provinda do SMGE.

(4) Propor um estudo sobre as disposições das turbinas eólicas na laje do edifício da Embaixada, com o intuito de verificar quais as melhores posições em que esses equipamentos poderiam estar localizados, sabendo da existência de obstáculos, para gerar maior quantidade de energia;
(5) Estimar a previsão de energia elétrica gerada diretamente pela Distribuição de Weibull, avaliando as velocidades correspondentes e a suas frequências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, Thomas; ANDERSSON, Göran; SÖDER, Lennart. Distributed generation: a definition. In: *Electric Power Systems Research*, Elsevier Science, Oxford, UK, v. 57, n. 3, p. 195–204, 2001a.

AERO ONLINE. Disponível em: <www.aeronline.com.br/artigo/lift.htm>. Acesso em: 15 jun. 2014.

ALCÂNTARA, E. C. (2013). Ferramenta para estimar o desempenho de sistemas fotovoltaicos com diferentes estruturas de inclinação e tecnologias – uma análise comparativa do ganho proveniente da utilização de seguidor de Sol e concentrador solar. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2013, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117p.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2008. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 22 maio 2014.

_____. Resolução Normativa n.º 482, de 17 de Abril de 2.012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências, na forma do artigo 4º, inciso II, do Decreto n.° 5.163, de 30 de julho de 2004. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 7 ago. 2014.

_____. Resolução Normativa n.° 228, de 25 de julho de 2006. Estabelece os requisitos para a certificação de centrais geradoras termelétricas na modalidade de geração distribuída, para fins de comercialização de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulada – ACR, na forma do artigo 14, inciso II, do Decreto n.° 5.163, de 30 de julho de 2004. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 7 ago. 2014.

Atlas Eólico do Estado de São Paulo. – São Paulo: Governo do Estado de São Paulo. Secretaria de Energia, 2012.

Atlas do Potência Eólico Brasileiro. Brasília, 2001.

BARROS, V. C. A, TRAJANO, R.C., Estudo preliminar de parque gerador eólico. Projeto Final de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

BRASIL. Decreto n.° 4.873, de 11 de novembro de 2003. Institui o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – "LUZ PARA TODOS" e dá outras providências. Disponível em: <www.presidencia.gov.br/legislacao>. Acesso em: 25 jun. 2014.

_____. Decreto n.° 5.163, de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <www.presidencia.gov.br/legislacao>. Acesso em: 25 jun. 2014.

Brasventos (2014). Disponível em: <www.brasventos.com.br/sustentabilidade>. Acesso em: 22 maio 2014.

Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.cepel.br/>. Acesso em: 22 maio 2014.

CERNE – Centro de Estratégias em Recursos Naturais & Energia (2014). Disponível em: <www.cerne.org.br/pt-BR/noticias/o-mercado-da-energia-eolica-no-mundo>. Acesso em: 22 maio 2014.

CHAGAS, A. F. e SOARES, D. L. F. (2014). Avaliação Técnica do Sistema de Geração Fotovoltaica e do Sistema de Geração Eólica da Embaixada da Itália. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica. Publicação FT. Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70p.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (2014). Disponível em: <www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial_eolica.

htm>. Acesso em: 17 jun. 2014.

DEBASTIANI, C. A. (2008). Análise Técnica de Ações. Editora Novatec.

DIAS, Marcos Vinícius Xavier; BORTONI, Edson da Costa; HADDAD, Jamil. Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras. In: *Revista Brasileira de Energia*, Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, Itajubá, Brasil v. 11, n. 2, p. 137–156, 2005.

Ecomacchine S.p.A. Disponível em: <http://www.ecomacchine.it/>. Acesso em: 12 jul. 2014.

ELECTREX – the energy saving technology. Disponível em: <http://www.electrex.it/en/>. Acesso em: 23 ago. 2014.

Eletrobras – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (2014). Disponível em: <www.eletrobras.com/elb/natrilhadaenergia/energia-eletrica/main.asp?View={B1E5C97A-39C6-49BE-9B34-9BC51ECC124F}>. Acesso em: 17 jun. 2014.

EL-KHATTAM, W; SALAMA, M.M.A. Distributed generation technologies, definitions and benefits. In: *Electric Power Systems Research*, Elsevier Science, Oxford, UK, v. 71, n. 2, p. 119–128, 2004.

Energia Eólica (2014). Disponível em: <evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/aerogerador-de-eixo-horizontal/custo-comparativo/>. Acesso em: 17 jun. 2014.

Energy BC. Disponível em: <www.energybc.ca/profiles/wind.html>. Acesso em: 17 jun. 2014.

ENGQUIMICASANTOSSP (2014). Disponível em: <www.engquimicasantossp.com.br/2013/12/energia-eolica-e-aerogeradores.html>. Acesso em: 16 jun. 2014.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2013.

ESA – Agência Espacial Europeia (2013). Disponível em: <www.esa.int/ESA>. Acesso em: 24 jan. 2014.

G1 – O Portal de Notícias da Globo. Distrito Federal. Disponível em: <g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2012/02/embaixada-da-italia-em-brasilia-abre-suas-portas-para-visitantes.html>. Acesso em: 12 jul. 2014.

Google Maps. Disponível em: <www.google.com.br/maps>. Acesso em: 12 jul. 2014.

GRUBB, M. J; MEYER, N. I. Wind energy: resources, systems and regional strategies. In: JO-HANSSON, T. B. et. al. Renewable energy: sources for fuels and electricity. Washington, D.C.: Island Press, 1993. p.

GWEC – Global Wind Energy Council. *Global Wind Report*. Annual Market Update, 2012.

IEA – International Energy Agency. *Key World Energy Statistics*, 2013. Disponível em: <http://www.iea.org/newsroomandevents/news/2013/october/key-world-energy-statistics-2013-now-available.html>. Acesso em: 07 ago. 2014.

Ingeteam. Disponível em: <http://www.ingeteam.com/br/pt-br/home.aspx>. Acesso em: 12 jul. 2014.

ITAIPU BINACIONAL (2014). Disponível em: <www.itaipu.gov.br/energia/producao-ano-ano>. Acesso em: 22 maio 2014.

LORA, Electo Eduardo Silva; HADDAD, Jamil (Coord.). *Geração distribuída*: aspectos tecnológicos, ambientais e institucionais. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

MEYER, R. *Improving Knowledge during Project Development.* Em ISES – International Solar Energy Society. Webinar: Improving DNI Information for CSP Development, 2013. Disponível em: <www.ises-online.de>. Acesso em: 22 maio 2014.

MMA – Ministério do Meio Ambiente (2014). Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/fontes-convencionais-de-energia/carvao> e <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-eolica>. Acesso em: 22 maio 2014.

MME – Ministério de Minas e Energia (2014). Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme>. Acesso em: 22 maio 2014.

MONTEZANO, B.E.M., 2007. Modelo Dinâmico de Visualização de um Aerogerador com Velocidade de Rotação Variável e Controle de Passo em VRML. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, UFRJ , Rio de Janeiro, Brazil, 137 pp.

NASA – Agência Espacial Americana. Disponível em: <earthobservatory.nasa.gov/Features/NightLights/> Acesso em: 28 maio 2014.

PAIVA, R. R. C.; VILLA, L. F. L.; ZÜRN, H. H. Algoritmo para Avaliação de Impacto da Geração Distribuída em Redes de Distribuição. Departamento de Engenharia Elétrica UFSC, Florianópolis, SC, 2009.

PEREIRA, R. C. (2013). Impactos da inserção de um sistema de micro-geração eólica distribuída para um alimentador radial real e suas unidades consumidoras. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2013, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 132p.

Petrobras: Energia, Pré-Sal, Biocombustível e Tecnologia (2014). Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-os-derivados-do-petroleo-que-fazem-parte-do-cotidiano.htm >. Acesso em: 29 nov. 2014.

PINTO, M. O. (2013). Fundamentos de energia eólica. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Planeta Sustentável – O futuro a gente faz agora (2014). Disponível em: <planetasustentavel.abril.com.br/noticia/desenvolvimento/embaixada-verde-italia-brasil-energia-solar-renovavel-limpa-618465.shtml>. Acesso em: 12 jul. 2014.

Portal R7 (2013). Disponível em: <lista10.org/diversos/os-10-acidentes-mais-caros-da-historia/>. Acesso em: 26 mar. 2014.

PÚBLICO (2013). Disponível em: <www.publico.pt/mundo/noticia/nao-ha-culpados-no-naufragio-do-prestige-1612308#/0>. Acesso em: 26 mar. 2014.

Revista Veja (2011). Disponível em: <veja.abril.com.br/noticia/mundo/cerca-de-440-reatores-nucleares-funcionam-em-30-paises>. Acesso em: 24 jan. 2014.

RODRIGUES, Flávia Francesca Capano. *Programação da contratação de energia considerando geração distribuída no novo modelo do setor elétrico brasileiro*. 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica)–Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

RODRÍGUEZ, Carlos Roberto Cervantes. *Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída*: o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2002. 118 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos)–Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ROMAGNOLI, Henrique Cesar. *Identificação de barreiras à geração distribuída no marco regulatório atual do setor elétrico brasileiro*. 2005. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

Schneider Electric. Disponível em: <http://www.schneider-electric.com/site/home/index.cfm/it/>. Acesso em: 23 ago. 2014.

SEVERINO, M. M. (2008). Avaliação Técnico-Econômica de um Sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia. Tese de

Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD – 027/08, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p.

SHAYANI, R. A. (2010). Método para Determinação do Limite de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica em Redes Radiais de Distribuição. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD-051/10, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161p.

SONDA – Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/>. Acesso em: 17 set. 2014.

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Disponível em: <www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/178/arquivos/Fontes%20Alternativas/atividade_sit_eolicos.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2014.

WILLIS, H. Lee; SCOTT, Walter G. *Distributed power generation*: planning and evaluation. New York: Marcel Dekker, 2000.

WWF Brasil (2014). Disponível em: <http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes ambientais/desenvolvimento_sustentavel/>. Acesso em: 29 nov. 2014.

APÊNDICE

A – AVALIAÇÃO MENSAL PARA A CIDADE DE BRASÍLIA

A.1 MÊS DE FEVEREIRO

Para o mês de fevereiro, verificou-se que a velocidade média do vento foi de 0,98 m/s. Para a modelagem empregada para o SMGE, constatou-se uma geração de 7,50 kWh e, devido às perdas, obteve-se um total de 7,23 kWh. Nesse mês a direção predominante do vento foi a Sul e o maior valor de velocidade do vento constatado foi de 4,66 m/s.

O Gráfico A.1 mostra a potência do vento, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência averiguado foi de 1.342,22 W, para o maior valor de velocidade do vento.

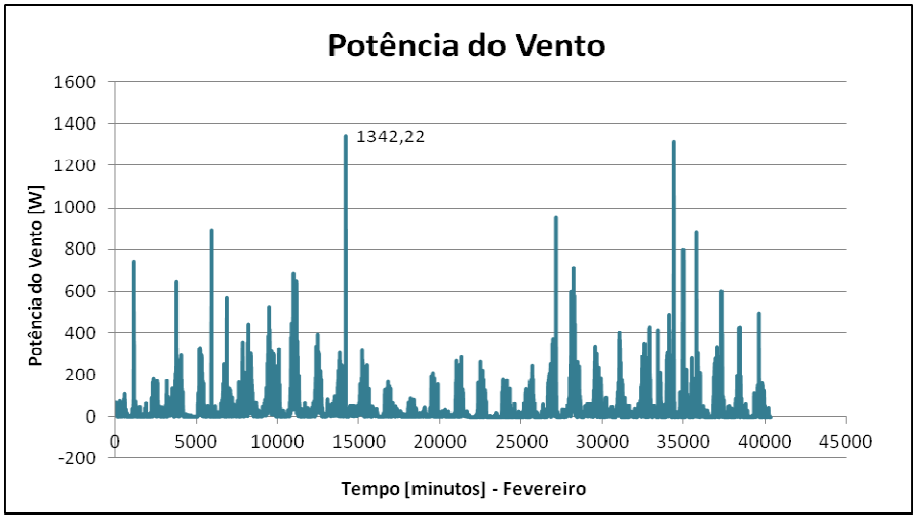


Gráfico A.1 *Potência do vento ao longo do mês de fevereiro.*

O Gráfico A.2 revela a potência na saída do gerador, em W, durante o mês (expresso em minutos). O maior valor de potência verificado foi de 136,19 W, para o maior valor de velocidade do vento. Pegando-se os maiores valores de potência, constata-se que a diferença entre a potência do vento e a potência gerada pelas turbinas eólicas é de 885,55%.

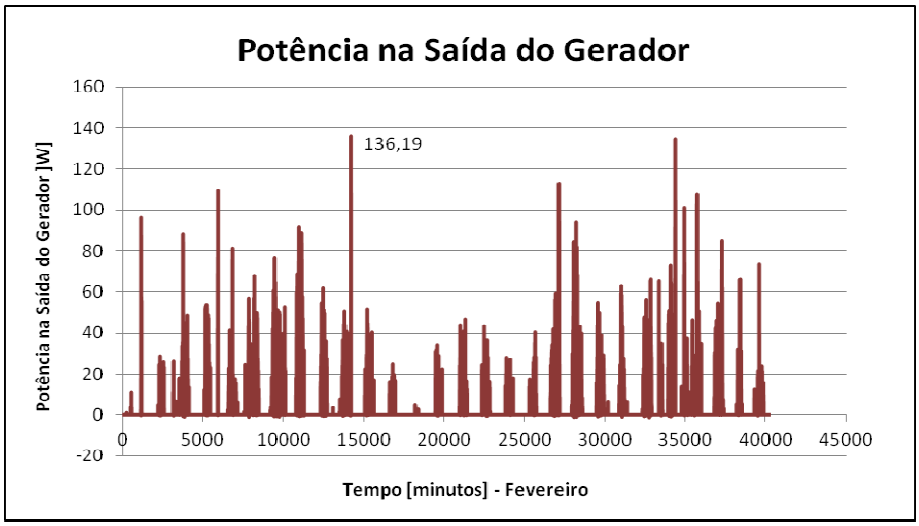


Gráfico A.2 *Potência na saída do gerador eólico durante o mês de fevereiro.*

O Gráfico A.3 mostra a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de energia constatado foi de 0,0113 kWh, para o maior valor de velocidade do vento.

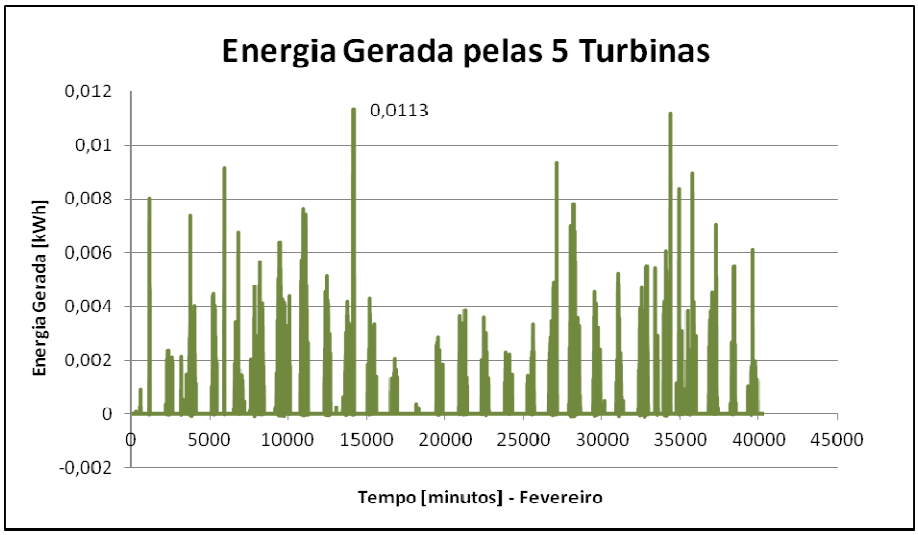


Gráfico A.3 *Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de fevereiro.*

O Gráfico A.4, semelhante ao Gráfico A.3, revela a energia total produzida pelas cinco turbinas, em kWh, durante o mês (expresso em minutos), após as perdas nos cabos condutores e nos inversores. O maior valor de energia verificado foi de 0,0109 kWh, para o maior valor de velocidade do vento. Como mencionando no item 4.3.1, a energia obtida no mês é dada pela soma de cada valor de energia gerada/produzida a cada minuto. Assim,

obteve-se os valores mencionados anteriormente, para o mês de fevereiro, e a energia total produzida, após às perdas, corresponde a 96,45% da energia gerada, o que revela uma perda de 3,55% de energia.

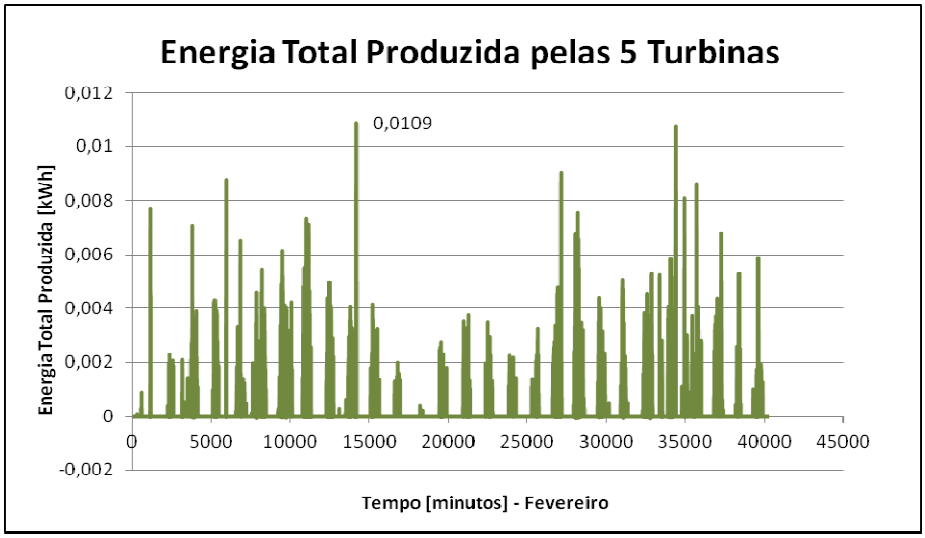


Gráfico A.4 *Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de fevereiro.*

No Gráfico A.5 tem-se a Distribuição de Weibull. Para o mês de fevereiro, verifica-se que o valor de velocidade que possui maior frequência é 1,0 m/s.

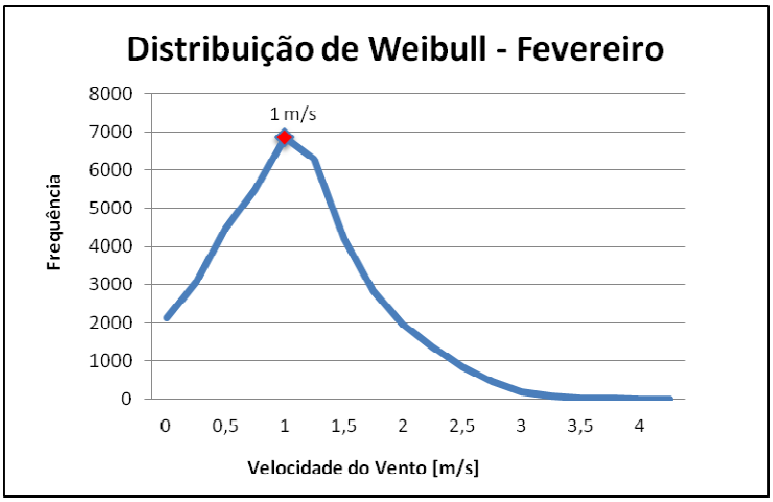
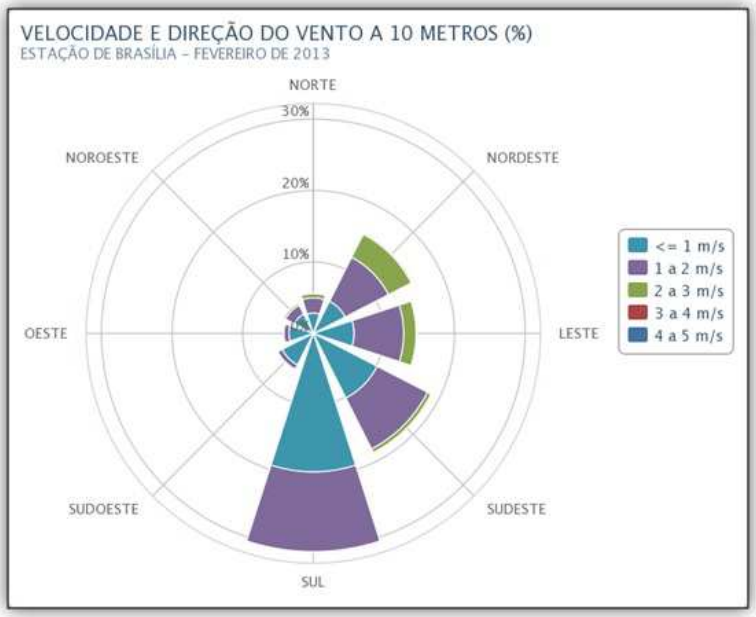


Gráfico A.5 *Distribuição de Weibull para o mês de fevereiro.*

O Gráfico A.6 revela as direções de incidência do vento, a 10 m de altura, e a sua velocidade durante do mês de fevereiro. Verifica-se que a direção predominante é a Sul e que a velocidade predominante (um pouco acima de 30%) encontra-se entre 1 e 2 m/s.



Fonte: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). (modificado)

Gráfico A.6 *Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de fevereiro.*

A.2 MÊS DE MARÇO

Para o mês de março, verificou-se que a velocidade média do vento foi de 0,97 m/s. Para a modelagem empregada para o SMGE, constatou-se uma geração de 10,10 kWh e, devido às perdas, obteve-se um total de 9,74 kWh. Nesse mês as direções predominantes do vento foram a Sul e a Sudeste e o maior valor da velocidade do vento foi de 5,50 m/s.

O Gráfico A.7 mostra a potência do vento, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência averiguado foi de 2192,35 W, para o maior valor da velocidade do vento.

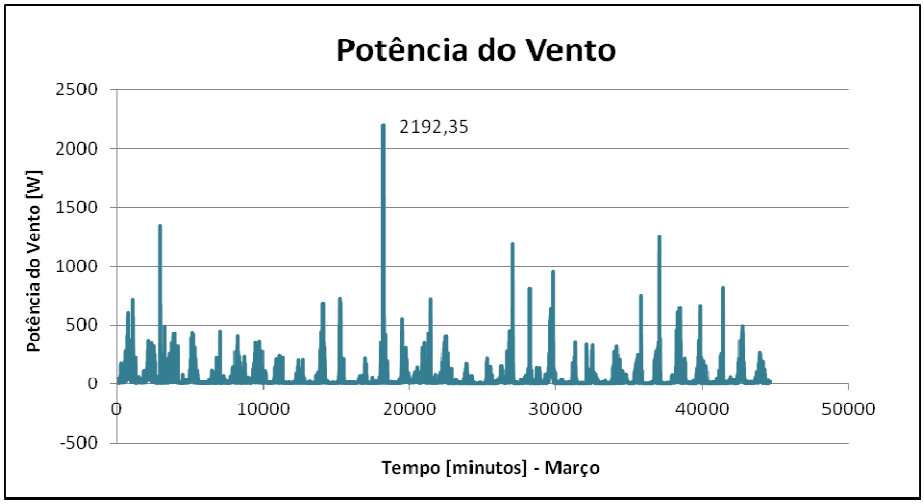


Gráfico A.7 *Potência do vento ao longo do mês de março.*

O Gráfico A.8 revela a potência na saída do gerador, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência verificado foi de 175,62 W, para o maior valor da velocidade do vento constatado para o mês de março. A potência do vento, em comparação à potência gerada pelas turbinas eólicas, é 1.148,35% maior, avaliando os maiores valores de geração, como mostrados nos Gráficos A.7 e A.8.

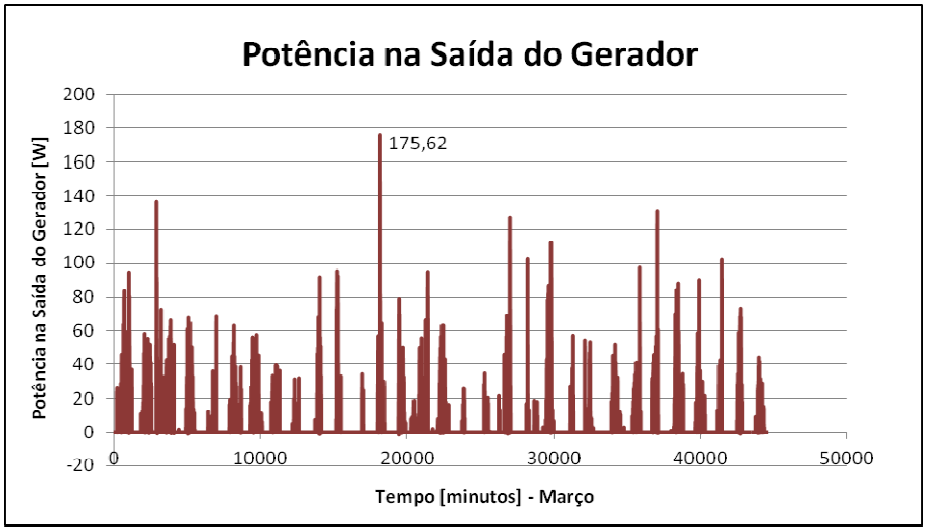


Gráfico A.8 *Potência na saída do gerador eólico durante o mês de março.*

O Gráfico A.9 mostra a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de energia constatado foi de 0,0146 kWh, para o maior valor de velocidade do vento.

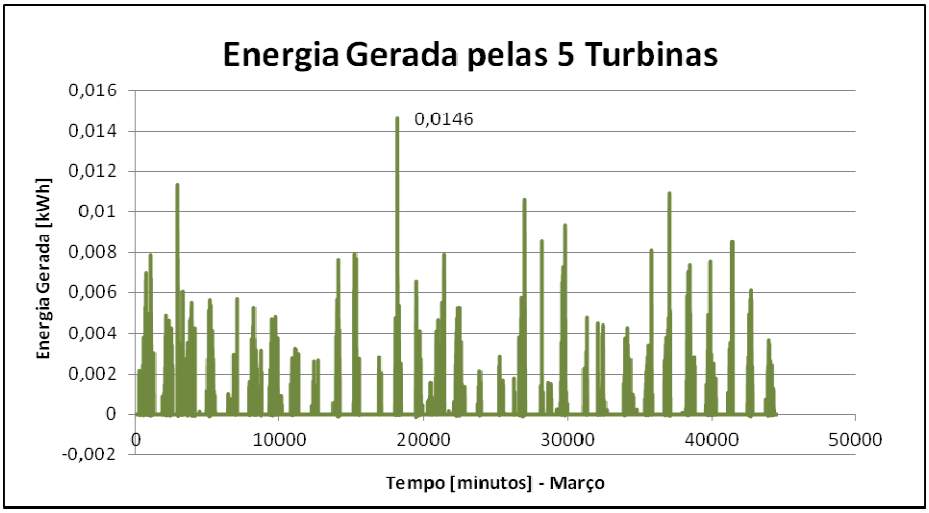


Gráfico A.9 *Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de março.*

O Gráfico A.10, semelhante ao Gráfico A.9, revela a energia total produzida pelas cinco turbinas, em kWh, durante o mês (a cada minuto), após as perdas nos cabos condutores e nos inversores. O maior valor de energia verificado foi de 0,0140 kWh.

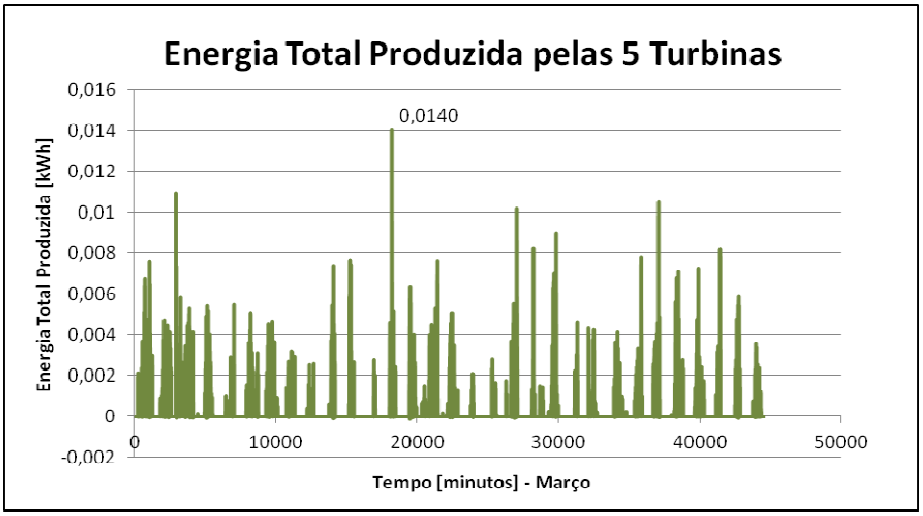


Gráfico A.10 *Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de março.*

Somando todas as energias geradas e a energia total produzida pelas turbinas (valores verificados no início deste item A.2), verifica-se que esta última corresponde a 96,45% da primeira, devido às perdas. Estas representam, assim, a 3,55%.

No Gráfico A.11 tem-se a Distribuição de Weibull, a qual relaciona a velocidade do vento e a sua frequência ao longo do mês. Para o mês de março, verifica-se que a velocidade que possui maior frequência é a de 0,75 m/s.

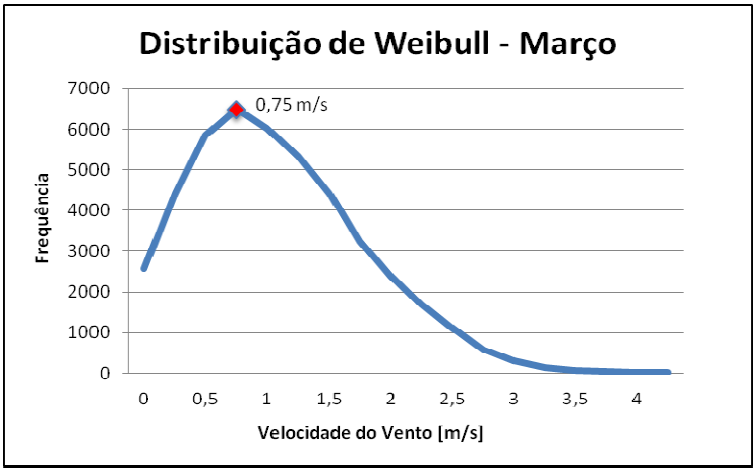
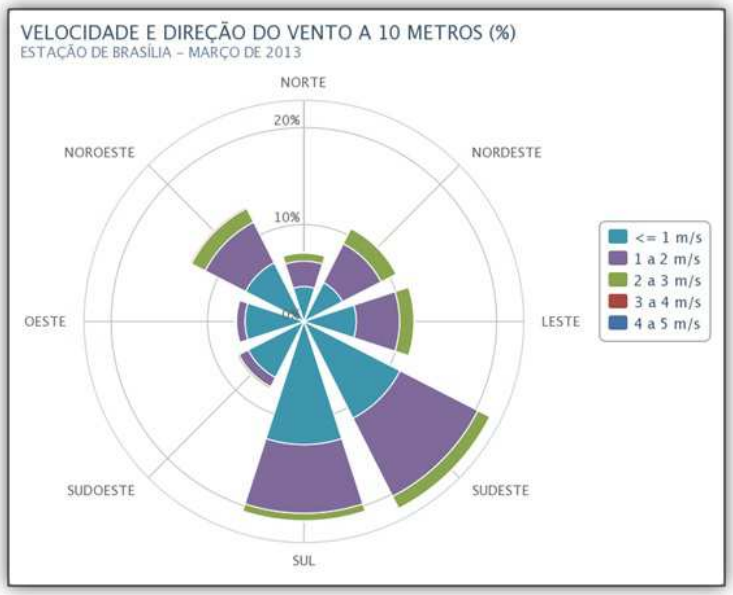


Gráfico A.11 *Distribuição de Weibull para o mês de março.*

O Gráfico A.12 revela as direções de incidência do vento, a 10 m de altura, e a sua velocidade, durante do mês de março. Verifica-se que as direções predominantes são a Sul e a Sudeste e que a velocidade do vento predominante (entre 10 e 20%) encontra-se entre 1 e 2 m/s.



Fonte: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). (modificado)

Gráfico A.12 *Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de março.*

A.3 MÊS DE ABRIL

Para o mês de abril, verificou-se que a velocidade média do vento foi de 0,97 m/s. Para a modelagem empregada para o SMGE, constatou-se uma geração de 5,74 kWh e, devido às perdas, obteve-se um total de 5,53 kWh. Nesse mês, a direção predominante do vento foi a Sul e a maior velocidade do vento constatada foi de 5,63 m/s.

O Gráfico A.13 mostra a potência do vento, em W, durante o mês (em cada minuto). O maior valor de potência averiguado foi de 2364,45 W, para o maior valor da velocidade do vento. Esse valor de potência é bastante alto, comparado aos demais valores ao longo do mês analisado; revelando que o dado referente à maior velocidade do vento foi incomum para o período analisado.

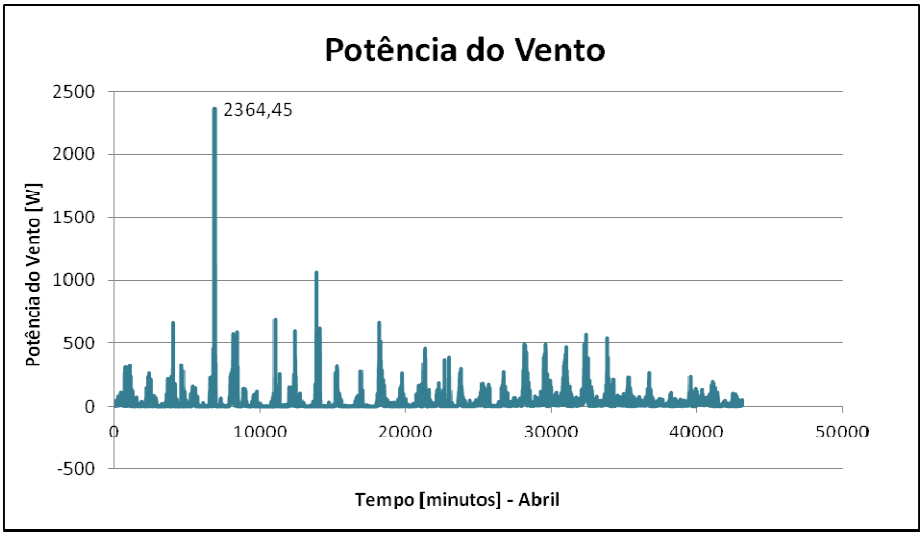


Gráfico A.13 *Potência do vento ao longo do mês de abril.*

O Gráfico A.14 revela a potência na saída do gerador, em W, durante o mês (em cada minuto). O maior valor de potência verificado foi de 182,29 W, para o maior valor da velocidade do vento. Comparando a potência do vento e a potência gerada, verifica-se, no ponto de maior velocidade, que a primeira é 1197,08% maior que a segunda.

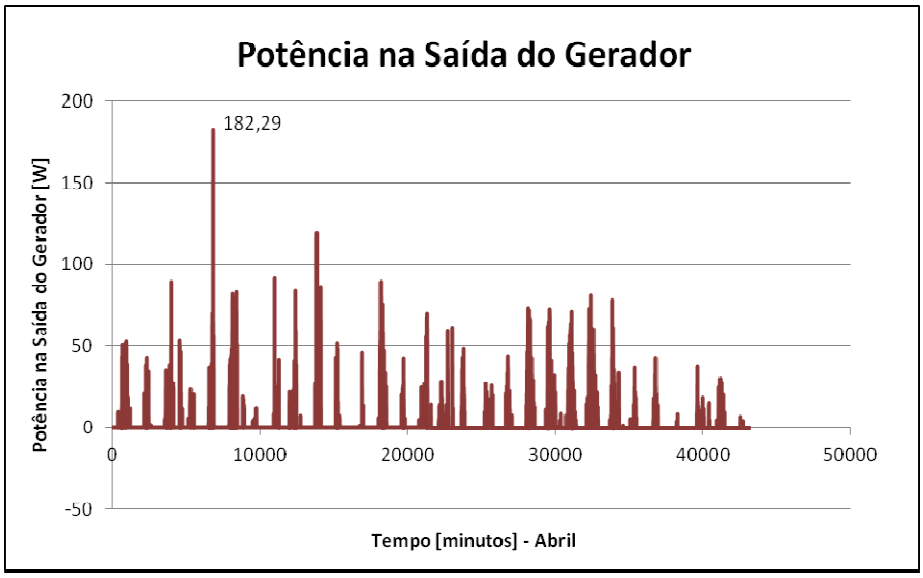


Gráfico A.14 *Potência na saída do gerador eólico durante o mês de abril.*

O Gráfico A.15 mostra a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh, durante o mês (expresso em minutos). O maior valor de energia constatado foi de 0,0146 kWh, para o maior valor da velocidade do vento.

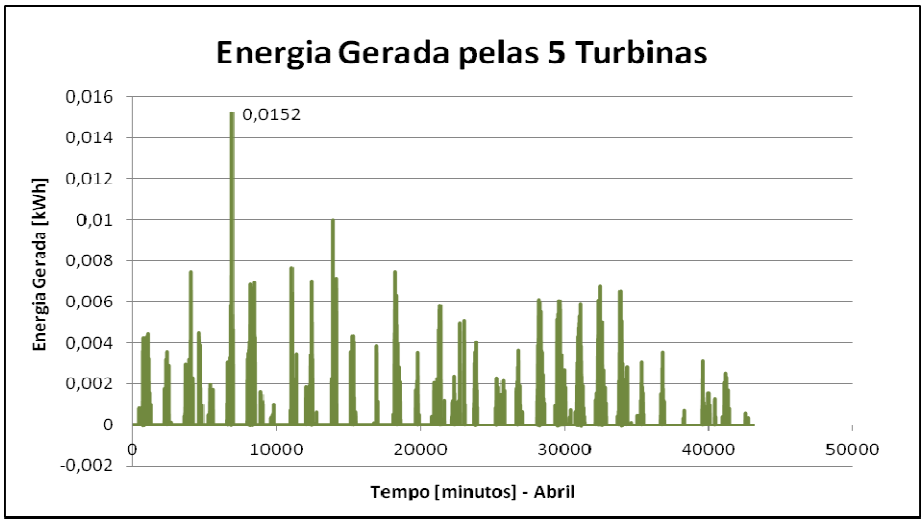


Gráfico A.15 *Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de abril.*

O Gráfico A.16, semelhante ao Gráfico A.15, revela a energia total produzida pelas cinco turbinas, em kWh, durante o mês (expresso em minutos), após as perdas nos cabos condutores e nos inversores. O maior valor de energia verificado foi de 0,0146 kWh. A energia total produzida corresponde a 96,46% da energia gerada pelas turbinas eólicas, de

acordo com os valores mostrados no início deste item A.3; em que 3,54% correspondem às perdas.

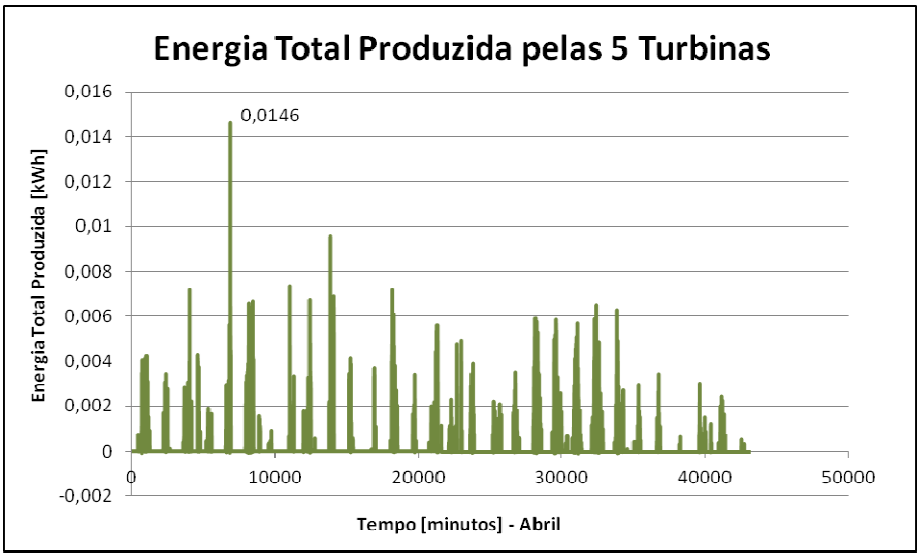


Gráfico A.16 *Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de abril.*

No Gráfico A.17 tem-se a Distribuição de Weibull, a qual relaciona a velocidade do vento e a sua frequência ao longo do mês. Para o mês de abril, verifica-se que a velocidade de 1,25 m/s é a que possui maior frequência.

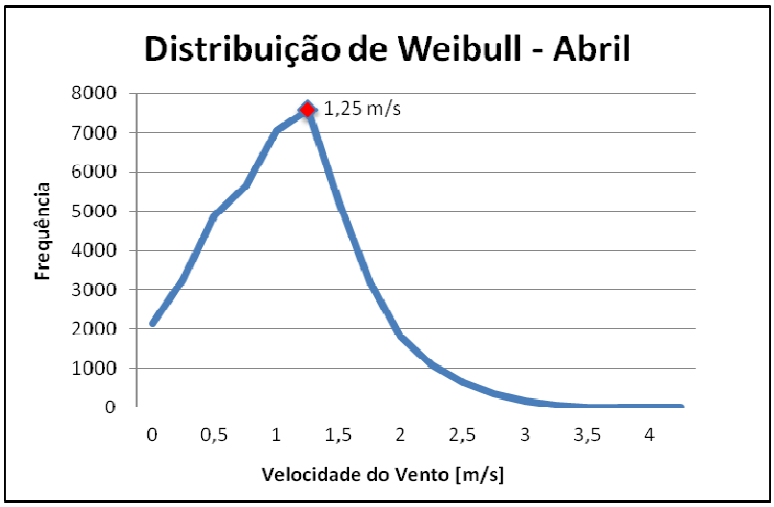
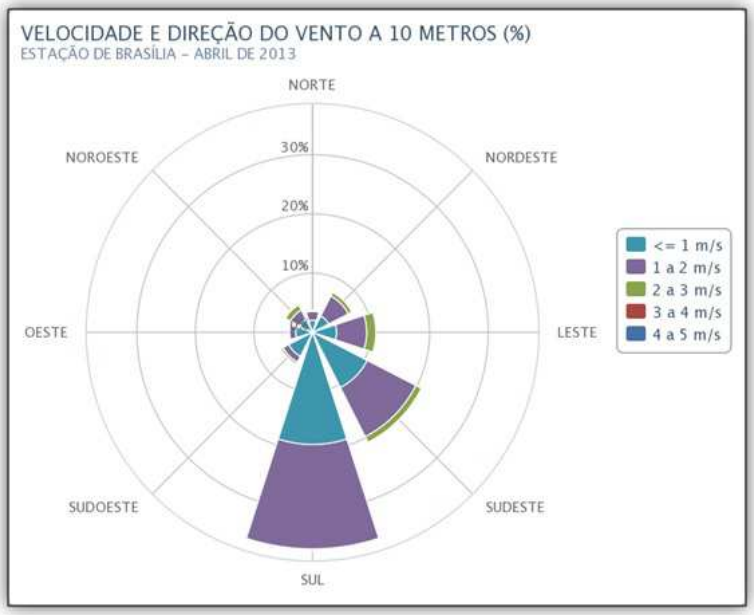


Gráfico A.17 *Distribuição de Weibull para o mês de abril.*

O Gráfico A.18 revela as direções de incidência do vento, a 10m de altura, e a sua velocidade durante o mês de abril. Verifica-se que a direção predominante é a Sul e que a velocidade do vento com maior ocorrência (acima de 30%) é a que está entre 1 e 2 m/s.



Fonte: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). (modificado)

Gráfico A.18 *Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de abril.*

A.4 MÊS DE MAIO

Para o mês de maio, verificou-se que a velocidade média do vento foi de 1,10 m/s. Para a modelagem empregada para o SMGE, constatou-se uma geração de 8,49 kWh e, devido às perdas, obteve-se um total de 8,19 kWh. Nesse mês a direção predominante do vento foi a Sul e a velocidade do vento registrada nesse foi de 3,97 m/s.

O Gráfico A.19 mostra a potência do vento, em W, durante o mês (em cada minuto). O maior valor de potência averiguado foi de 830,55 W, para o maior valor de velocidade do vento registrado.

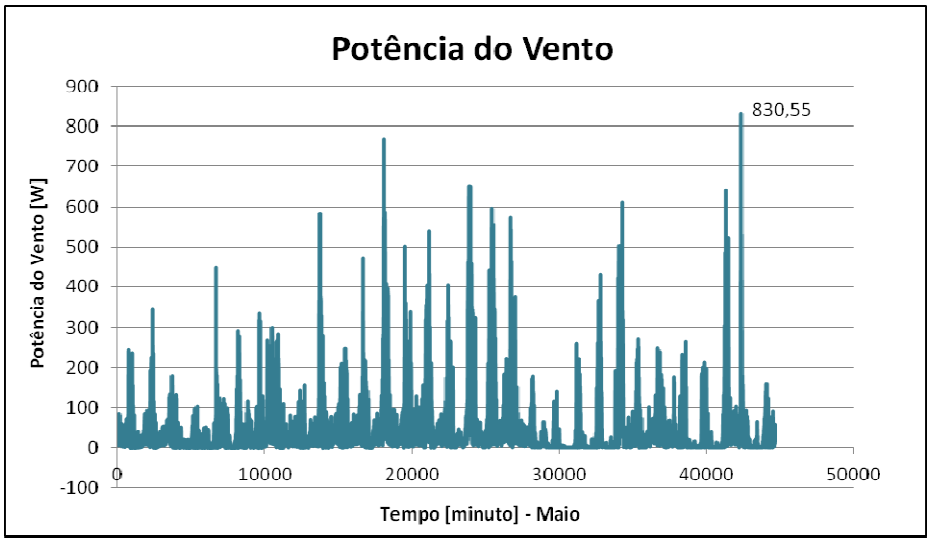


Gráfico A.19 *Potência do vento ao longo do mês de maio.*

O Gráfico A.20 revela a potência na saída do gerador, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência verificado foi de 103,38 W. A potência do vento é 703,39% maior que a potência gerada pelas turbinas eólicas; tendo como referência os valores de potência registrados nos Gráficos A.19 e A.20, que são referentes à maior velocidade do vento averiguados no mês de maio.

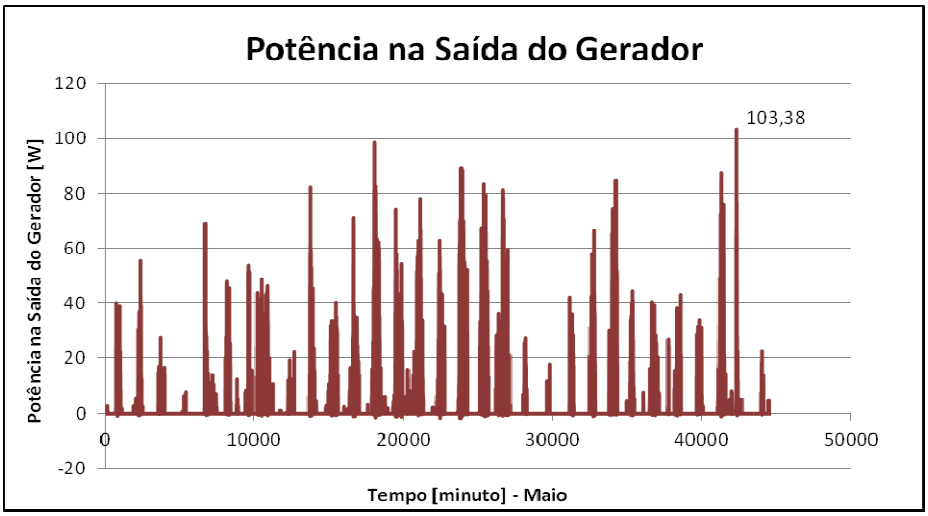


Gráfico A.20 *Potência na saída do gerador eólico durante o mês de maio.*

O Gráfico A.21 mostra a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de energia constatado foi de 0,00862 kWh, para a maior velocidade do vento registrada.

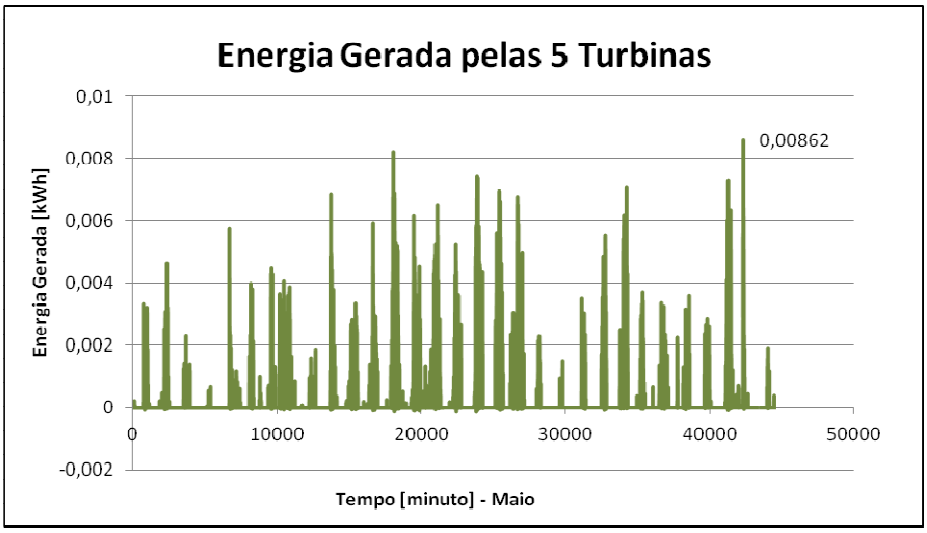


Gráfico A.21 *Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de maio.*

O Gráfico A.22, semelhante ao Gráfico A.21, revela a energia total produzida pelas cinco turbinas, em kWh, durante o mês (expresso em minutos); após as perdas nos cabos condutores e nos inversores. O maior valor de energia verificado foi de 0,00828 kWh, correspondente à maior velocidade do vento registrada no mês de maio. Somando toda a energia produzida durante esse mês, constata-se o valor que foi mencionado anteriormente, cuja energia total produzida corresponde a 96,46% da energia gerada pelas turbinas eólicas – perdas de 3,54%.

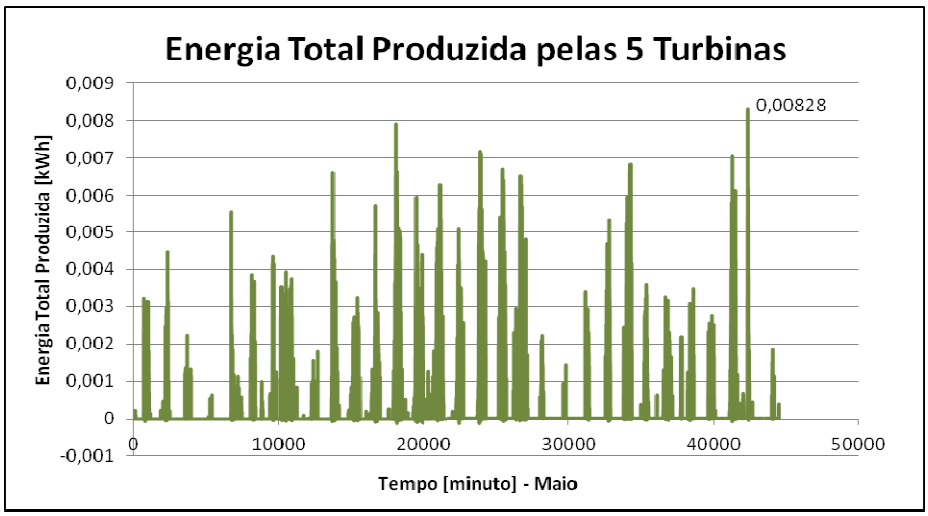


Gráfico A.22 *Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de maio.*

No Gráfico A.23 tem-se a Distribuição de Weibull, a qual relaciona a velocidade do vento e a sua frequência ao longo do mês. Para o mês de maio, verifica-se que a velocidade que possui maior frequência é a que está em torno de 1,25 m/s.

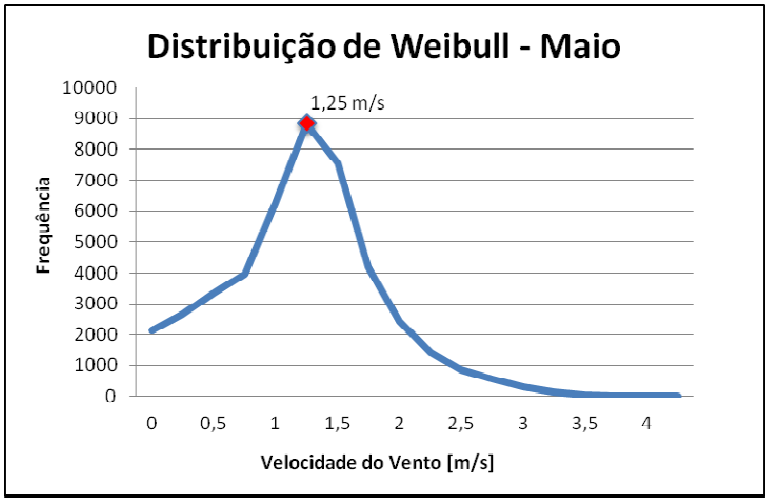
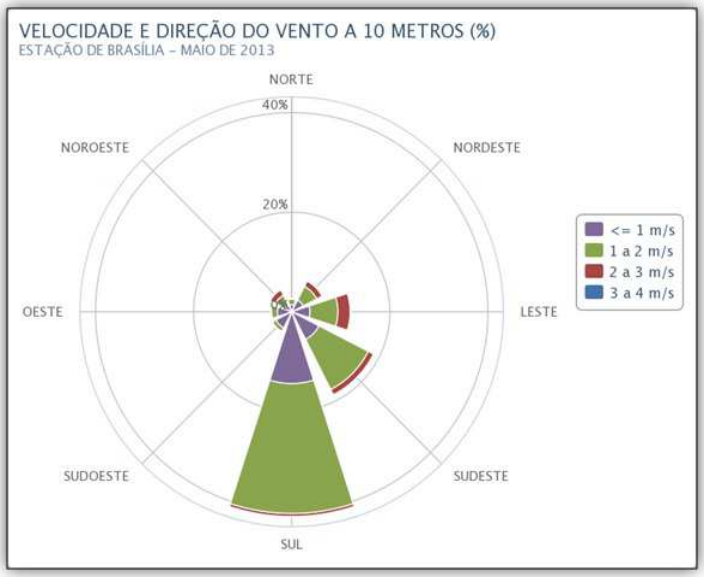


Gráfico A.23 *Distribuição de Weibull para o mês de maio.*

O Gráfico A.24 revela as direções de incidência do vento, a 10 m de altura, e a sua velocidade durante do mês de maio. Verifica-se nesse que a direção predominante é a Sul e que a velocidade predominante (um pouco acima de 40%) está compreendida entre 1 e 2 m/s.



Fonte: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). (modificado)

Gráfico A.24 *Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de maio.*

A.5 MÊS DE JUNHO

Para o mês de junho, verificou-se que a velocidade média do vento foi de 1,11 m/s. Para a modelagem empregada para o SMGE, constatou-se uma geração de 8,22 kWh e, devido às perdas, obteve-se um total de 7,93 kWh. Nesse mês a direção predominante do vento foi a Sul e a maior velocidade do vento constatada foi de 3,92 m/s.

O Gráfico A.25 mostra a potência do vento, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência averiguado foi de 797,13 W; para a maior velocidade do vento.

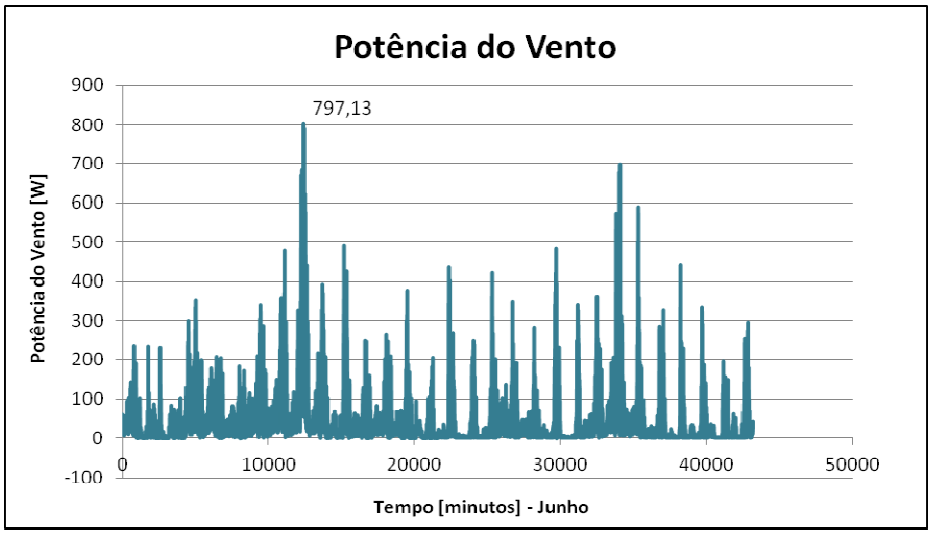


Gráfico A.25 *Potência do vento ao longo do mês de junho.*

O Gráfico A.26 revela a potência na saída do gerador, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência verificado foi de 100,81 W, para a maior velocidade do vento. Nota-se, ao avaliar o maior valor de potência nos Gráficos A.25 e A.26, que a potência do vento é 690,72% maior que a potência gerada pelas turbinas eólicas.

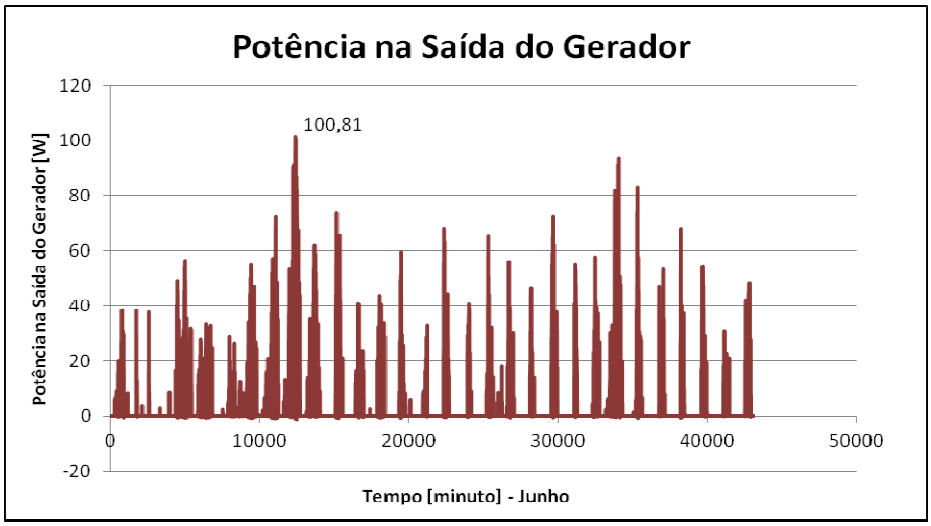


Gráfico A.26 *Potência na saída do gerador eólico durante o mês de junho.*

O Gráfico A.27 mostra a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de energia constatado foi de 0,00840 kWh, para a maior velocidade do vento.

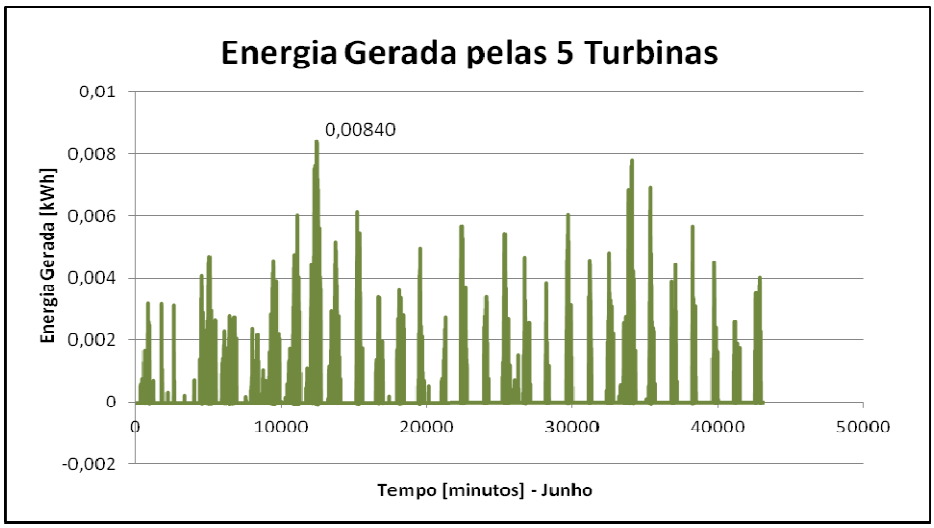


Gráfico A.27 *Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de junho.*

O Gráfico A.28, semelhante ao Gráfico A.27, revela a energia total produzida pelas cinco turbinas, em kWh, durante o mês (expresso em minutos); após as perdas nos cabos condutores e nos inversores. O maior valor de energia verificado foi de 0,00808 kWh, para o maior valor de velocidade do vento. Percebe-se que a energia total produzida pelas

turbinas eólicas corresponde a 96,47% da energia gerada; em que as perdas somam um total de 3,53% desta energia.

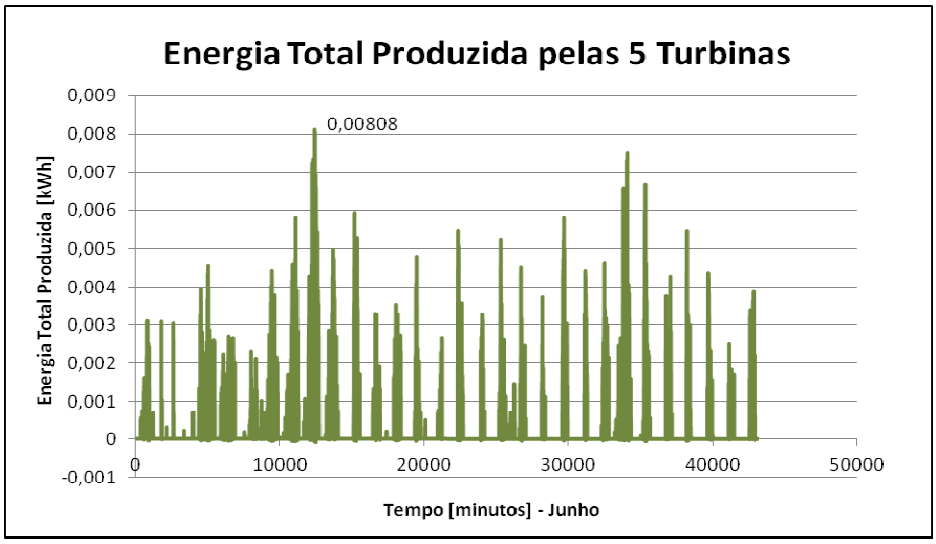


Gráfico A.28 *Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de junho.*

No Gráfico A.29 tem-se a Distribuição de Weibull, a qual relaciona a velocidade do vento e a sua frequência ao longo do mês. Para o mês de junho, verifica-se que a velocidade de 1,25 m/s é a que possui maior frequência.

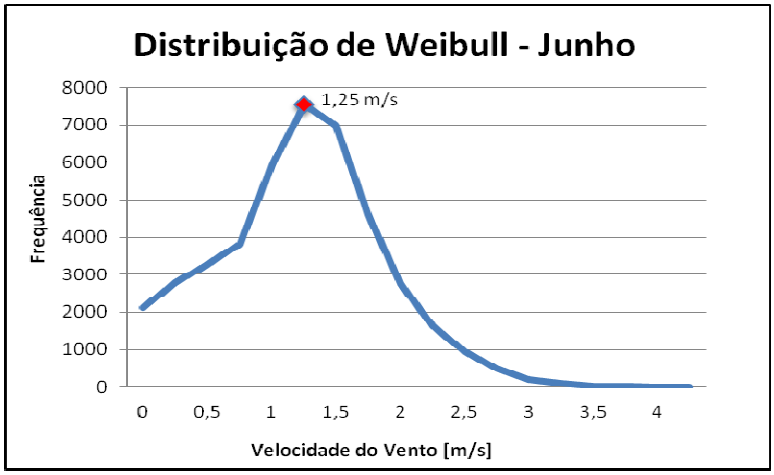
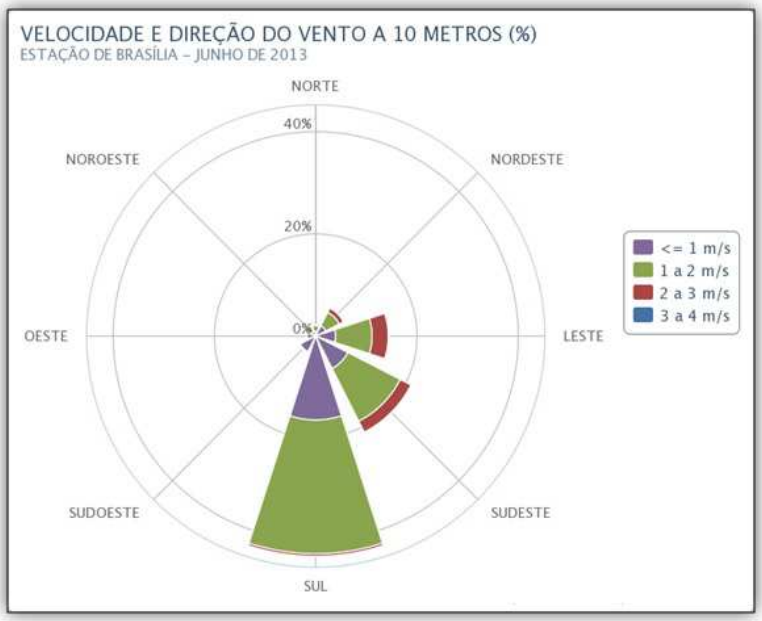


Gráfico A.29 *Distribuição de Weibull para o mês de junho.*

O Gráfico A.30 revela as direções de incidência do vento, a 10 m de altura, e a sua velocidade durante do mês de junho. Verifica-se que a direção predominante é a Sul e que a velocidade predominante (um pouco acima de 40%) encontra-se entre 1 a 2 m/s.



Fonte: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). (modificado)

Gráfico A.30 *Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de junho.*

A.6 MÊS DE JULHO

Para o mês de julho, verificou-se que a velocidade média do vento foi de 1,22 m/s. Para a modelagem empregada para o SMGE, constatou-se uma geração de 16,32 kWh e, devido às perdas, obteve-se um total de 15,74 kWh. Nesse mês a direção predominante do vento foi a Sul e o maior valor da velocidade do vento constatado foi de 3,97 m/s.

O Gráfico A.31 mostra a potência do vento, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência averiguado foi de 827,42 W, para o maior valor da velocidade do vento.

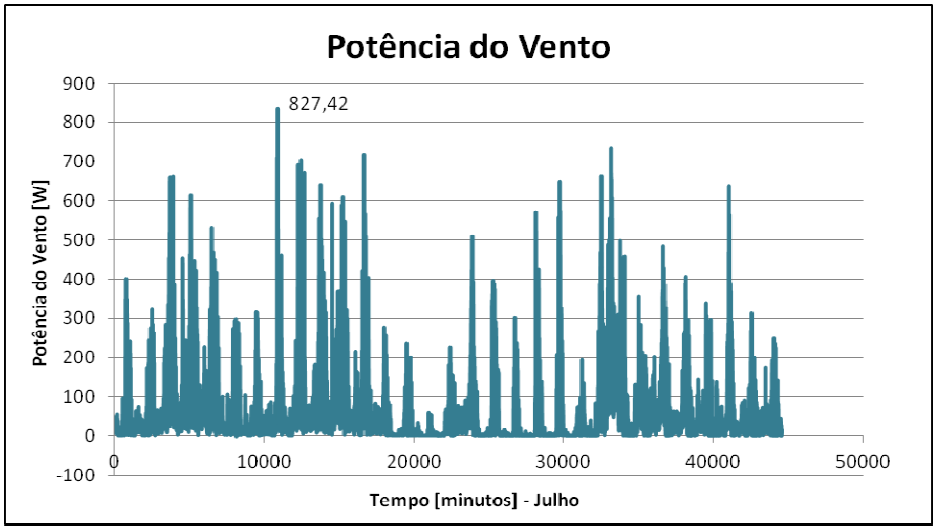


Gráfico A.31 *Potência do vento ao longo do mês de julho.*

O Gráfico A.32 revela a potência na saída do gerador, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência verificado foi de 103,15 W, para a maior velocidade do vento. Verifica-se que a potência do vento é 702,15% maior que a potência gerada pelas turbinas eólicas (avaliando os pontos que correspondem à maior velocidade do vento).

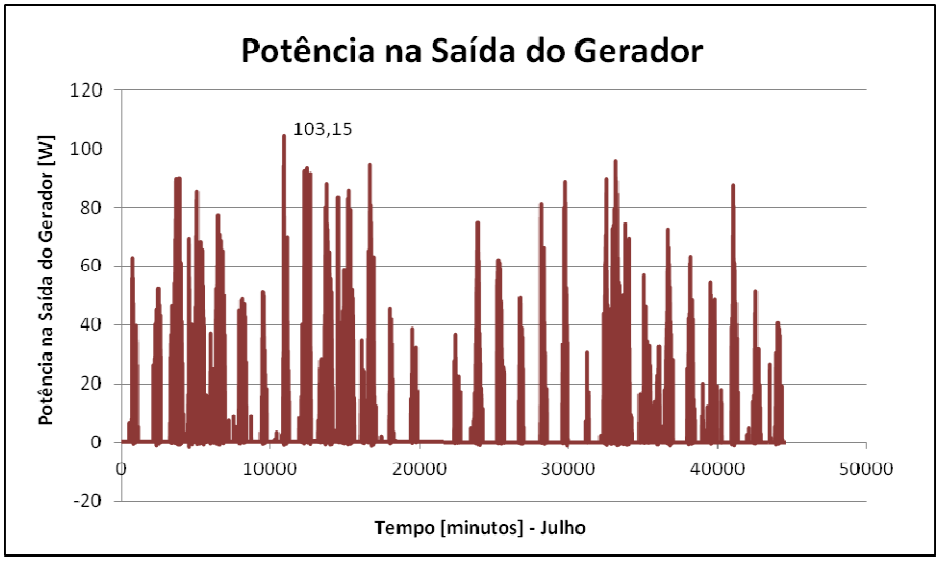


Gráfico A.32 *Potência na saída do gerador eólico durante o mês de julho.*

O Gráfico A.33 mostra a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de energia constatado foi de 0,00859 kWh, para o maior valor da velocidade do vento.

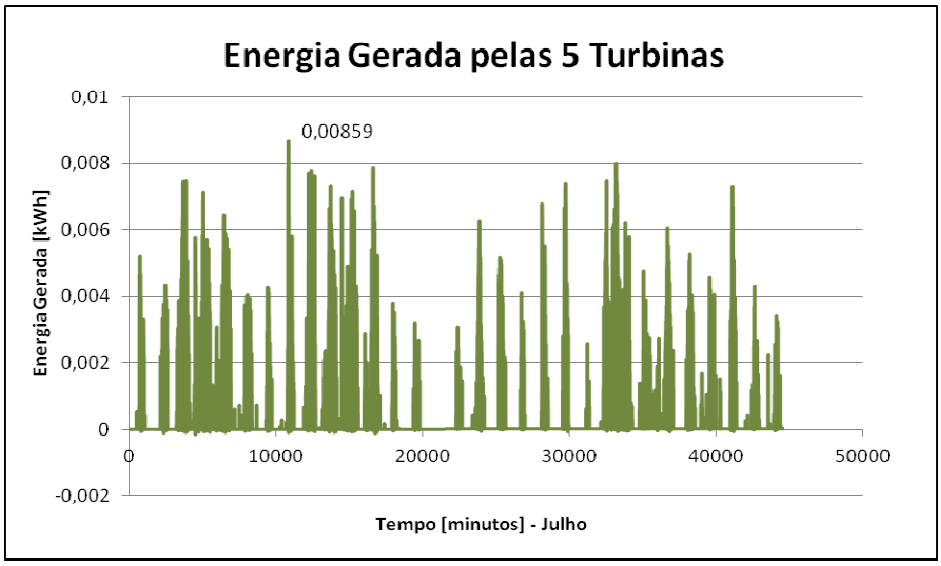


Gráfico A.33 *Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de julho.*

O Gráfico A.34, semelhante ao Gráfico A.33, revela a energia total produzida pelas cinco turbinas, em kWh, durante o mês (expresso em minutos), após as perdas nos cabos condutores e nos inversores. O maior valor de energia foi de 0,0827 kWh, referente ao maior valor da velocidade do vento. Verifica-se que a energia total produzida pelas turbinas corresponde a 96,45% da energia gerada por esses equipamentos, após a avaliação das perdas, que compreendem 3,55% da energia gerada.

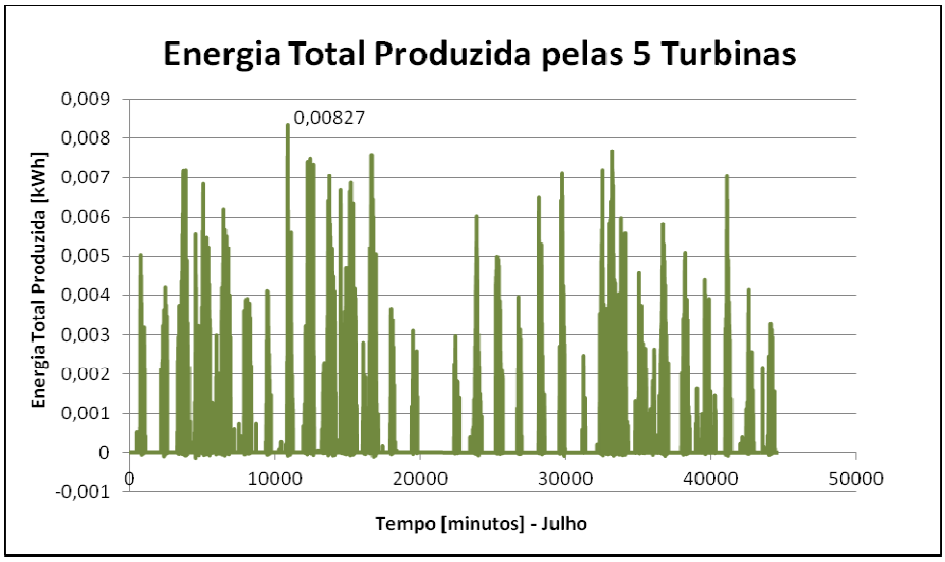


Gráfico A.34 *Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de julho.*

No Gráfico A.35 tem-se a Distribuição de Weibull, a qual relaciona a velocidade do vento e a sua frequência ao longo do mês. Para o mês de julho, verifica-se que a velocidade que possui maior frequência é a de 1,50 m/s.

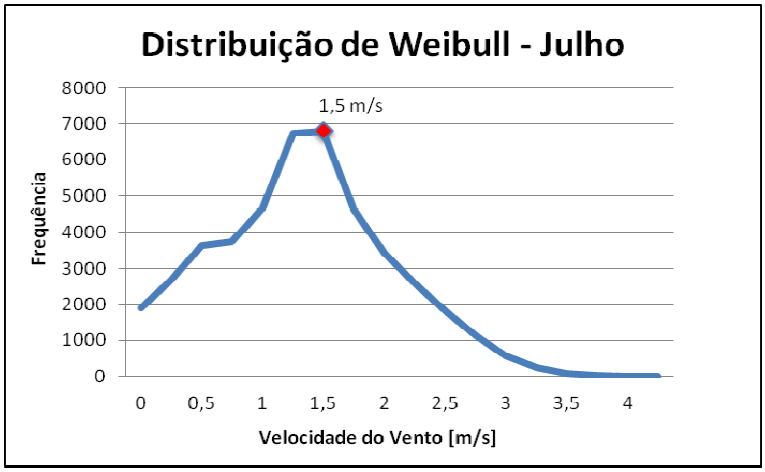
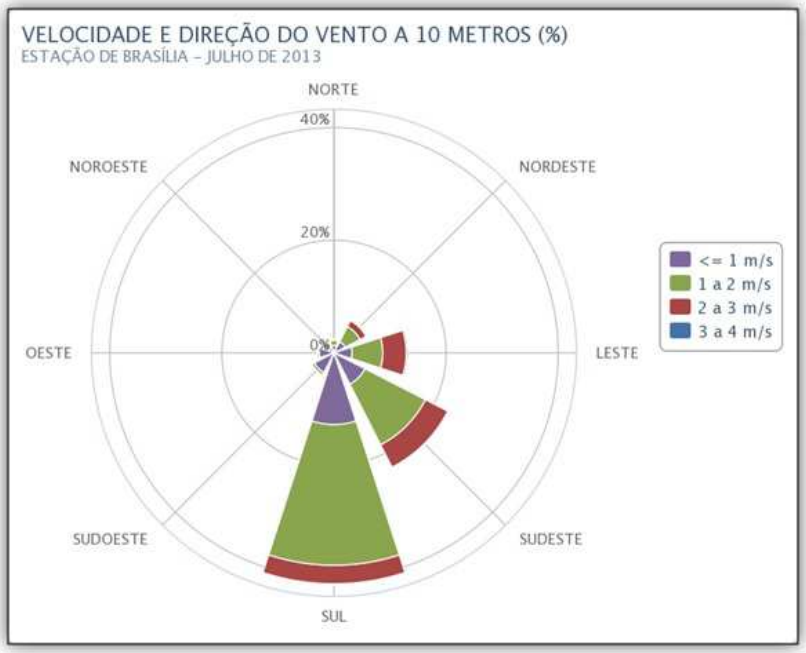


Gráfico A.35 *Distribuição de Weibull para o mês de julho.*

O Gráfico A.36 revela as direções de incidência do vento, a 10 m de altura, e a sua velocidade durante do mês de julho. Verifica-se que a direção predominante é a Sul e que a velocidade predominante (um pouco abaixo de 40%) está entre 1 e 2 m/s.



Fonte: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). (modificado)

Gráfico A.36 *Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de julho.*

A.7 MÊS DE AGOSTO

Para o mês de agosto, verificou-se que a velocidade média do vento foi de 1,07 m/s. Para a modelagem empregada para o SMGE, constatou-se uma geração de 20,83 kWh e, devido às perdas, obteve-se um total de 20,09 kWh. Nesse mês as direções predominantes do vento foram a Sul e a Sudeste e a maior velocidade do vento registrada foi de 4,19 m/s.

O Gráfico A.37 mostra a potência do vento, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência averiguado foi de 976,38 W, para o maior valor da velocidade do vento. Um aspecto importante observado no gráfico é a não atribuição de valores para a potência do vento em um determinado período. Isso foi uma consideração realizada, pois o SONDA não forneceu valores da velocidade do vento durante esse período – dado 2.341 ao 12.261 (os dados estavam com a designação N/A, como foi dito na Capítulo 3). Essa consideração foi realizada nos demais gráficos que se referem à potência gerada pelas turbinas eólicas e as respectivas energias: gerada e total produzida por essas turbinas.

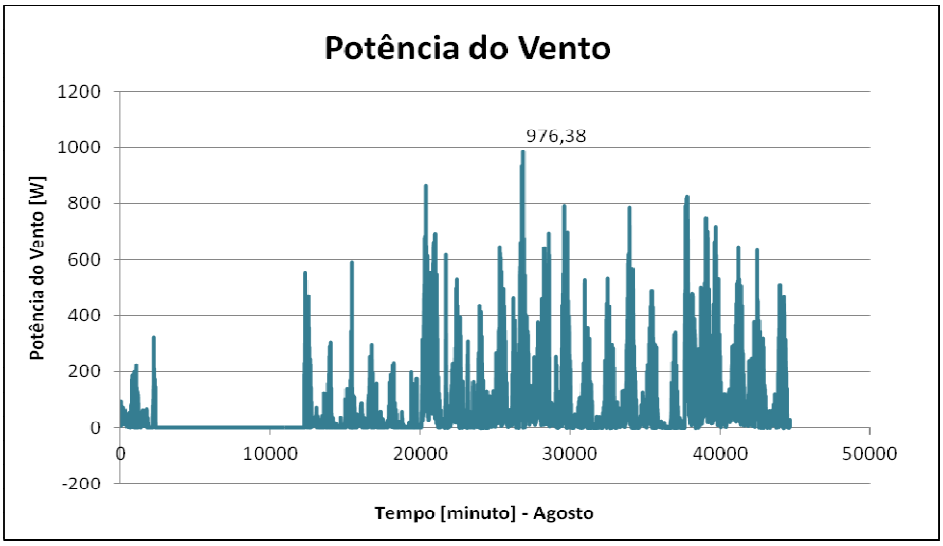


Gráfico A.37 *Potência do vento ao longo do mês de agosto.*

O Gráfico A.38 revela a potência na saída do gerador, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência verificado foi de 113,86 W, para o maior valor da velocidade do vento. Percebe-se que a potência do vento, no ponto onde se tem maior velocidade, é 757,53% maior que a potência gerada pela turbina eólica.

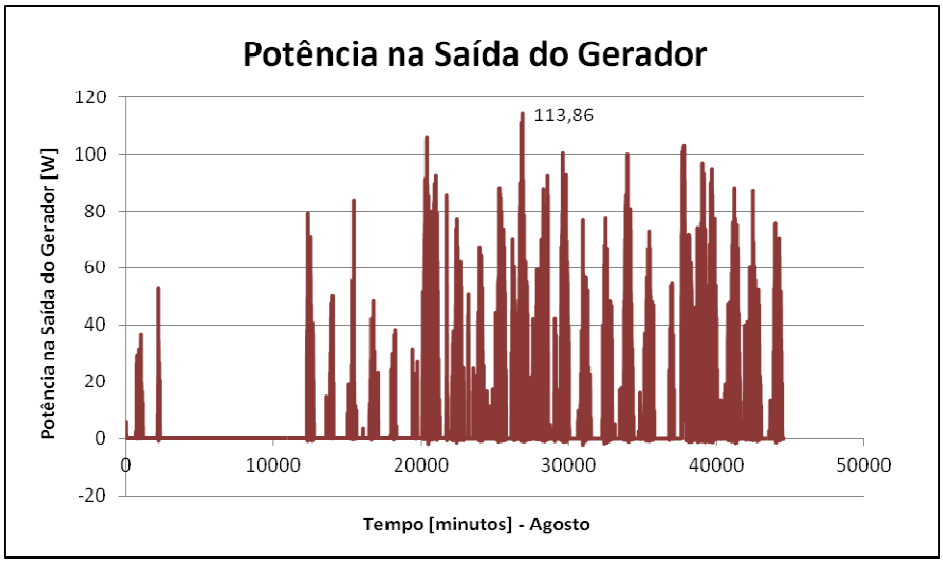


Gráfico A.38 *Potência na saída do gerador eólico durante o mês de agosto.*

O Gráfico A.39 mostra a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de energia constatado foi de 0,00949 kWh, referente ao maior valor da velocidade do vento no mês de agosto.

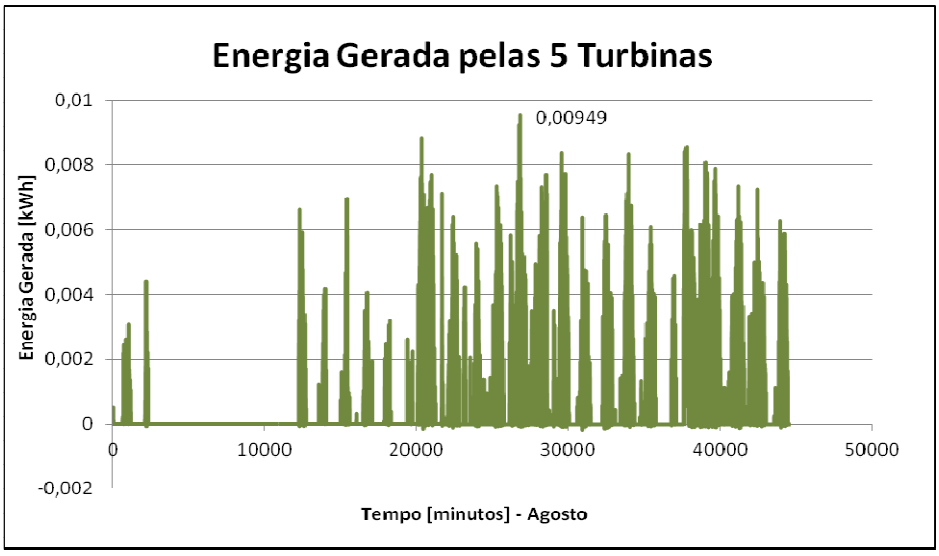


Gráfico A.39 *Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de agosto.*

O Gráfico A.40, semelhante ao Gráfico A.39, revela a energia total produzida pelas cinco turbinas, em kWh, durante o mês (expresso em minutos), após as perdas nos cabos condutores e nos inversores. O maior valor de energia foi de 0,00912 kWh, para a maior velocidade do vento medida no mês. Somando toda a energia gerada e somando toda a

energia total produzida, verificam-se os valores ditos no início deste item A.7; em que a energia total produzida corresponde a 96,43% da energia gerada (3,57% correspondendo às perdas).

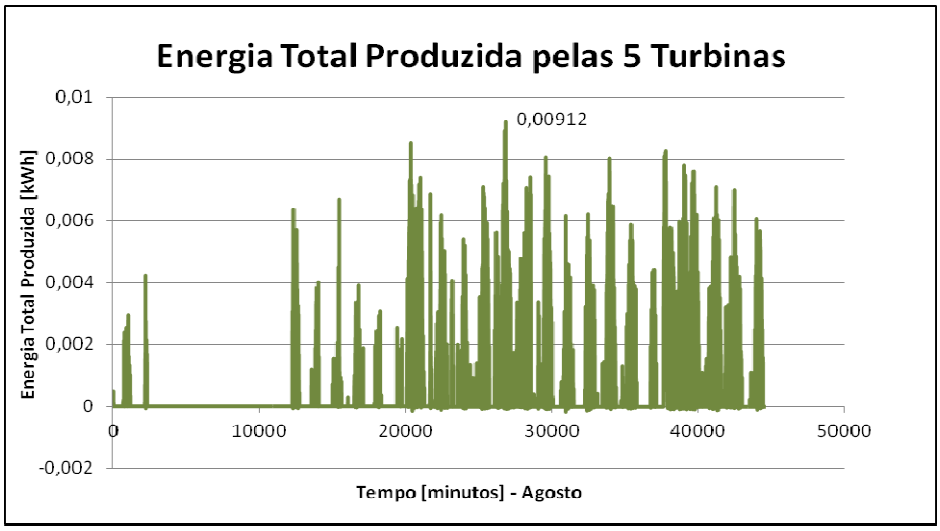


Gráfico A.40 *Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de agosto.*

No Gráfico A.41 tem-se a Distribuição de Weibull, a qual relaciona a velocidade do vento e a sua frequência ao longo do mês. Para o mês de agosto verifica-se que a velocidade que possui maior frequência é a de 1,25 m/s.

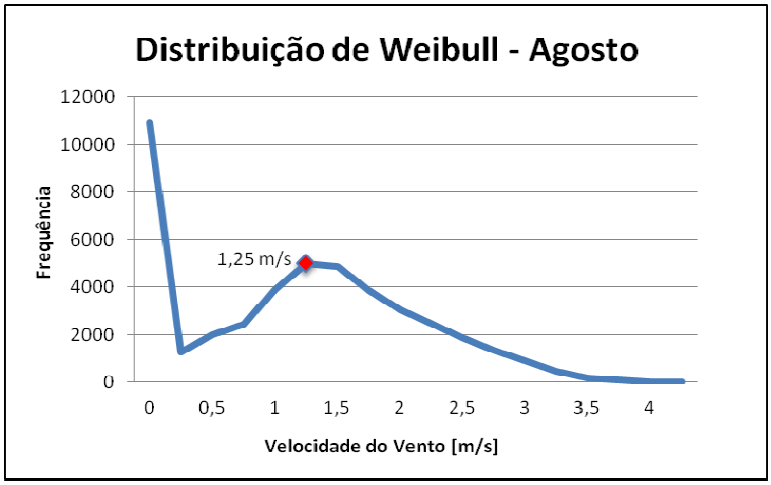
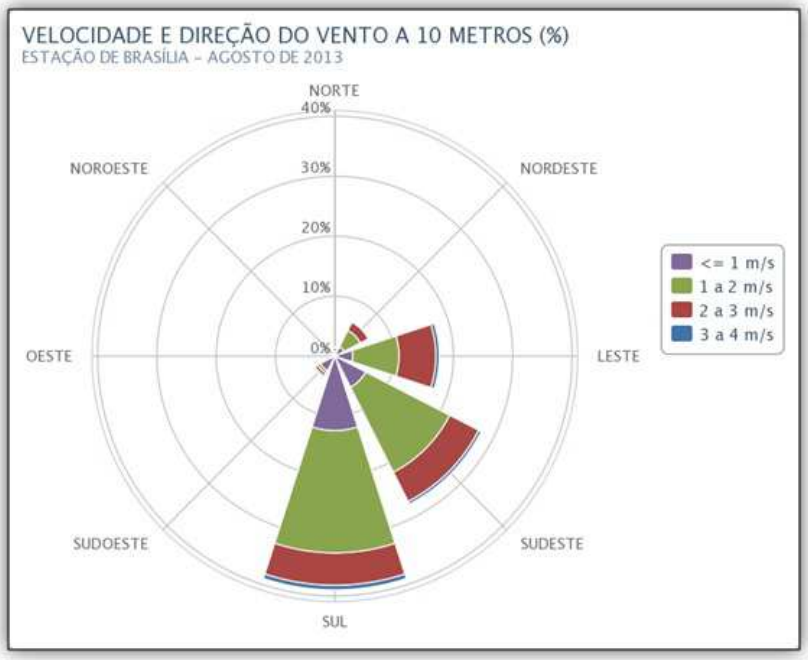


Gráfico A.41 *Distribuição de Weibull para o mês de agosto.*

Uma característica observada no Gráfico A.41 é a ocorrência de um pico, quando a velocidade do vento é igual à zero; que corresponderia a maior frequência. Entretanto, esta

constatação foi uma consideração realizada, como foi mencionado anteriormente. Pode-se, dessa forma, desconsiderar esse pico e avaliar o gráfico a partir do valor a que ele corresponde – constata-se que a velocidade de 1,25 m/s é a que possui maior frequência.

O Gráfico A.42 revela as direções de incidência do vento, a 10 m de altura, e a sua velocidade durante do mês de agosto. Verifica-se que as direções predominantes são a Sul e a Sudeste e que o valor de velocidade predominante (um pouco acima de 30%) se encontra entre 1 e 2 m/s.



Fonte: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). (modificado)

Gráfico A.42 *Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de agosto.*

A.8 MÊS DE SETEMBRO

Para o mês de setembro, verificou-se que a velocidade média do vento foi de 1,28 m/s. Para a modelagem empregada para o SMGE, constatou-se uma geração de 29,98 kWh e, devido às perdas, obteve-se um total de 28,90 kWh. Esse mês foi o que obteve a maior geração de energia durante todo o ano de 2013. No mês de setembro, as direções predominantes do vento foram a Sul e a Sudeste e a maior velocidade do vento verificada foi de 6,03 m/s.

O Gráfico A.43 mostra a potência do vento, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência averiguado foi de 2905,27 W, para o maior valor da velocidade do vento.

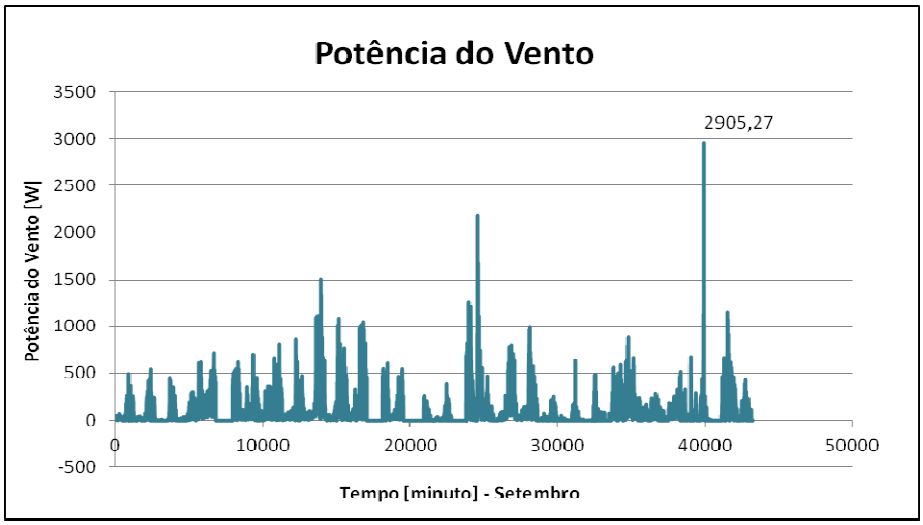


Gráfico A.43 *Potência do vento ao longo do mês de setembro.*

O Gráfico A.44 revela a potência na saída do gerador, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência verificado foi de 203,50 W, para a maior velocidade do vento. Nota-se que a potência do vento é 1.327,65% maior que a potência gerada pela turbina eólica, essa avaliação é feita no ponto onde se tem a maior potência, ou seja, onde se tem a maior velocidade do vento registrada.

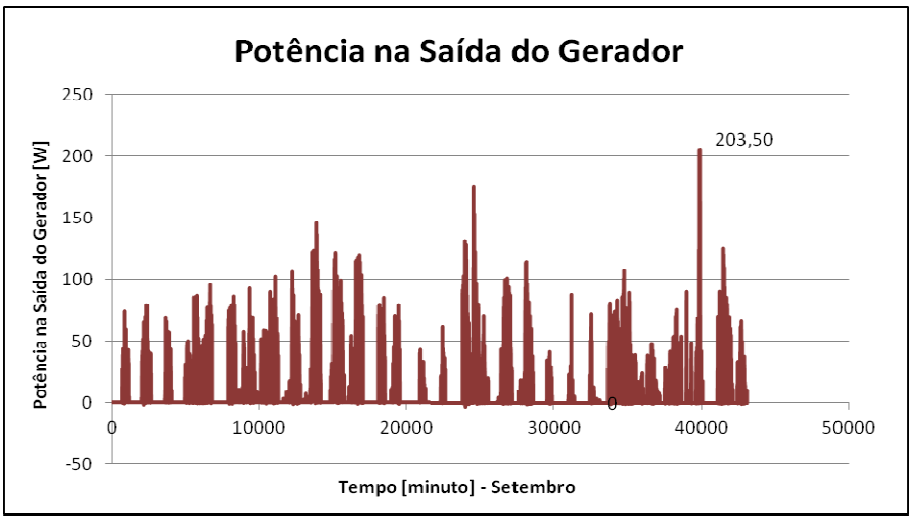


Gráfico A.44 *Potência na saída do gerador eólico durante o mês de setembro.*

O Gráfico A.45 mostra a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de energia constatado foi de 0,0169 kWh, para o maior valor de velocidade do vento.

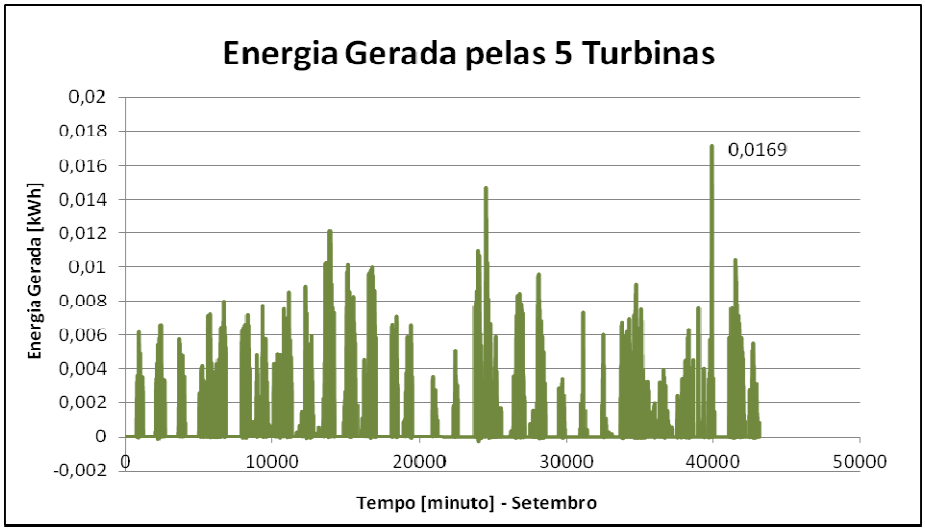


Gráfico A.45 *Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de setembro.*

O Gráfico A.46, semelhante ao Gráfico A.45, revela a energia total produzida pelas cinco turbinas, em kWh, durante o mês (a cada minuto), após as perdas nos cabos condutores e nos inversores. O maior valor de energia foi de 0,0162 kWh, para a maior velocidade do vento.

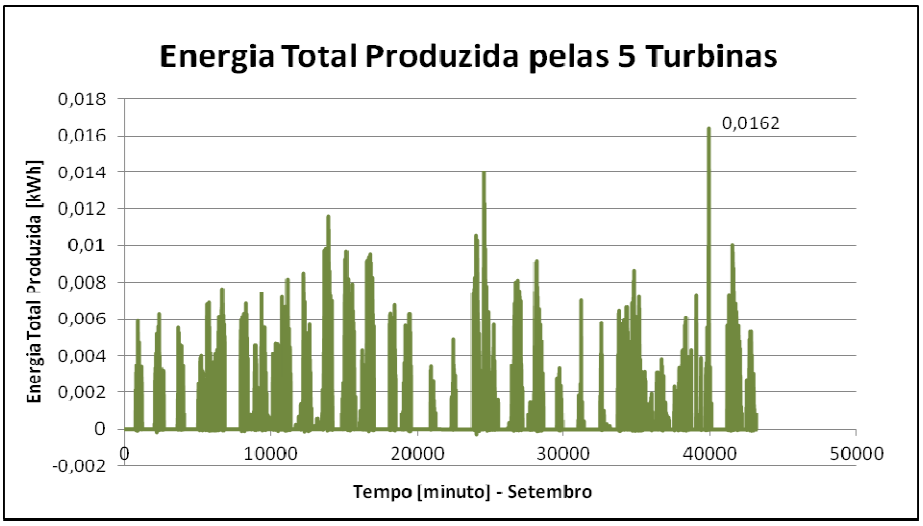


Gráfico A.46 *Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de setembro.*

Verifica-se que a energia total produzida (de acordo com os valores mencionados no início deste item A.8) corresponde a 96,40% da energia gerada, e que as perdas compreendem 3,60% dessa energia.

No Gráfico A.47 tem-se a Distribuição de Weibull, a qual relaciona a velocidade do vento e a sua frequência ao longo do mês. Para o mês de setembro, verifica-se que a velocidade que possui maior frequência é a de 1,50 m/s.

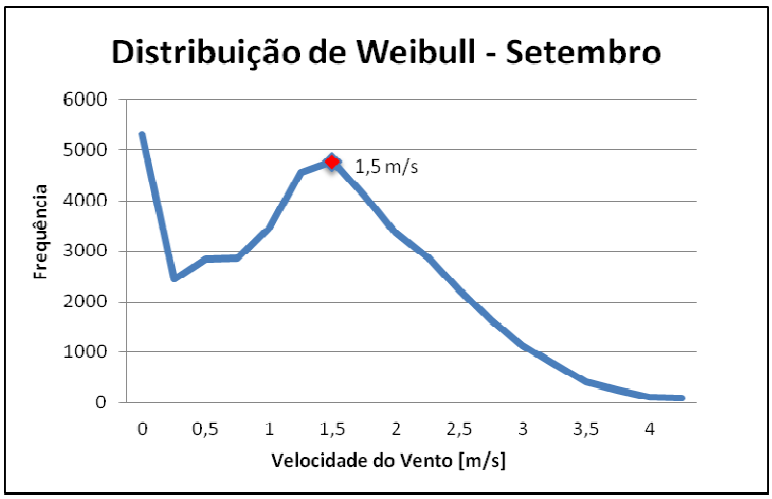
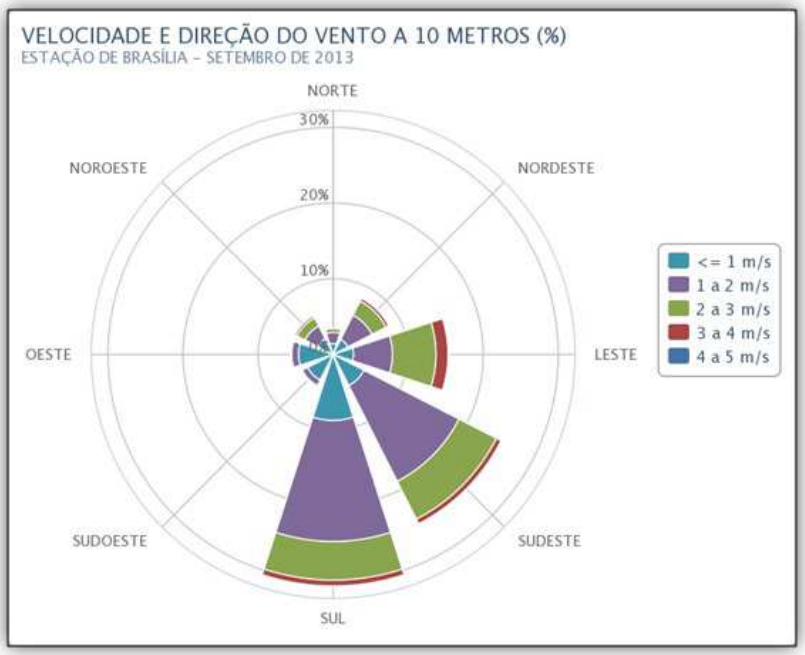


Gráfico A.47 *Distribuição de Weibull para o mês de setembro.*

Como discutido no item A.7, no mês de setembro também ocorrem vários dados, referentes à velocidade do vento, em que não havia atribuição de valores (designação N/A). Foram, dessa forma, consideradas as velocidades do vento iguais à zero, o que explica o pico no Gráfico A.47 no valor zero (esse pico não foi tão elevado em comparação ao que ocorreu no Gráfico A.41). Pode-se, assim, desconsiderar tal pico e avaliar o restante do gráfico; constando que a velocidade de 1,50 m/s é a que possuiu maior frequência no mês de setembro.

O Gráfico A.48 revela as direções de incidência do vento, a 10 m de altura, e a sua velocidade durante do mês de setembro. Verifica-se que as direções predominantes são a Sul e a Sudeste e que o valor da velocidade predominante do vento (entre 20 e 30%) está entre 1 e 2 m/s.



Fonte: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). (modificado)

Gráfico A.48 *Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de setembro.*

A.9 MÊS DE OUTUBRO

Para o mês de outubro, verificou-se que a velocidade média do vento foi de 1,24 m/s. Para a modelagem empregada para o SMGE, constatou-se uma geração de 18,35 kWh e, devido às perdas, obteve-se um total de 17,70 kWh. Nesse mês as direções predominantes do vento foram a Sul e a Sudeste e o maior valor da velocidade do vento registrado no mês de outubro foi de 5,47 m/s.

O Gráfico A.49 mostra a potência do vento, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência averiguado foi de 2168,47 W, para o maior valor de velocidade do vento. Verificou-se também que há outro ponto, cujo valor é bem próximo ao anterior: 1.990,36 kWh (referente ao segundo maior registro da velocidade do vento no mês de outubro: 5,31 m/s).

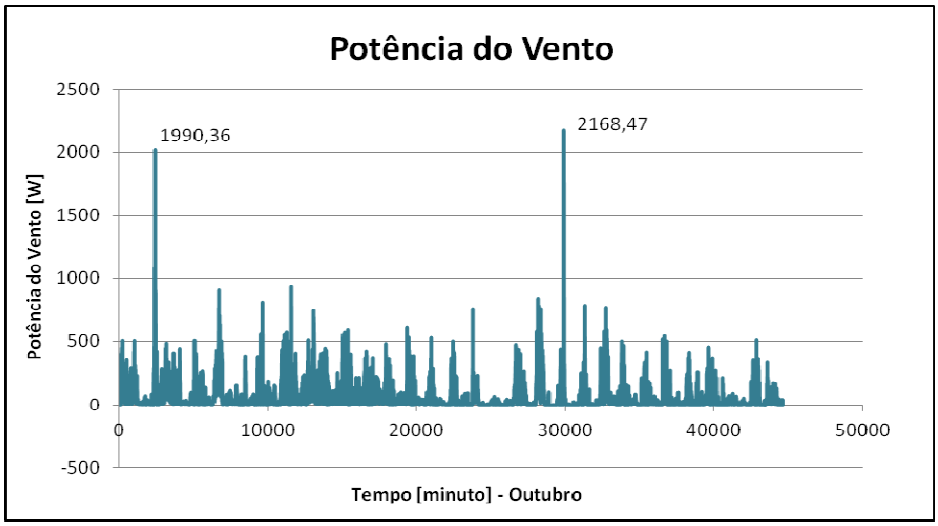


Gráfico A.49 *Potência do vento ao longo do mês de outubro.*

O Gráfico A.50 revela a potência na saída do gerador, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência verificado foi de 174,81 W, para a maior velocidade do vento. Além desse valor, tem-se um segundo: 167,34 kWh (referente a segunda maior velocidade do vento). Percebe-se também que a potência do vento é 1.140,47% maior do que a potência gerada pela turbina – avaliação nos pontos onde se tem o maior valor da potência (maior velocidade do vento registrada no mês de outubro).

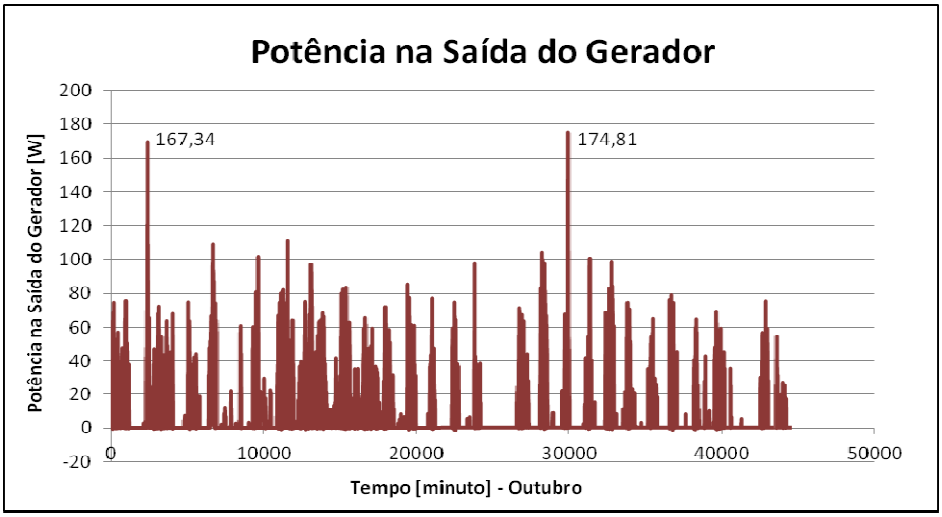


Gráfico A.50 *Potência na saída do gerador eólico durante o mês de outubro.*

O Gráfico A.51 mostra a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de energia constatado foi de 0,0146 kWh, para o maior

valor da velocidade do vento. Tem-se também que o segundo maior valor de energia verificada, para a segunda maior velocidade do vento constatada, foi de 0,0139 kWh.

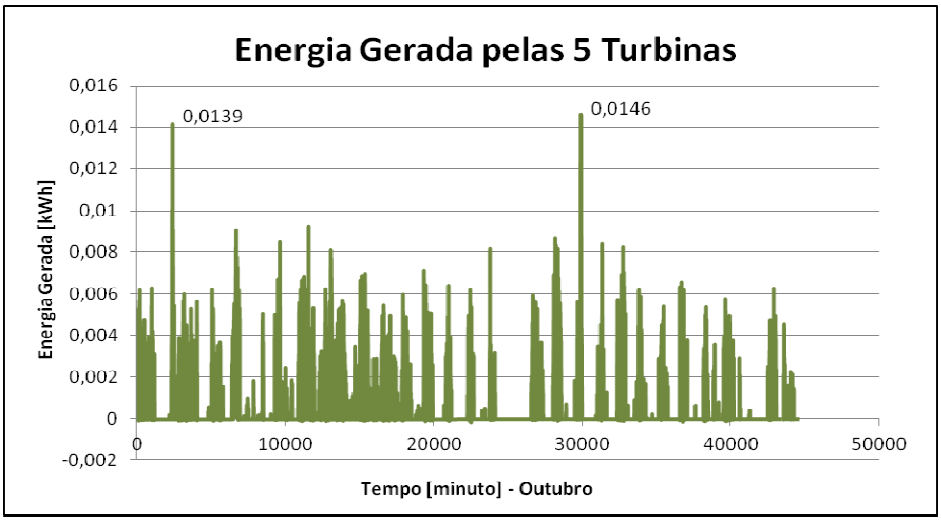


Gráfico A.51 *Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de outubro.*

O Gráfico A.52, semelhante ao Gráfico A.51, revela a energia total produzida pelas cinco turbinas, em kWh, durante o mês (a cada minuto), após as perdas nos cabos condutores e nos inversores.

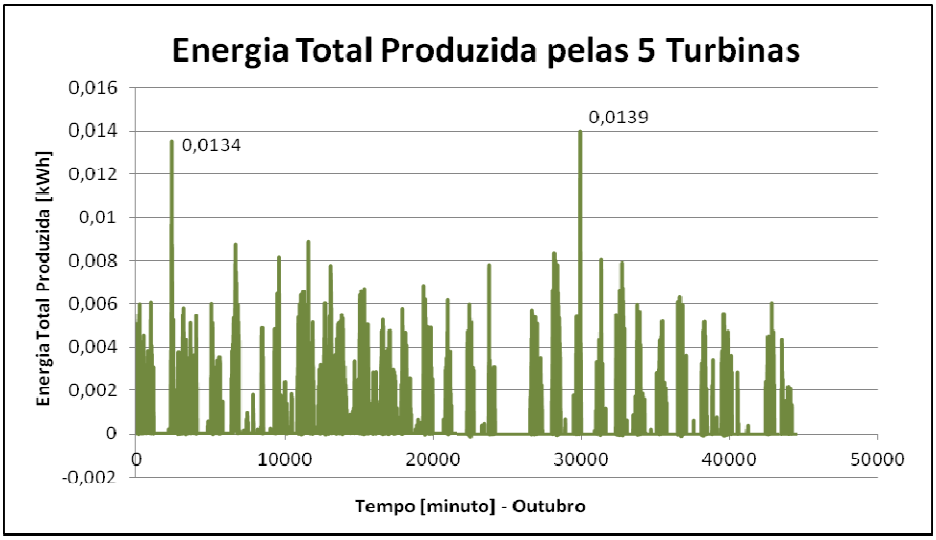


Gráfico A.52 *Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de outubro.*

O maior valor de energia verificado foi de 0,0139 kWh, para a maior velocidade do vento; e o segundo maior valor de energia foi de 0,0134 kWh, para a segunda maior velocidade.

Nota-se, por meio dos valores das energias mencionadas no início deste item A.9, que a energia total produzida pelas turbinas corresponde a 96,44% da energia gerada por elas; totalizando um percentual de 3,56% referente às perdas.

No Gráfico A.53 tem-se a Distribuição de Weibull, a qual relaciona a velocidade do vento e a sua frequência ao longo do mês. Para o mês de outubro, verifica-se que a velocidade que possui maior frequência é 1,25 m/s.

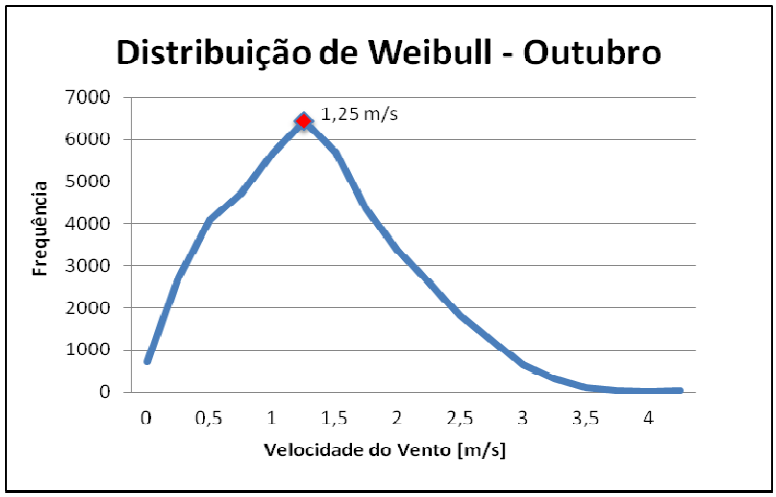
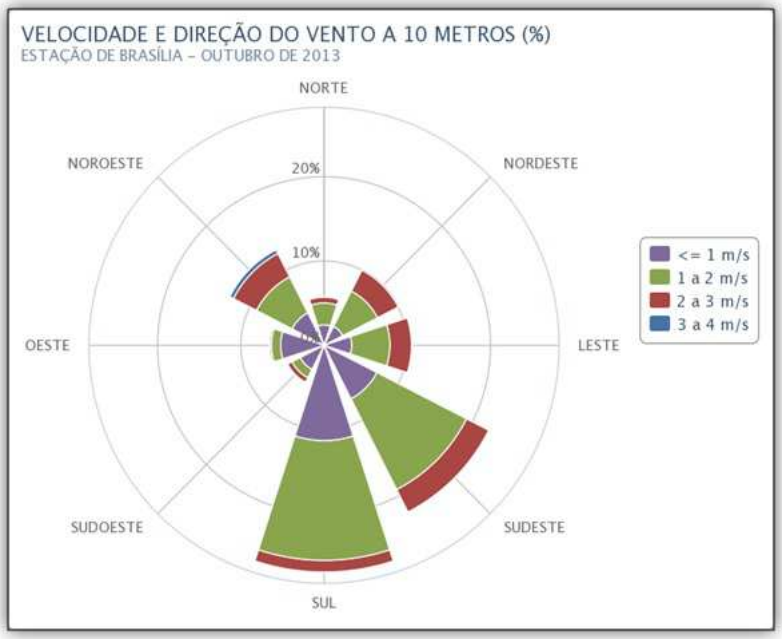


Gráfico A.53 *Distribuição de Weibull para o mês de outubro.*

O Gráfico A.54 revela as direções de incidência do vento, a 10 m de altura, e a sua velocidade durante do mês de outubro. Verifica-se que as direções predominantes são a Sul e a Sudeste e que a velocidade predominante do vento (acima de 20%) está entre 1 e 2 m/s.



Fonte: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). (modificado)

Gráfico A.54 *Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de outubro.*

A.10 MÊS DE NOVEMBRO

Para o mês de novembro, verificou-se que a velocidade média do vento foi de 1,04 m/s. Para a modelagem empregada para o SMGE, constatou-se uma geração de 12,30 kWh e, devido às perdas, obteve-se um total de 11,87 kWh. Nesse mês as direções predominantes do vento foram a Noroeste, a Sul e a Sudeste e o maior valor da velocidade do vento registrada foi de 5,391 m/s.

O Gráfico A.55 mostra a potência do vento, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência averiguado foi de 2078,14 W, para o maior valor da velocidade do vento constatada. Além dessa potência, foi verificada outra, cujo valor é bem próximo, correspondendo a 2.028,81 W (a velocidade do vento associada a essa potência é de 5,35 m/s, que corresponde a segunda maior observada no mês de novembro).

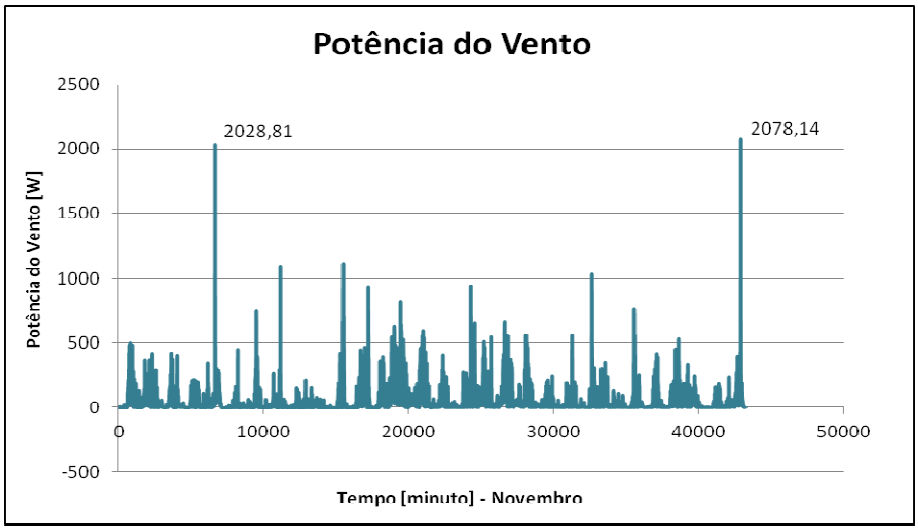


Gráfico A.55 *Potência do vento ao longo do mês de novembro.*

O Gráfico A.56 revela a potência na saída do gerador, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência verificado foi de 171,01 W, para o maior valor da velocidade do vento. Para a potência igual a 167,57 W está associada o segundo maior valor da velocidade do vento registrada. Verifica-se também que a potência do vento é 1.115,21% maior do que a potência gerada pelas turbinas eólicas (análise realizada para a maior velocidade do vento).

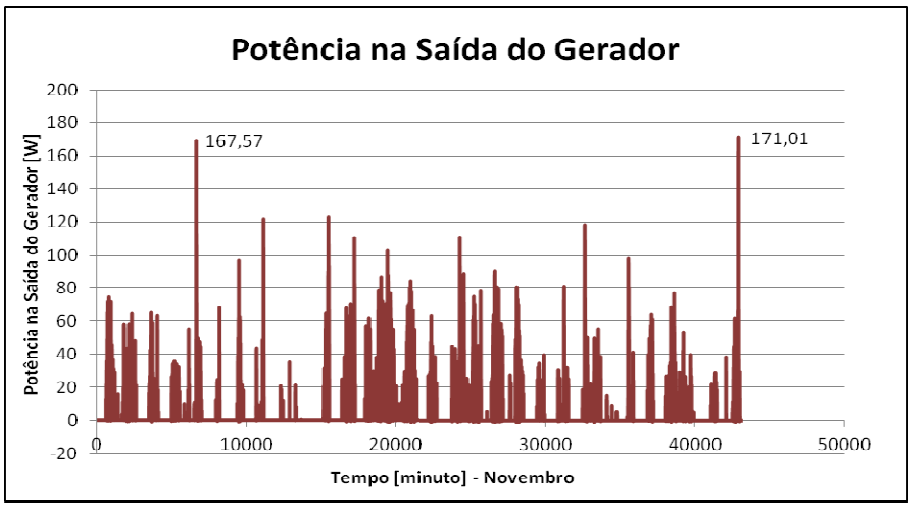


Gráfico A.56 *Potência na saída do gerador eólico durante o mês de novembro.*

O Gráfico A.57 mostra a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de energia constatado foi de 0,0143 kWh, para o maior valor da velocidade do vento.

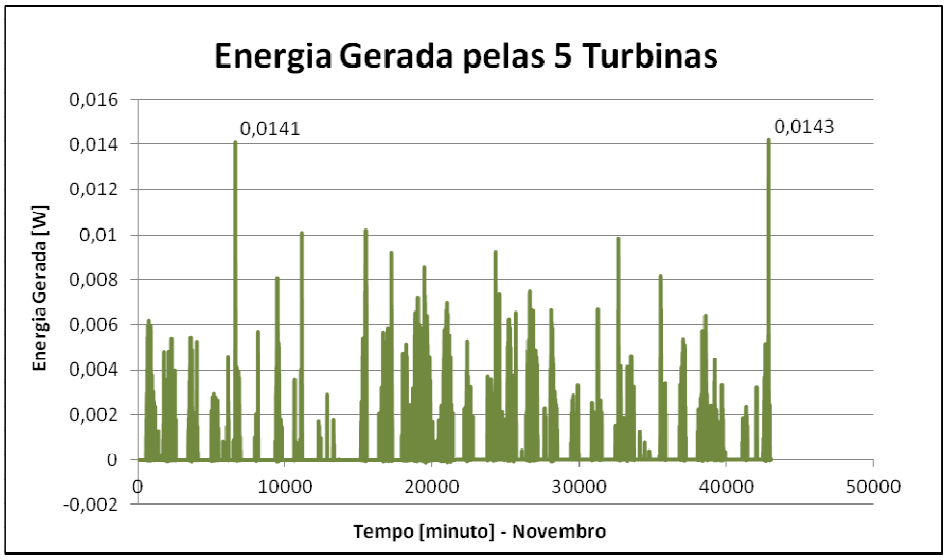


Gráfico A.57 *Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de novembro.*

Tem-se também um segundo valor de potência destacada, cujo valor é 0,0141 kWh; correspondendo ao segundo maior valor da velocidade do vento. O Gráfico A.58, semelhante ao Gráfico A.57, revela a energia total produzida pelas cinco turbinas, em kWh, durante o mês (a cada minuto), após as perdas nos cabos condutores e nos inversores. O maior valor de energia foi de 0,0137 kWh, para o maior valor da velocidade do vento, e de 0,0134 kWh para o segundo maior valor da velocidade do vento registrada. A energia total produzida corresponde a 96,44% da energia gerada pelas turbinas (de acordo com os valores ditos no início deste item A.10) e as perdas são de 3,56%.

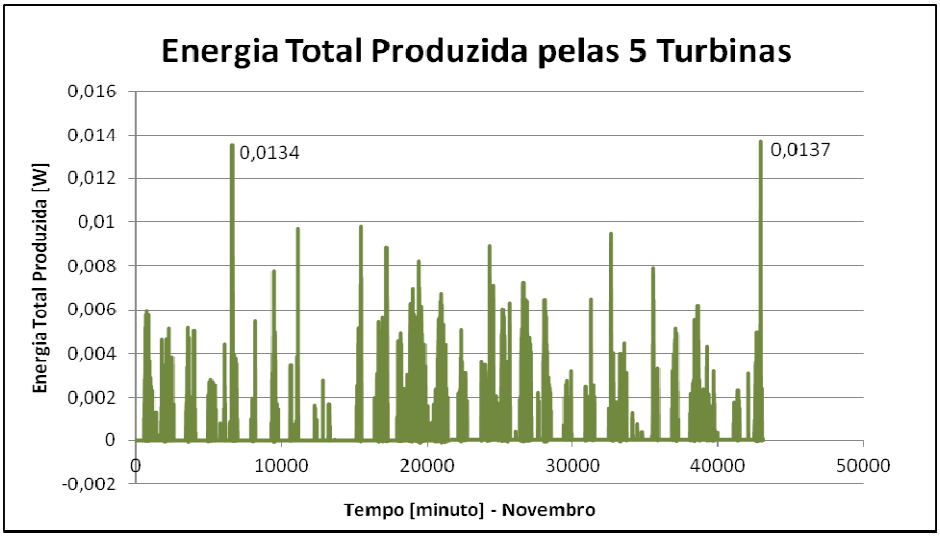


Gráfico A.58 *Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de novembro.*

No Gráfico A.59 tem-se a Distribuição de Weibull, a qual relaciona a velocidade do vento e a sua frequência ao longo do mês. Para o mês de novembro, verifica-se que a velocidade que possui maior frequência é de 0,75 m/s. O Gráfico A.60 revela as direções de incidência do vento, a 10 m de altura, e a sua velocidade durante o mês de novembro. Verifica-se que a direções predominantes são a Noroeste, a Sul e a Sudeste e que a velocidade do vento predominante (um pouco abaixo de 20%) foi entre 1 e 2 m/s.

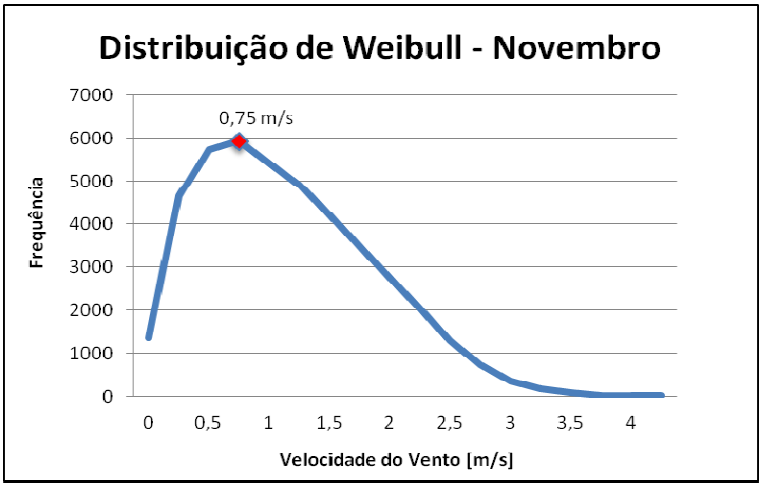
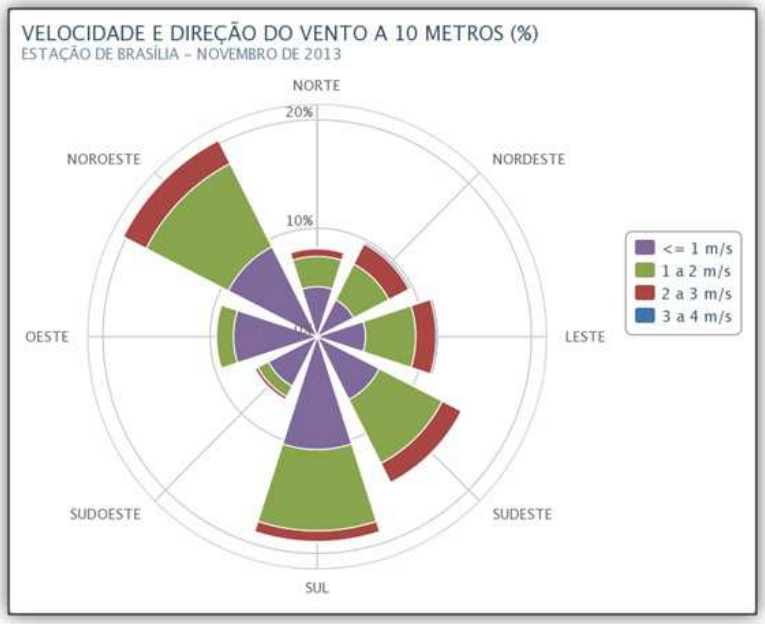


Gráfico A.59 *Distribuição de Weibull para o mês de novembro.*



Fonte: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). (modificado)

Gráfico A.60 *Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de novembro.*

A.11 MÊS DE DEZEMBRO

Para o mês de dezembro, verificou-se que a velocidade média do vento foi de 1,09 m/s. Para a modelagem empregada para o SMGE, constatou-se uma geração de 16,66 kWh e, devido às perdas, obteve-se um total de 16,07 kWh. Nesse mês a direção predominante do vento foi a Noroeste e a maior velocidade do vento verificada foi de 5,85 m/s.

O Gráfico A.61 mostra a potência do vento, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência averiguado foi de 2.648,63 W, para o maior valor da velocidade do vento.

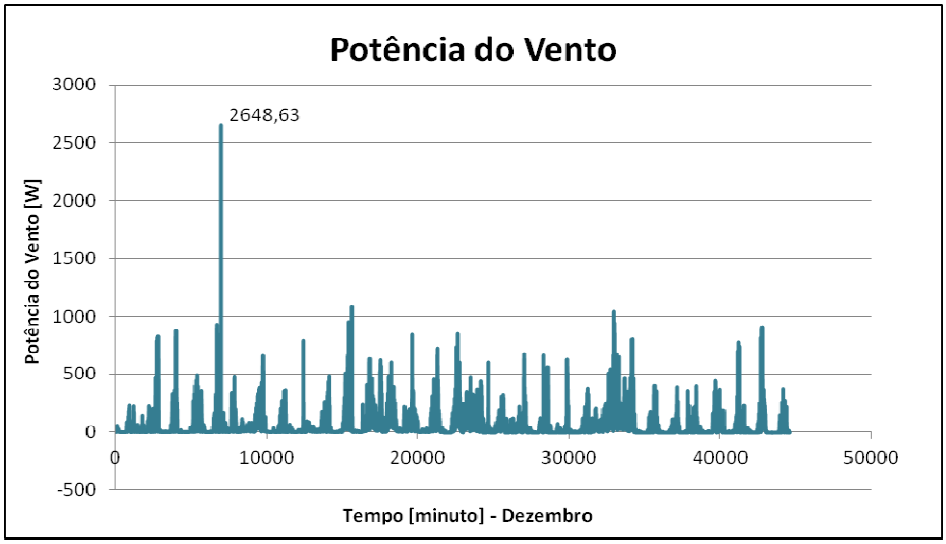


Gráfico A.61 *Potência do vento ao longo do mês de dezembro.*

O Gráfico A.62 revela a potência na saída do gerador, em W, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de potência verificado foi de 192,63 W, para a maior velocidade do vento. Constata-se que a potência do vento é 1.274,98% maior que a potência gerada pela turbina eólica, avaliado no ponto onde se tem o maior valor de potência.

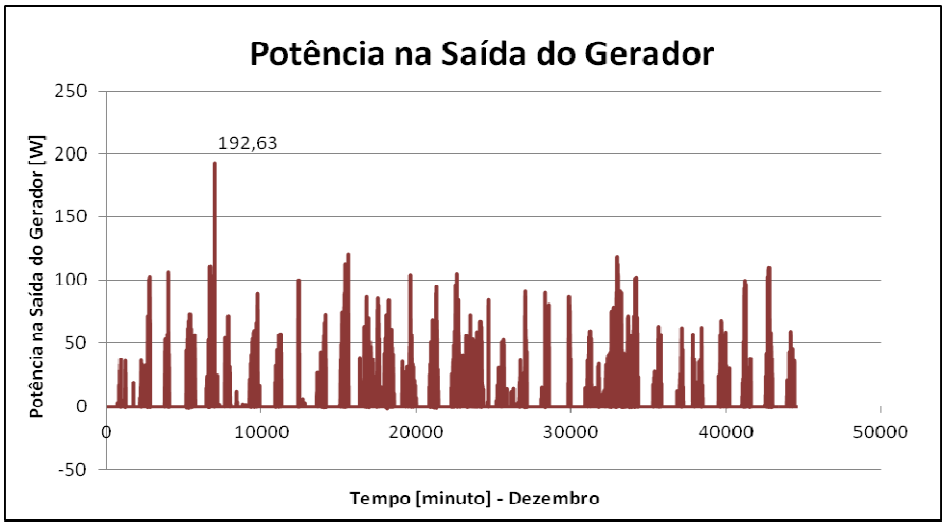


Gráfico A.62 *Potência na saída do gerador eólico durante o mês de dezembro.*

O Gráfico A.63 mostra a energia gerada pelas cinco turbinas eólicas, em kWh, durante o mês (a cada minuto). O maior valor de energia constatado foi de 0,0161 kWh, para o maior valor da velocidade do vento.

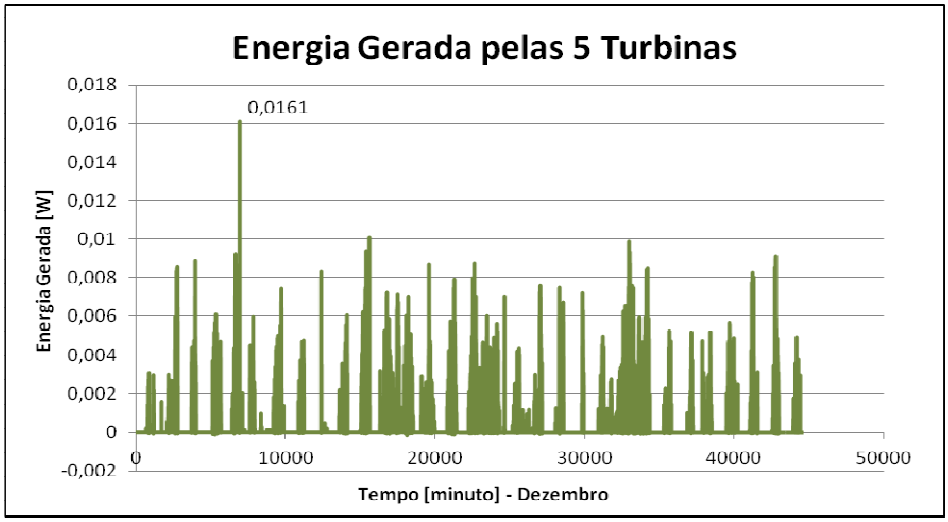


Gráfico A.63 *Energia gerada pelos cinco aerogeradores ao longo do mês de dezembro*

O Gráfico A.64, semelhante ao Gráfico A.63, revela a energia total produzida pelas cinco turbinas, em kWh, durante o mês (a cada minuto), após as perdas nos cabos condutores e nos inversores. O maior valor de energia foi de 0,0154 kWh, para a maior velocidade do vento. Observa-se também que a potência total produzida corresponde a 96,44% da energia

gerada pelas turbinas eólicas (de acordo com os valores de energia mencionados no início deste item A.11), e que as perdas correspondem a 3,56% da energia gerada.

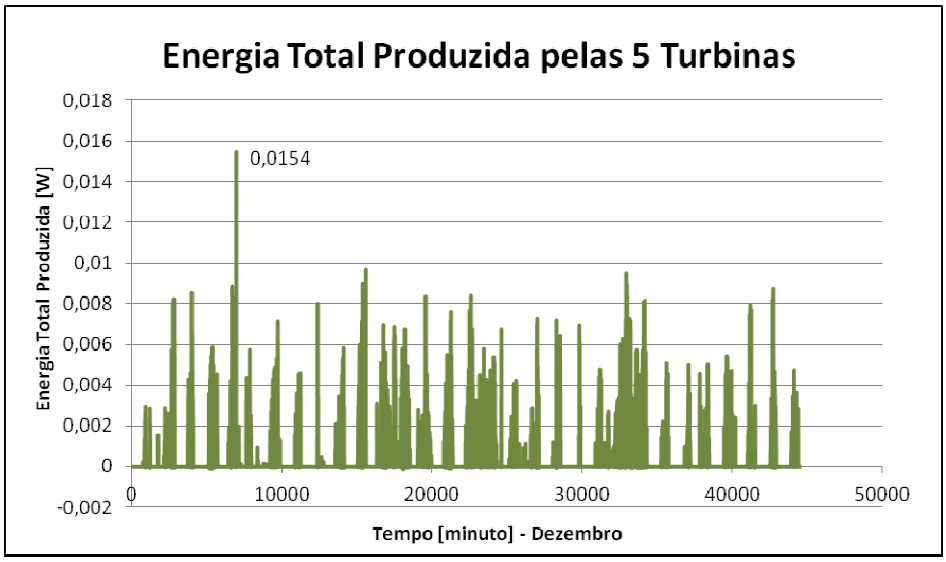


Gráfico A.64 *Energia total produzida, após as perdas, pelas cinco turbinas eólicas, durante o mês de dezembro.*

No Gráfico A.65 tem-se a Distribuição de Weibull, a qual relaciona a velocidade do vento e a sua frequência ao longo do mês. Para o mês de dezembro, verifica-se que a velocidade de 0,50 m/s é a que possuiu maior frequência.

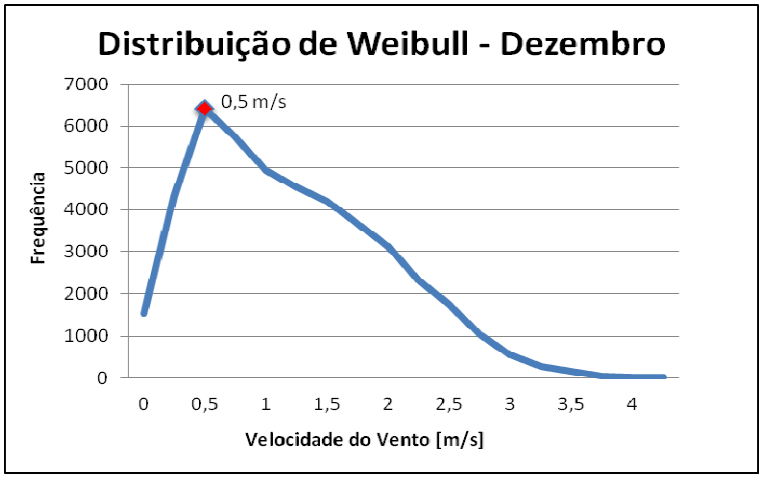
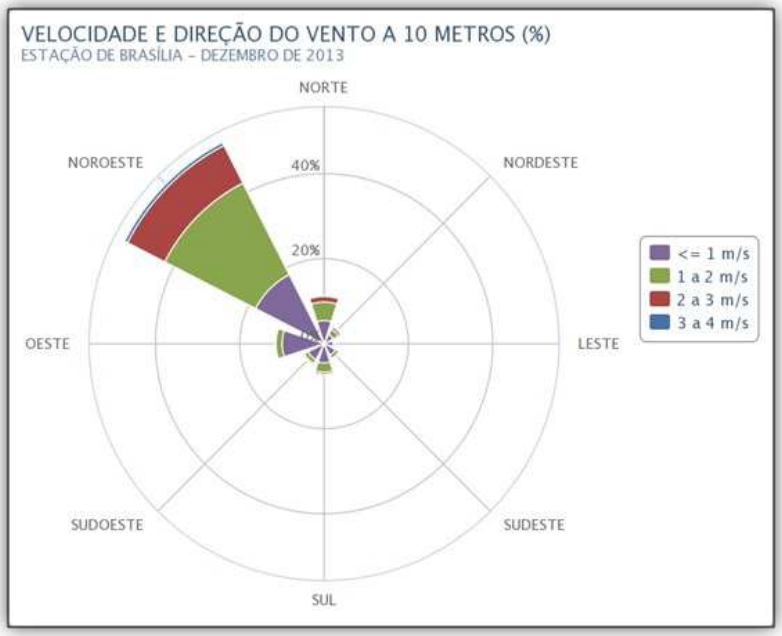


Gráfico A.65 *Distribuição de Weibull para o mês de dezembro.*

O Gráfico A.66 revela as direções de incidência do vento, a 10 m de altura, e a sua velocidade durante do mês de dezembro. Verifica-se que a direção predominante é a

Noroeste e que o valor da velocidade predominante (um pouco acima de 40%) foi entre 1 e 2 m/s.



Fonte: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). (modificado)

Gráfico A.66 *Velocidade e direção do vento a 10 m ao longo do mês de dezembro.*