



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROPOSIÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DO
APROVEITAMENTO DA ENERGIA EÓLICA EM AMBIENTE URBANO**

**DANIEL ARRAES DE ALENCAR VALENÇA
RECIFE, DEZEMBRO DE 2010**

**PROPOSIÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DO
APROVEITAMENTO DA ENERGIA EÓLICA EM AMBIENTE URBANO**

DANIEL ARRAES DE ALENCA VALENÇA

Dissertação para apresentação ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, orientada pelo Prof. Dr. Alex Maurício Araújo.

UFPE/RECIFE-PE
dvalenca@gmail.com
DEZ/2010

V1452p Valença, Daniel Arraes de Alencar.
Proposição de uma metodologia para a avaliação do aproveitamento da energia eólica em ambiente urbano / Daniel Arraes de Alencar Valença. - Recife: O Autor, 2010.
xv, 130 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof^o. Dr^o. Alex Mauricio Araújo.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2010.
Inclui Referências, Apêndice e Anexos.

1. Engenharia Mecânica. 2.Energia Eólica. 3.Ferramenta Computacional. 4.Campos de Vento. I. Araújo, Alex Mauricio (Orientador). II. Título.

621 CDD (22. ed.)

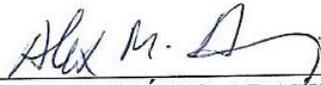
UFPE
BCTG/2011-125

“PROPOSIÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO DA ENERGIA EÓLICA EM AMBIENTE URBANO”.

DANIEL ARRAES DE ALENCAR VALENÇA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENERGIA EÓLICA
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

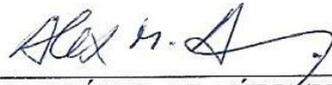


Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

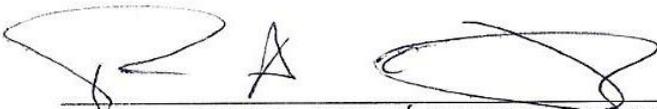


Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:



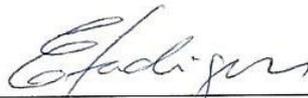
Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO (UFPE)



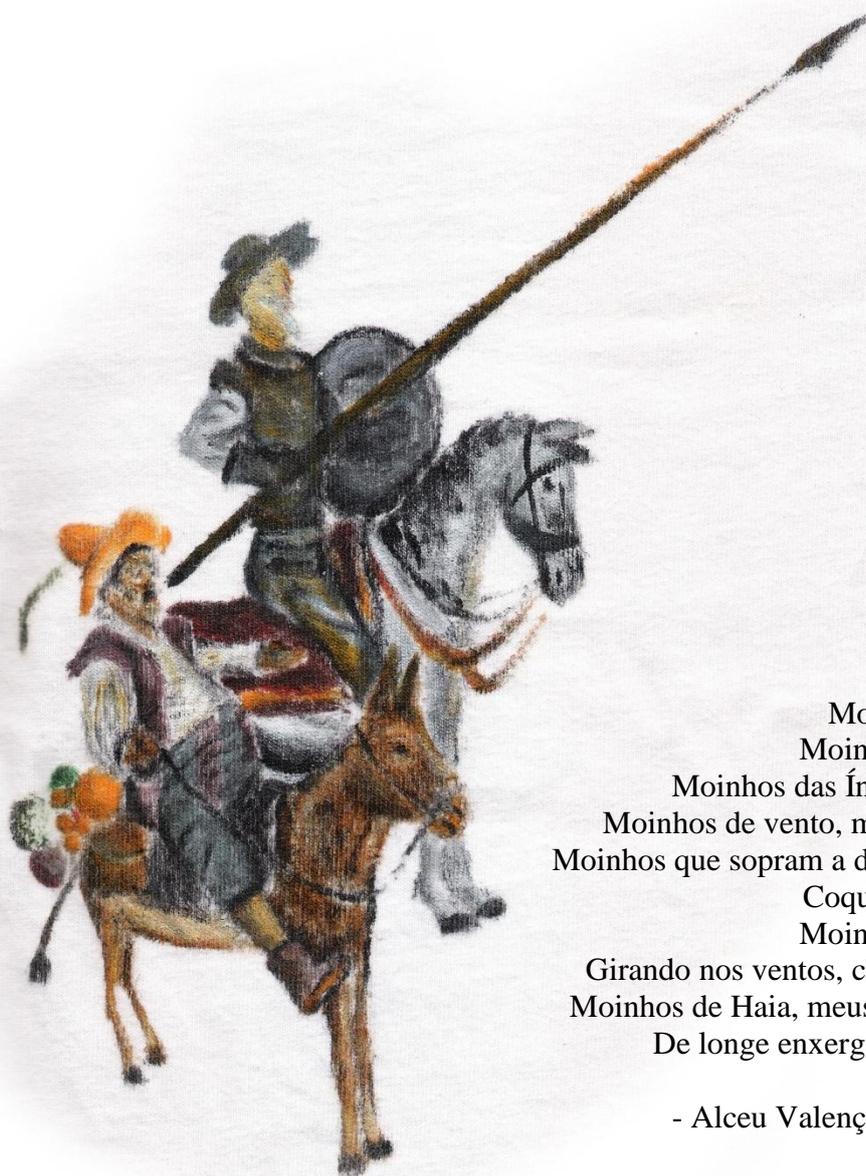
Prof. Dr. PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS (UFPE)



Prof. Dr. ARMANDO LÚCIO RAMOS DE MEDEIROS (UFPE)



Prof. Dr. ELIANE APARECIDA FARIA AMARAL FADIGAS (USP-PEA)



Moinhos, moinhos
Moinhos de Holanda
Moinhos das Índias Ocidentais
Moinhos de vento, moinhos de água
Moinhos que sopram a dor dos meus ais
Coqueiros de Olinda
Moinhos de Holanda
Girando nos ventos, chamados terrais
Moinhos de Haia, meus olhos de águia
De longe enxergam os canaviais

- Alceu Valença e Don Tronxo

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Nena e Décio Valença, por investirem até o fim nessa ideia.

Aos meus irmãos, André e Bernardo, pela matéria sobre esta pesquisa e pela camisa de Don Quixote, Sancho Pança e o moinho de vento (confecção e ideia).

Aos meus revisores Décio Valença Lúcia Lima e Oyama Douglas Queiroz.

Aos professores e mestres que tive até aqui.

À Maria Escorel e Pedro Guedes por, entre tantas outras coisas, ajudarem com a Unibase Piloto e o Autocad®.

Ao Leonardo Brito pelas dicas de como capturar as alturas dos edifícios e do endereço do site da Emporis®.

Aos meus colegas do Laboratório Didático Pedagógico de Fluidos.

Às minhas apoiadoras e incentivadoras de plantão Anna Paegle, Lúcia Lima e Maria Escorel.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a proposição de uma metodologia para avaliação do aproveitamento da energia eólica em ambiente urbano. O método proposto consiste na extração e aquisição digital de formas geométricas, alturas e volumetrias das edificações e na obtenção de padrões tridimensionais simulados dos fluxos eólicos em uma região de interesse. A implementação da proposta de metodologia ocorreu com a aplicação de ferramentas computacionais de baixo custo.

O estudo de caso escolhido para a verificação da aplicabilidade do procedimento proposto foi uma área do bairro de Boa Viagem (Recife-PE) de frente ao Parque Natural Municipal dos Manguezais Josué de Castro no intuito de avaliar a possibilidade do aproveitamento do potencial eólico em toda região.

Os resultados obtidos indicaram que as maiores edificações induzem uma diminuição nas velocidades dos ventos em cerca da metade da extensão do manguezal, havendo na outra parte, uma recuperação da velocidade dos mesmos. Em termos energéticos, esse impacto corresponderia a uma variação na densidade de energia eólica disponível no Parque dos Manguezais de aproximadamente $0,88\text{MWh/m}^2$ ao ano a 50 metros de altura.

Com relação aos campos de ventos gerados próximos às edificações, observou-se um aumento das velocidades na parte frontal e intensidade de turbulência nas vizinhanças. Para um dos edifícios avaliados, associado ao aerogerador de maior desempenho na geração elétrica, a energia produzida seria de $9,4\text{MWh/ano}$.

Palavras-chave: Engenharia Mecânica, Energia Eólica, Ferramenta Computacional, Campos de Vento.

ABSTRACT

This work proposes a methodology to assess the utilization of wind energy in the urban environment. The proposed method consists of digital extracting and acquisition of geometric shapes, heights and volume of the buildings and three-dimensional simulation of the wind flow in a region of interest. The implementation of the proposed methodology was done with the use of low cost computational tools.

The case study chosen for assessing the applicability of the proposed procedure was an area of the of Boa Viagem district (Recife-PE) in front of the mangrove called Parque Natural Municipal dos Manguezais Josué de Castro in order to evaluate the possibility of harnessing the potential wind throughout the region.

The results indicated that the largest buildings induce a decrease in wind speeds at about half the length of the mangrove and a speed recovery in the other half. In energy terms, the impact in the amount of wind energy density available in the Manguezal do Pina would represent a variation of about 0.88MWh/m² per annum at 50 meters.

In the generated wind fields, there was an increase in speeds on the front and turbulence intensity in the vicinity near the buildings. For one of the buildings, an application of the turbine with higher performance in power generation would lead to an energy production of 9.4MWh/year.

Keywords: Mechanical Engineering, Wind Energy, Computational Tools, Wind Fields.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição da potência instalada da matriz elétrica brasileira, adaptado de (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010).	16
Figura 2 - Preço do barril do petróleo, em dólares de 2008, de 1947 a agosto de 2009, adaptado de (WILLIAMS, 2010).	17
Figura 3 - Capacidade instalada de energia eólica no mundo entre 1996 e 2009, adaptado de (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2010).	19
Figura 4 - Capacidade instalada no Brasil entre os anos de 2002 e 2009, adaptado de (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2010).	20
Figura 5 - Unidades, capacidade instalada (kW), vendas (US\$ \times 10.000) de aerogeradores de pequeno porte no mundo de 2001 a 2008 nos EUA, adaptado de (AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION, 2009).	20
Figura 6 - Previsão de crescimento da capacidade instalada de aerogeradores de pequeno porte nos EUA (MW), adaptado de (AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION, 2009).	21
Figura 7 - Quantidade de aerogeradores de pequeno porte em edificações e no solo vendidos no mundo pelo Reino Unido os anos de 2005 a 2009 e previsão até 2011, retirado de (BRITISH WIND ENERGY ASSOCIATION, 2010).	22
Figura 8 - Pearl River Tower em Guangzhou na República Popular da China, fotografia de 29 de agosto de 2010. Fonte: (SKYSCRAPER PAGE, 2010).	22
Figura 9 - Ruído provocado por diversas fontes em decibéis, adaptado de (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2008).	27
Figura 10 - Causa da morte de aves relativas a atividades humanas nos EUA, adaptado de (COSTA, CASOTTI e AZEVEDO, 2009).	28
Figura 11 - Número estimado de mortes de pássaros pela geração de energia eólica, nuclear e fóssil por ano, adaptado de (SOVACOOOL, 2009).	29
Figura 12 - Posição média da Zona de Convergência Intertropical nos meses de Julho (vermelho) e Janeiro (azul). Fonte: (HALLDIN, 2006).	30
Figura 13 - Litoral Nordeste-Sudeste destacado em vermelho, adaptado de (SILVA, 2003).	31
Figura 14 - Perfil vertical do vento, adaptado de (ROHATGI, 1994).	32
Figura 15 - Esquemático do perfil vertical do vento no ambiente urbano, adaptado de (MERTENS, 2006).	34
Figura 16 - Bolha de ar movendo-se verticalmente em uma atmosfera não saturada.	34
Figura 17 - Os estados da atmosfera: (a) neutra; (b) estável; e (c) instável, adaptado de (ROHATGI, 1994).	35
Figura 18 - Zona de turbulência próxima a um edifício, adaptado de (LYSEN, 1983).	37
Figura 19 - Região de recirculação e aceleração no topo (esquerda), em detalhe e mostrando ângulo de 27° em destaque (direita), adaptado de (MERTENS, 2006).	39
Figura 20 - Aerogerador integrado no Empire States Building imaginado por Hermann Honnef. Fonte: (POPULAR SCIENCE MONTHLY, 1932).	40
Figura 21 - Bahain World Trade Center em Manama, Barém, construído em 2008 e possui três aerogeradores encapsulados pelo edifício. Fonte: (BAHRAIN WORLD TRADE CENTER, 2010).	40
Figura 22 - Fluxograma para a obtenção do aproveitamento eólico urbano.	42
Figura 23 - Fluxograma para a definição da malha padrão.	43

Figura 24 - Fluxograma para a obtenção do fluxo eólico urbano.	44
Figura 25 - Fotografia de satélite do Recife utilizada no estudo. Fonte: (DIGITAL GLOBE, 2010).	51
Figura 26 - Distorção dos edifícios em relação ao ponto nadir. Fonte: (DERMARQUI, HASEGAWA e GALO, 2008).	52
Figura 27 - Exemplo de dados de arestas coletados no edifício Saint Thomas em Boa Viagem, adaptado de (GOOGLE, 2010).	53
Figura 28 - Edifícios concluídos até 2006 ao longo de Boa Viagem com altura conhecida no site Emporis®, adaptado de (GOOGLE, 2010).	54
Figura 29 - Inclinação do plano de fotografia com relação ao objeto fotografado, adaptado de (LIN e NEVATIA, 1998).	56
Figura 30 - Localização do aerogerador de Olinda e do Parque dos Manguezais, adaptada de (GOOGLE, 2010).	57
Figura 31 - Da esquerda para direita os aerogeradores UGE-4k, GALE 5 e Westwind 5k. Fontes: (EVOLVE GREEN, 2010), (TANGARIE ALTERNATIVE POWER, 2010) e (WESTWIND WIND TURBINES, 2010).	58
Figura 32 - Curvas de potência dos aerogeradores analisados.	60
Figura 33 - Histograma do número de horas de observações derivado do método das caixas de contagem para o vento de Olinda-PE em 1998.	64
Figura 34 - Frequência da direção do vento em Olinda em 1998.	65
Figura 35 - Comparação entre as velocidades de vento de Olinda e do NCEP/NCAR mês a mês.	66
Figura 36 - Área de estudo com o local onde estão os edifícios escolhidos delimitada pelas linhas vermelhas.	66
Figura 37 - Dimensões horizontal e vertical em pixels e total em metros da pista do Aeroclube.	68
Figura 38 - Histograma das alturas dos edifícios de Boa Viagem.	70
Figura 39 - Imagem da Unibase Piloto para o Edifício Andalucia e o Bloco Jatinã de Baixo com os valores da medição em metros.	70
Figura 40 - Imagem do Google Maps® para o Edifício Andalucia e o Bloco Jatinã de Baixo com valores das medições horizontal e vertical em pixels.	71
Figura 41 - Formas (2D) dos edifícios de Boa Viagem digitalizados com escala de altura.	72
Figura 42 - Vista aérea do Parque dos Manguezais e da volumetria tridimensional das edificações em seu entorno de leste a oeste.	72
Figura 43 - Fotografia aérea da área do Parque dos Manguezais e das edificações em seu entorno de leste a oeste. Fonte: (BRAGA, SELVA e JUNIOR, 2008).	73
Figura 44 - Mapas de rugosidades da região de Boa Viagem para o cenário atual e para a possibilidade de que não houvesse edifícios.	74
Figura 45 - Média de horas mensais de insolação do Recife no período de 1961 a 1990, adaptado de (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010).	74
Figura 46 - Delimitações da área de estudo para a simulação geral.	76
Figura 47 - Simulação da velocidade (esquerda) e intensidade de turbulência (direita) do vento com edifícios para a malha de 8x8 a 50m.	78
Figura 48 - Formação de um cânion artificial.	79
Figura 49 - Simulações da velocidade e intensidade de turbulência do vento sem edifícios para a malha de 8x8 a 50m.	80
Figura 50 - Delimitações da área de estudo para a simulação dos dados NCEP/NCAR.	82
Figura 51 - Simulações para os dados do NCEP/NCAR para Outubro em condições atmosféricas neutra (esquerda) e pouco instável (direita).	84

Figura 52 - Velocidades de vento máximas para os dados do NCEP/NCAR a 10m e extrapolado para 50m e as velocidades máximas obtidas pela simulação para condições atmosféricas neutra e pouco instável.	85
Figura 53 - Delimitações da área de estudo para a simulação dos dados de Olinda.	86
Figura 54 - Simulação para velocidade de vento com os dados de Olinda para ventos de 6m/s.	87
Figura 55 - Simulação em corte vertical em cinco dos maiores edifícios da região de estudo.	88
Figura 56 - Vista tridimensional de cinco dos maiores edifícios de Boa Viagem.	88
Figura 57 - Resultado da simulação para turbulência com os dados de Olinda para ventos de 6m/s.	88
Figura 58 - Simulação com vetores representando as velocidades e direções do vento.	89
Figura 59 - Aerogerador de eixo vertical de Sistan Basin na fronteira entre Irã e Afeganistão. Fonte: (MÜLLER, JENTSCH e STODDART, 2008).	105
Figura 60 - Balão aerogerador TWIND. Fonte: (ZANETTI, 2010).	106
Figura 61 - Coeficiente de potência pela razão de velocidade de ponta de pá de diversos aerogeradores, adaptado de (PASCUAL, 1998).	110
Figura 62 - Aerogerador encapsulado produzido pela Marquiss Wind Power (D'ESTRIES, 2008).	112
Figura 63 - Aerogerador Aerotecture instalado no topo do International Brotherhood of Electrical Workers (IBEW). Fonte: (AEROTECTURE INTERNACIONAL INC., 2010).	113
Figura 64 - Simulação da velocidade do vento (esquerda) e intensidade de turbulência (direita) com edifícios para a malha de 50x50.	118
Figura 65 - Simulação da velocidade do vento (esquerda) e intensidade de turbulência (direita) com edifícios para a malha de 30x30.	118
Figura 66 - Simulação da velocidade do vento (esquerda) e intensidade de turbulência (direita) com edifícios para a malha de 20x20.	119
Figura 67 - Simulação da velocidade do vento (esquerda) e intensidade de turbulência (direita) com edifícios para a malha de 14x14.	119
Figura 68 - Simulação da velocidade do vento (esquerda) e intensidade de turbulência (direita) com edifícios para a malha de 10x10.	119
Figura 69 - Simulação NCEP/NCAR para Janeiro com condições atmosféricas neutra (esquerda) e instável (direita).	120
Figura 70 - Simulação NCEP/NCAR para Fevereiro (esquerda) e Março (direita) com condição atmosférica neutra.	120
Figura 71 - Simulação NCEP/NCAR para Abril (esquerda) e Maio (direita) com condição atmosférica neutra.	121
Figura 72 - Simulação NCEP/NCAR para Junho (esquerda) e Julho (direita) com condição atmosférica neutra.	121
Figura 73 - Simulação NCEP/NCAR para Agosto (esquerda) e Setembro (direita) com condição atmosférica neutra.	121
Figura 74 - Simulação NCEP/NCAR para Novembro com condições atmosféricas neutra (esquerda) e instável (direita).	122
Figura 75 - Simulação NCEP/NCAR para Dezembro com condições atmosféricas neutra (esquerda) e instável (direita).	122
Figura 76 - Missão Topográfica Radar Shuttle da zona SC-25-V-A de Pernambuco com área de estudo destacada com círculo vermelho.	124
Figura 77 - Normais Climatológicas dos meses de Janeiro (esquerda) e Fevereiro (direita). Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)	125

Figura 78 - Normais Climatológicas dos meses de Março (esquerda) e Abril (direita). Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)	125
Figura 79 - Normais Climatológicas dos meses de Maio (esquerda) e Junho (direita). Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)	125
Figura 80 - Normais Climatológicas dos meses de Julho (esquerda) e Agosto (direita). Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)	126
Figura 81 - Normais Climatológicas dos meses de Setembro (esquerda) e Outubro (direita). Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)	126
Figura 82 - Normais Climatológicas dos meses de Novembro (esquerda) e Dezembro (direita). Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)	126
Figura 83 - Legenda de cores das Normais Climatológicas. Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)	126
Figura 84 - Matéria da revista Ciência Hoje de março de 2011. Fonte: (PEREIRA, 2011)	127
Figura 85 - Matéria do Jornal do Commercio de 09/01/2011. Fonte: (ARAÚJO, 2011)	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Impacto ambiental de diferentes fontes de energia, adaptado de (AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION, 2009).	29
Tabela 2 - Características dos recursos eólicos do Litoral Nordeste-Sudeste, adaptado de (SILVA, 2003).	32
Tabela 3 - Valores aproximados dos comprimentos característico de rugosidade de superfícies e expoente da lei logarítmica para diferentes terrenos, adaptado de (ROHATGI, 1994).	33
Tabela 4 - Correlação entre a classificação da estabilidade atmosférica de Pasquill e o gradiente vertical de temperatura, adaptado de (MOREIRA, TIRABASSI e MARCELO, 2008).	35
Tabela 5 - Relação entre o estado atmosférico e o clima, adaptado de (CHEREMISINOFF, 2002).	36
Tabela 6 - Características da fotografia de satélite do Recife utilizada no estudo, adaptado de (DIGITAL GLOBE, 2007).	52
Tabela 7 - Informações sobre os satélites, alturas e fabricantes utilizados nas imagens do Google Maps® e Google Earth® (DIGITAL GLOBE, 2010) e (GEOEYE, 2010).	53
Tabela 8 - Edifícios ao longo de Boa Viagem e Pina concluídos até 2006 com altura conhecida no site Emporis®.	54
Tabela 9 - Características dos aerogeradores UGE-4k (EVOLVE GREEN, 2010), GALE 5 (TANGARIE ALTERNATIVE POWER, 2010) e Westwind 5k (WESTWIND WIND TURBINES, 2010).	59
Tabela 10 - Média mensal da direção e velocidade do vento para o Recife no período de 1948 a 2004, dados adaptados do (KALNAY, KANAMITSU, <i>et al.</i> , 1995).	62
Tabela 11 - Características do vento de Olinda em 1998.	63
Tabela 12 - Intervalo de velocidades de vento e número de ocorrência em horas para Olinda-PE em 1998.	64
Tabela 13 - Delimitações da região de estudo em coordenadas UTM.	67
Tabela 14 - Projeções horizontais e verticais, alturas (hipotenusas) e ângulos dos edifícios de altura conhecida em Boa Viagem.	67
Tabela 15 - Altura dos edifícios de Boa Viagem, cateto paralelo medido (em pixels) e fator de proporcionalidade.	69
Tabela 16 - Características dos edifícios de Boa Viagem e suas alturas medidas (em pixels) e estimadas (em metros) e o erro da medição de acordo com o valor conhecido, adaptado de (EMPORIS, 2010).	69
Tabela 17 - Resumo dos valores obtidos para o topo dos edifícios Jatinã de Baixo e Edifício Andalucia.	71
Tabela 18 - Rugosidades do terreno na área de estudo.	73
Tabela 19 - Média mensal do nível de nebulosidade de Pernambuco para o período de 1961-1990 através de normais climatológicos.	75
Tabela 20 - Condição de estabilidade atmosférica mensal nos períodos diurno e noturno para o Recife.	75
Tabela 21 - Delimitações da região de cálculo em coordenadas UTM.	76
Tabela 22 - Parâmetros de convergência.	76
Tabela 23 - Coordenadas UTM da estação anemométrica da média anual.	77

Tabela 24 - Correlação entre a estabilidade atmosférica e os valores de simulação.	77
Tabela 25 - Parâmetros do domínio do vento.	77
Tabela 26 - Quantidade de nós de simulação e velocidades de vento com suas respectivas coordenadas UTM para as diversas malhas a 50m.	78
Tabela 27 - Parâmetros alterados para a simulação sem os edifícios.	80
Tabela 28 - Comparação entre as velocidades de vento nas simulações com e sem edifícios a 50m.	80
Tabela 29 - Comparação entre a intensidade de turbulência do vento nas simulações com e sem edifícios a 50m.	81
Tabela 30 - Delimitações da região de cálculo para os dados NCEP/NCAR em coordenadas UTM.	82
Tabela 31 - Velocidades máxima e mínima de vento para os edifícios de Boa Viagem para os dados NCEP/NCAR com condição atmosférica neutra.	83
Tabela 32 - Velocidades máxima e mínima de vento para os edifícios de Boa Viagem para os dados NCEP/NCAR com condição atmosférica instável nos meses de Outubro a Janeiro.	83
Tabela 33 - Velocidades máxima e mínima de vento para os edifícios de Boa Viagem para os dados NCEP/NCAR com condição atmosférica neutra, desconsiderando região de simulação próxima as fronteiras da simulação.	84
Tabela 34 - Velocidades máxima e mínima de vento para os edifícios de Boa Viagem para os dados NCEP/NCAR com condição atmosférica instável nos meses de Outubro a Janeiro, desconsiderando região de simulação próxima as fronteiras da simulação.	85
Tabela 35 - Delimitações da região de cálculo para os dados de Olinda em coordenadas UTM.	86
Tabela 36 - Coordenadas UTM das estações anemométricas dos dados NCEP/NCAR.	86
Tabela 37 - Pontos do corte vertical da simulação para os dados de Olinda.	87
Tabela 38 - Coordenadas de instalação do aerogerador.	90
Tabela 39 - Velocidades de vento para os pontos de instalação do aerogerador correlacionada à velocidade original.	90
Tabela 40 - Intervalo de velocidades de vento e número de ocorrência em horas para Olinda, Edifício Tereza Novaes e Edifício Casa Alta.	91
Tabela 41 - Energia produzida pelos aerogeradores UGE-4k, GALE 5 e Westwind 5k em Olinda, no Edifício Tereza Novaes e no Edifício Casa Alta.	91
Tabela 42 - Sumário das características das diferenças mais importantes entre os aerogeradores Rotor-H, Darrieus e de eixo horizontal, adaptado de (ERIKSSON, BERNHOFF e LEIJON, 2006).	107
Tabela 43 - Valores do Coeficiente de Potência Máximo para as diferentes forças de tração das turbinas eólicas, adaptado de (MERTENS, 2006).	113
Tabela 44 - Número denominado e alturas em pixel e metros dos edifícios de Boa Viagem - Parte 1	114
Tabela 45 - Número denominado e alturas em pixel e metros dos edifícios de Boa Viagem - Parte 2	115
Tabela 46 - Ocorrências (em horas) das velocidades de vento divididas pelos setores de direção do vento - Parte 1.	116
Tabela 47 - Ocorrências (em horas) das velocidades de vento divididas pelos setores de direção do vento - Parte 2.	116
Tabela 48 - Tabela de potência para os aerogeradores UGE-4k, GALE 5 e Westwind 5k.	117
Tabela 49 - Altura real em metros e em pixels e a altura calculada e erro para os Edifícios de Boa Viagem pela equação (13).	123

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	xii
Sumário	xiv
1 Introdução	16
1.1 Justificativa do trabalho	23
1.2 Objetivos do trabalho	23
1.3 Estrutura da dissertação	24
2 Revisão bibliográfica	25
2.1 Ambiente rural e ambiente urbano	25
2.1.1 Condições do vento	26
2.1.2 Poluição sonora	26
2.1.3 Poluição visual	27
2.1.4 Impacto ambiental	28
2.1.5 Segurança	29
2.1.6 Interferências eletromagnéticas	30
2.2 O Vento	30
2.2.1 Litoral Nordeste-Sudeste	31
2.2.2 Perfil vertical do vento	32
2.2.3 Estabilidade atmosférica	34
2.2.4 Turbulência e fadiga	37
2.2.5 Aceleração no topo	38
2.3 Aerogerador integrado ao edifício	39
3 Metodologia	42
3.1 Definição da malha padrão	42
3.2 Fluxo eólico urbano	44
3.2.1 Vento não perturbado	44
3.2.2 Estabilidade atmosférica	45
3.2.3 Rugosidade urbana	45
3.3 Curva de potência dos aerogeradores	47
4 Estudo de caso	48
4.1 Ferramentas de análise	48
4.1.1 Fotografia de satélite - Google Maps® e Google Earth®	48
4.1.2 Base de dados de altura dos edifícios - Emporis®	48
4.1.3 Desenho assistido por computador - Unibase Piloto e Google Sketchup®	49
4.1.4 Sistema de informação geográfica - Global Mapper®	49
4.1.5 Fluidodinâmica - Windstation®	49
4.1.6 Extração de dados de curvas – G3data®	50
4.2 Local de estudo	50
4.3 Volumetria dos edifícios (3D)	51
4.3.1 Extração da altura dos edifícios	52
4.3.2 Extração das formas (2D) dos edifícios	55
4.4 Dados de vento	57

4.5	Dados de aerogeradores	58
4.6	Aplicação da metodologia ao estudo de caso	60
5	Resultados e análises	62
5.1	Dados do NCAR/NCEP	62
5.2	Dados de Olinda	63
5.3	Comparação entre os dados de vento	65
5.4	Delimitações da área de estudo	66
5.5	Altura dos edifícios	67
5.6	Formas (2D) dos edifícios	70
5.7	Volumetria das Edificações (3D)	72
5.8	Mapa de rugosidades	73
5.9	Estabilidade atmosférica	74
5.10	Simulações dos fluxos eólicos	76
5.10.1	Ajuste da malha de simulação	77
5.10.1.1	Simulação sem edifícios	79
5.10.1.2	Análise do impacto dos edifícios na região	80
5.10.1.3	Energia disponível no Parque dos Manguezais	81
5.10.2	Dados do NCEP/NCAR	82
5.10.3	Dados de Olinda	86
5.11	Geração eólica nos edifícios	89
6	Conclusões	92
6.1	Propostas de trabalhos futuros	94
	Referências bibliográficas	95
	APÊNDICE A– Mais sobre aerogeradores	105
a	Eixo horizontal	106
b	Eixo vertical	106
c	Comparação entre aerogeradores de eixo horizontal e vertical	107
i	Mecanismo de direcionamento	108
ii	Gerador e caixa de marchas	108
iii	Pás	109
iv	Controle de potência	109
v	Coeficiente de potência	110
vi	Ruído e impacto ambiental	111
vii	Vibrações	111
d	Encapsulado	111
e	Força de arrasto e de sustentação	112
	APÊNDICE B– Altura dos prédios de Boa Viagem	114
	APÊNDICE C– Divisão dos dados de vento de Olinda	116
	APÊNDICE D– Curva de potência dos aerogeradores	117
	APÊNDICE E– Simulações: Ajuste de malha	118
	APÊNDICE F– Simulações: Dados do NCEP/NCAR	120
	APÊNDICE G– Cálculo alternativo das alturas dos edifícios de Lin e Nevatia	123
	ANEXO A– Imagem da SRTM	124
	ANEXO B– Normais climatológicas	125
	ANEXO C– Repercussão da Dissertação	127
a	Matéria na Revista Ciência Hoje	127
b	Matéria no Jornal do Commercio	127
c	Matéria de André Valença	129

1 INTRODUÇÃO

Até a década passada, mais de 90% da potência instalada no Brasil provinha de fonte hidrelétrica. Hoje, o percentual é da ordem de 70% (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010), Figura 1, o que mostra uma diversificação da matriz elétrica brasileira, não apenas pelo intuito de se ter uma maior variedade de fontes de energia, mas também pela exaustão do sistema das grandes hidrelétricas.

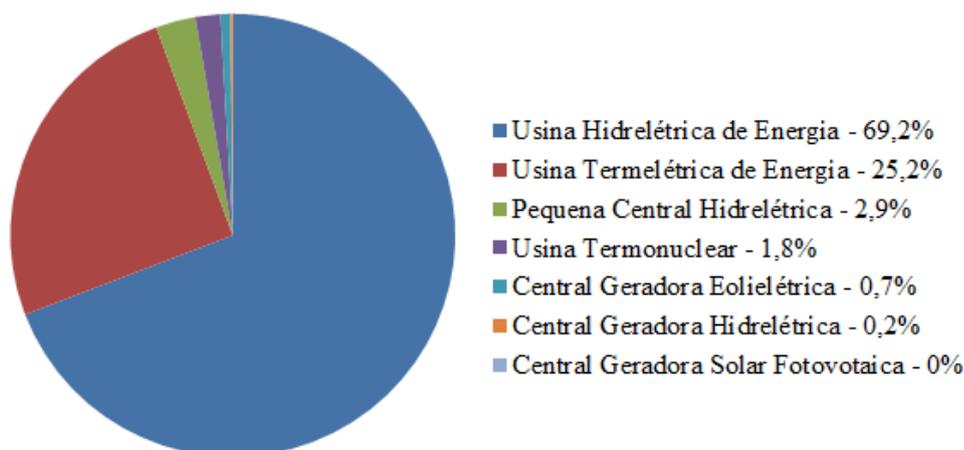


Figura 1 - Composição da potência instalada da matriz elétrica brasileira, adaptado de (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010).

Apesar de possuir potencial hidráulico ainda a ser explorado, principalmente na região Amazônica – que possui 50% do potencial hidrelétrico nacional, se contar apenas os rios Amazonas e Tocantins (ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, 2005) –, este local é pouco atrativo em face de estar localizado em zonas de proteção ambiental e devido às grandes perdas no transporte desta energia. Alguns investimentos começam a ser feitos nessa região, a exemplo das hidrelétricas do rio Madeira (Jirau e Santo Antônio) e do rio Xingu (Belo Monte), no sentido de atender o crescimento da demanda por energia elétrica, também impulsionada pelo crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) nacional.

Desse modo, a matriz energética evoluiu para a inclusão de novas fontes de energia, principalmente das termoelétricas. Este tipo de energia é relativamente barato, porém produz muita poluição, sobretudo nas termoelétricas movidas a carvão mineral. As outras duas formas de termoelétricas mais comuns, movidas a gás natural e óleo diesel, possuem matérias-primas de preço volátil, sendo o último dependente da variabilidade de preço do barril de petróleo – que valeu desde US\$2,50 em 1948 até US\$140,00 em meados de junho 2008 (MAIA, 2009), vide Figura 2.

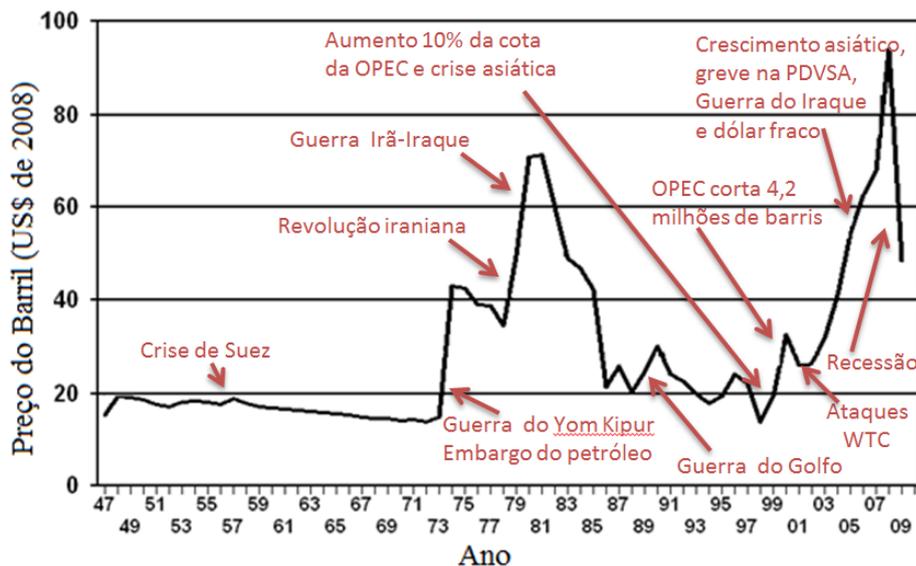


Figura 2 - Preço do barril do petróleo, em dólares de 2008, de 1947 a agosto de 2009, adaptado de (WILLIAMS, 2010).

Devido aos problemas com as principais fontes de energia no Brasil, somado à discrepância entre o crescimento da demanda energética (de 165%) e da capacidade instalada de geração (de 122%) entre os anos 1980 e 2000 (DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS, 2001), aumentou a vulnerabilidade do sistema, principalmente quando associado a anos de pouca chuva – o que ocasionou o racionamento em 2001. Estima-se que o crescimento da economia brasileira demande um aumento entre 4 a 5 mil megawatts por ano de capacidade nova instalada (AGÊNCIA BRASIL, 2010). Este crescimento do consumo de energia no país exigiu a retomada dos investimentos nesta área. Ações como a abertura do mercado de geração elétrica para o setor privado propiciaram o aumento da oferta de energia elétrica no país, porém ainda é possível racionamento de energia para os próximos anos (OINEGUE, 2008) dependendo do crescimento do PIB e da oferta de energia acima da demanda. O esgotamento das fontes usuais, junto à necessidade de um crescimento sustentável, minimizando o impacto ambiental gerado pela ação do homem, induziu à busca por novas fontes – nas quais se enquadram as fontes alternativas de energia –, com o incentivo governamental através de programas como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa).

No Brasil, diversos projetos de leis estão em discussão no Congresso Nacional que tratam do desenvolvimento das fontes alternativas de energia, dentre elas o Projeto de Lei do Senado Nº 311 de 2009, que no Artigo 8º propõe que a geração de energia alternativa, “[...] atendidas as exigências técnicas e legais, poderá ser desenvolvida de forma independente por qualquer pessoa física ou jurídica, podendo utilizar ou comercializar livremente sua produção.” (COLLOR, 2009).

O texto indica a possibilidade de consumidores residenciais de energia elétrica virarem credores das distribuidoras de eletricidade. Para isso, terão que produzir sua própria energia – por exemplo, utilizando painéis solares ou aerogeradores de pequeno porte – e vender o excedente para a rede. Este modelo de geração de energia, microcentrais de geração distribuída, já vem sendo amplamente utilizado em países europeus. A obrigação de comprar toda a energia inserida na rede proveniente deste tipo de centrais consta no Parágrafo 1º do mesmo Artigo:

§ 1o As empresas distribuidoras de energia elétrica deverão priorizar a aquisição de energia limpa dos referidos produtores independentes, acrescentando a energia produzida ao seu potencial energético, remunerando não menos do que paga pela energia de outras fontes. (COLLOR, 2009).

Leis similares a estas já são adotadas em alguns países europeus. O Congresso português aprovou Decreto-Lei que vem incentivar a produção descentralizada de eletricidade em baixa tensão por particulares, criando condições para a produção de mais eletricidade em baixa tensão, aumentando automaticamente a oferta de energia do país em 25MW ao ano (PORTUGAL, 2010).

Países como a Inglaterra vêm adotando o conceito de edifícios sustentáveis com metas de emissões baixas ou nulas de gás carbono (MERTENS, 2006). Estes edifícios contemplam diversas características para atender tais metas, como eficiência energética e produção própria de energia. Neste último, as fontes de energia utilizadas geralmente são a eólica e a solar. Atualmente, os valores de produção de energia solar-fotovoltaica são proibitivos, o contrário acontecendo com a solar-térmica, que no caso de edifícios é utilizada para o aquecimento d'água.

Apontada como uma energia cuja geração é de baixo impacto ambiental, a energia eólica permite a utilização conectada à rede ou em locais remotos – onde os custos de transmissão são altos –, a extração em terra e em alto mar, e ainda a ocupação concomitante do solo para a agricultura sem perigo para as atividades agropecuárias (COSTA, CASOTTI e AZEVEDO, 2009). Dentre essas e outras vantagens, a energia eólica desempenha o papel principal nas fontes alternativas para a geração de energia elétrica. Entre 2006 e 2009, a capacidade instalada de energia eólica no mundo cresceu 114%, Figura 3.

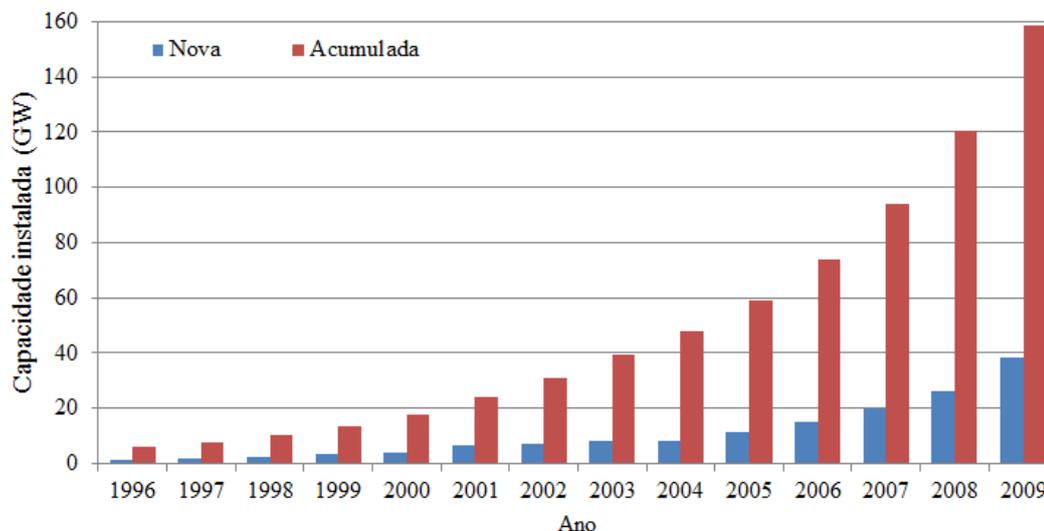


Figura 3 - Capacidade instalada de energia eólica no mundo entre 1996 e 2009, adaptado de (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2010).

São fatores limitantes para a utilização das fontes de energia eólica a sazonalidade, inconstância e a natureza estocástica dos ventos, por isso não se pode descartar a necessidade de outras fontes de energia. Portanto, deve-se compreender a energia eólica como uma fonte coexistente e complementar às demais disponíveis e as condições adversas dos ventos não podem ser consideradas uma inviabilizadora da expansão das matrizes eólicas (COSTA, CASOTTI e AZEVEDO, 2009).

No Brasil, o custo logístico de implantação dos projetos – devido às más condições das estradas, por exemplo – é o maior fator inviabilizador dessa fonte no país. Neste primeiro momento fica explícito que a busca de novas fontes, mais limpas e renováveis – porém, usualmente mais caras –, nem sempre se dará naturalmente pelo mercado. Então, políticas de regulação e incentivos serão decisivas para a implantação das fontes renováveis como geradora de energia viável e competitiva no mercado (DANTAS e LEITE, 2009). Essa política de incentivos das fontes energéticas está em implantação no Brasil, com o Proinfa, citado anteriormente. Isso está impactando diretamente a energia eólica, que apresentou um crescimento de 156% entre 2006 e 2009, Figura 4, acima do crescimento mundial para o mesmo período.

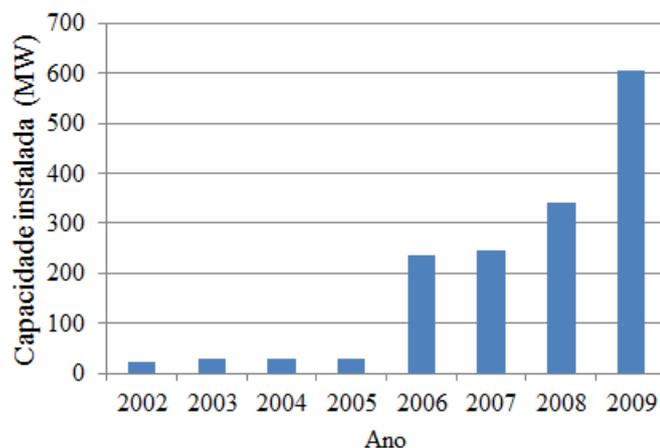


Figura 4 - Capacidade instalada no Brasil entre os anos de 2002 e 2009, adaptado de (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2010).

Um estudo do mercado americano para aerogeradores de pequeno porte mostrou que este segmento apresentou um crescimento de 73% nas vendas, de 78% na capacidade instalada (em kW) e de 14% no número de unidades vendidas entre os anos de 2007 e 2008 (AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION, 2009), conforme Figura 5.

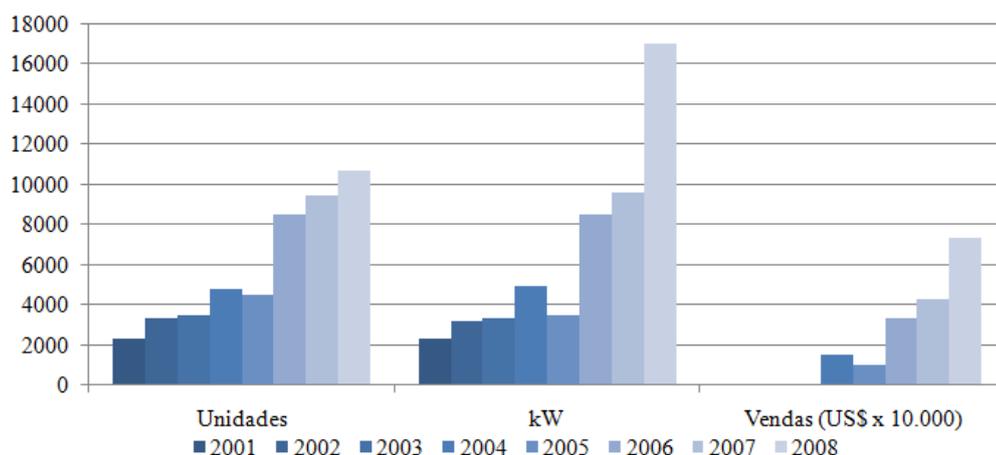


Figura 5 - Unidades, capacidade instalada (kW), vendas (US\$ x 10.000) de aerogeradores de pequeno porte no mundo de 2001 a 2008 nos EUA, adaptado de (AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION, 2009).

Como o mercado americano representa metade do mundial, isso aponta um crescimento do mercado de aerogeradores de pequeno porte no mundo (AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION, 2010), Figura 6. O Brasil é um mercado promissor, com grande potencial eólico, em especial no litoral da região Nordeste, com boas velocidades médias de vento, com baixa variação na direção e pouca turbulência ao longo do ano (SILVA, ROSA e ARAÚJO, 2005). Porém, ainda é pouco explorado, com poucas indústrias de aerogeradores de pequeno porte instaladas no território nacional e até 2,5 milhões de domicílios sem energia elétrica na região (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010).

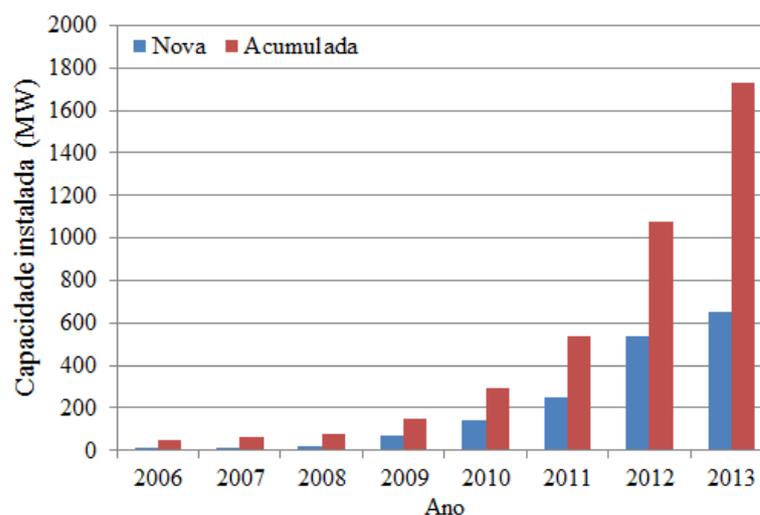


Figura 6 - Previsão de crescimento da capacidade instalada de aerogeradores de pequeno porte nos EUA (MW), adaptado de (AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION, 2009).

Em 2009, quase 200 unidades de aerogeradores foram vendidas especificamente para a utilização em topos de edifícios em áreas urbanas nos Estados Unidos, representando 400kW de capacidade instalada, ou 2% do mercado de pequeno porte americano. Pelo menos 17 companhias pretendem desenvolver aerogeradores para a instalação em edifícios (a maioria de aerogeradores de eixo vertical). Os aerogeradores instalados em edifícios enfrentam mais turbulência no vento causada por obstáculos. Qualquer aerogerador instalado em local com esse tipo de vento deverá ter um rendimento menor do que com os ventos menos turbulentos. (AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION, 2010).

Os aerogeradores de pequeno porte instalados no solo – geralmente em campo aberto – devem manter um crescimento sólido e ainda a maior fatia do mercado do segmento (cerca de 80%). Já os instalados em edificações ainda constituem um conceito novo na instalação desses sistemas para a extração de energia elétrica e, por enquanto, a preocupação está focada na escolha de locais com melhor qualidade dos recursos energéticos antes da instalação. Porém, o segmento também está crescendo, por exemplo, com o aumento de aerogeradores vendidos pelo Reino Unido ao mundo, conforme visto na Figura 7. Esse mercado deve melhorar com a regulamentação de leis para o mercado e a possibilidade já citada da venda de energia por pessoas físicas (BRITISH WIND ENERGY ASSOCIATION, 2010).

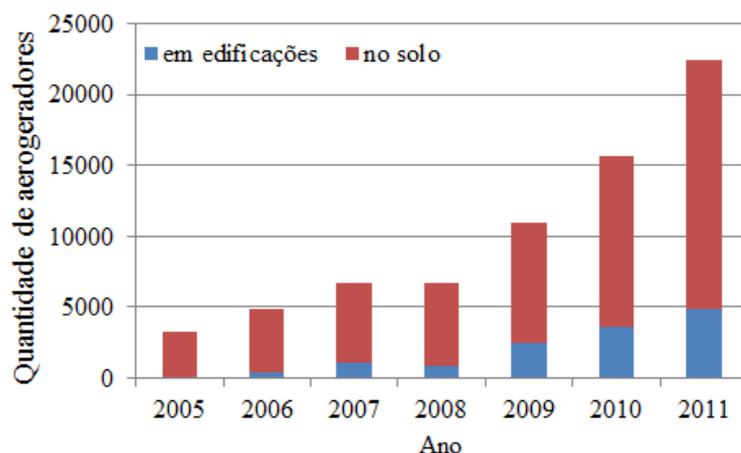


Figura 7 - Quantidade de aerogeradores de pequeno porte em edificações e no solo vendidos no mundo pelo Reino Unido os anos de 2005 a 2009 e previsão até 2011, retirado de (BRITISH WIND ENERGY ASSOCIATION, 2010).

A integração de turbinas eólicas em edifícios é possível mesmo com a alta rugosidade do solo urbano quando comparados com as áreas rurais. Em compensação alguns edifícios aceleram o vento em seus arredores e criam velocidades de vento mais altas do que em fluxo de vento livre. Alguns edifícios podem ter efeitos concentradores, criando velocidades ainda maiores. Pode-se aproveitar do projeto de edifícios usando-os como concentradores, a fim de aumentar intencionalmente os fluxos de vento, tornando ainda mais viável o uso de aerogeradores nestas localidades. Quando se utiliza este conceito têm-se os aerogeradores encapsulados por prédios (BAWT – Building-Augmented Wind Turbines) (MERTENS, 2006). Este é o caso do Pearl River Tower, Figura 8, localizada em Guangzhou na República Popular da China, em fase final de construção, seu projeto prevê a instalação de quatro aerogeradores encapsulados pelo edifício, fazendo jus ao apelido de “o arranha-céu verde do mundo”. Outra possibilidade é a de se fazer pequenas modificações nos prédios já existentes com o fim de melhorar as velocidades de vento (MÜLLER, JENTSCH e STODDART, 2008).



Figura 8 - Pearl River Tower em Guangzhou na República Popular da China, fotografia de 29 de agosto de 2010. Fonte: (SKYSCRAPER PAGE, 2010).

1.1 Justificativa do trabalho

Atualmente há uma grande iniciativa global – através de incentivos governamentais – para a implantação de novos sistemas de geração de energia que sejam economicamente viáveis, com baixa emissão de poluentes e renováveis. Na área de energia eólica, essa busca se dá prioritariamente no ambiente rural, onde as velocidades de vento costumam ser maiores. Porém, há poucos estudos sobre as condições do vento no ambiente urbano, no qual se poderia extrair energia onde a maior parte do consumo é feito, reduzindo custos de transmissão e a carga na rede.

As condições do vento no ambiente urbano são influenciadas diretamente pela distribuição e forma das construções encontradas na região, criando efeitos de cânion que podem gerar um vento favorável ou não em cada aplicação. Portanto, é importante o estudo das condições eólicas locais, em cada situação, para descobrir a viabilidade de um projeto (ANTVORSKOV, 2008).

O crescimento do mercado de aerogeradores de pequeno porte no ambiente urbano, ainda que tímido, aponta uma tendência da exploração de energia nessas regiões. Adquirir conhecimento no estado da arte e desenvolver ferramentas e métodos para a compreensão do comportamento do vento e o impacto das construções de edifícios na beira-mar foram elementos motivadores na execução deste trabalho.

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo principal deste trabalho é propor uma metodologia para a simular os fluxos de vento no ambiente urbano, e, com isso, avaliar o possível aproveitamento de energia eólica nesta região.

Adicionalmente, a metodologia proposta será aplicada para a avaliação do fluxo eólico no bairro de Boa Viagem na área em frente ao Parque Natural Municipal dos Manguezais Josué de Castro no Recife, com a utilização de ferramentas acessíveis e de fácil manuseio.

Analisar-se-á ainda o impacto dos edifícios no vento do Parque dos Manguezais e a disponibilidade do recurso eólico local. Também objetiva-se o estudo do uso de aerogeradores em edifícios da orla de Boa Viagem e a possibilidade da implantação de aerogeradores de pequeno porte em seu topo.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho está dividido em 6 capítulos.

Este capítulo 1 apresentou uma breve discussão política e mercadológica da energia eólica nos cenários mundial e nacional, bem como os objetivos do trabalho e a justificativa de sua realização.

O capítulo 2 faz uma breve revisão bibliográfica de matérias ligadas à geração de vento na região urbana e no Nordeste do Brasil, apresenta as diferenças dos aerogeradores e suas vantagens para o aproveitamento do potencial eólico nas cidades e descreve as ferramentas de análise utilizadas.

O capítulo 3 apresenta a proposição de uma metodologia para a análise das características do vento no ambiente urbano, definindo parâmetros do ambiente urbano – como a volumetria das edificações e estabilidade atmosférica – para a simulação do fluxo eólico.

O capítulo 4 mostra o estudo de caso para parte do bairro de Boa Viagem e o Parque Natural Municipal dos Manguezais Josué de Castro, apresentando as ferramentas e dados utilizados e os aerogeradores escolhidos.

O capítulo 5 mostra os principais resultados e análise dos dados de vento, da obtenção das formas e volumetrias das edificações e de outros parâmetros como estabilidade atmosférica e rugosidade urbana, além das simulações no ambiente urbano.

O capítulo 6 descreve as conclusões deste trabalho. Apresenta, ainda, propostas para futuros trabalhos relacionadas ao tema abordado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo faz uma breve revisão bibliográfica de matérias ligadas à geração de vento na região urbana e no Nordeste do Brasil, apresenta as diferenças dos aerogeradores e suas vantagens para o aproveitamento do potencial eólico nas cidades e descreve as ferramentas de análise utilizadas.

2.1 Ambiente rural e ambiente urbano

A geração de energia eólica é uma alternativa para o desenvolvimento e sustentabilidade do meio rural – seja na produção em larga escala, com aerogeradores de grande porte, seja na produção em menor escala, gerando energia necessária para pequenas propriedades rurais ainda desconectadas da rede – ajudando a diversificar as atividades na região mantendo os empregos no local e diminuindo o êxodo; a elevar a produtividade agrícola com um aumento na oferta de alimentos; e a melhorar as condições de vida com o crescimento da industrialização rural (OLIVEIRA, 1991).

No meio urbano, essa energia pode ser utilizada diretamente pelo produtor, dispensando a necessidade de transmissão (GRANT, JOHNSTONE e KELLY, 2007) e fortalecendo a estabilidade da rede através da geração distribuída. Além disso, a energia gerada nesse ambiente pode virar fonte de renda aos moradores das cidades – com a venda de energia às concessionárias, por exemplo. Ainda há a possibilidade de reduzir o consumo nos horários de pico, podendo reduzir significativamente as contas de energia dos setores de comércio e indústria (WESTERHOLM, 2004) – e futuramente até do setor residencial.

Um estudo na Escócia indicou que os moradores das regiões urbanas preferem projetos de energia renováveis que tenham baixo ou nenhum impacto paisagístico, que não prejudiquem a vida selvagem e não gerem poluição atmosférica. Já a criação de novos empregos permanentes por estes projetos não é importante para esse grupo. O mesmo estudo indicou que os residentes de regiões rurais dão preferência a projetos de energias renováveis, apoiando a criação de novos postos de trabalho permanentes e que diminuam os impactos ambientais (BERGMANN, COLOMBO e HANLEY, 2008).

Ao comparar os meios rural e urbano quanto a produção de energia eólica deve-se levar em consideração diversos aspectos, como as condições de vento, poluição sonora e visual, o impacto ambiental, a segurança e as interferências eletromagnéticas.

2.1.1 Condições do vento

No ambiente rural as velocidades de vento costumam ser maiores e livres de turbulências, dependendo da topografia do local – a escolha é geralmente de grandes planícies, zonas de concentração de vento, como cânions, ou encostas, como as brisas de vale e montanha. Portanto, nesse ambiente, parece ser mais fácil a utilização de máquinas para a extração de energia do vento. Contudo, existe uma dificuldade no transporte desta energia para os grandes centros urbanos, já que a demanda nas áreas rurais é menor, o excedente deve ser transmitido para outras áreas.

Nas cidades, as velocidades de vento são perturbadas devido aos obstáculos – as edificações – e com isso as velocidades tendem a ser menores e o vento mais turbulento. Existe, no entanto, a vantagem da energia ser produzida no local onde é utilizada havendo, portanto, perdas insignificantes com o seu transporte. Além disto, no topo dos prédios – e até ao redor dos mesmos – é possível encontrar velocidades de vento até 20% maiores que a não perturbada, porém com alta intensidade de turbulência (MERTENS, 2002).

2.1.2 Poluição sonora

Tanto nas cidades como nas zonas rurais, a introdução de máquinas pode causar poluição sonora, sendo que os ruídos originados pelos aerogeradores de grande porte a 350m de distância, porém, não excedem os sons gerados, por exemplo, no ambiente de trabalho, Figura 9.



Figura 9 - Ruído provocado por diversas fontes em decibéis, adaptado de (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2008).

No ambiente urbano, devido ao nível alto de ruídos já existentes, parte dos residentes destes locais tem maior aceitação por aerogeradores que provoquem menores níveis de ruídos, em especial à noite. Para esse tipo de exigência, aerogeradores de baixa velocidade de rotação são preferíveis, minimizando os ruídos. Outra estratégia é o desligamento da máquina no período noturno (IZAGUIRRE, 2008).

No caso do ambiente rural, esse tipo de ruído – devido ao uso de grandes aerogeradores de baixa rotação e instaladas longe da população – não possui tanto impacto, não sendo, portanto, um fator contra a instalação de máquinas nestes locais.

2.1.3 Poluição visual

A poluição visual é algo relativo ao local e às pessoas. Em 1889, uma petição com 300 assinaturas exigia a retirada da Torre Eiffel de Paris. Artistas e arquitetos eram os maiores críticos da obra. Hoje, a torre é o maior cartão postal da Cidade Luz (OPPENHEIM, OWEN e WHITE, 2004). Atualmente, vários locais já dispõem de seus aerogeradores como cartões-postais de suas cidades (COSTA, CASOTTI e AZEVEDO, 2009) e surge a modalidade de turismo eólico – onde as pessoas vão apreciar essas máquinas – podendo incrementar a economia dos locais.

No caso rural, aerogeradores de grande porte são instalados em altas torres, deixando óbvias suas existências na paisagem. A escolha por torres tubulares – ao invés da treliçada – já visa à diminuição deste impacto. Porém, parte desta repulsa aos aerogeradores é devido à resistência da população quanto a novos objetos na paisagem, sendo a conscientização de sua importância ambiental uma maneira de diminuir o impacto (ERDOGDU, 2009). Já no caso do

ambiente urbano – com o uso de pequenas máquinas –, os aerogeradores passam despercebidos (MELO, 2009).

2.1.4 Impacto ambiental

Os aerogeradores podem causar mortes de pássaros maiores – pelo choque nas pás – e de morcegos – pela súbita diferença de pressão das partes anterior e posterior do rotor. No início, os aerogeradores eram instalados sem o estudo de rotas migratórias de pássaros levando às mortes desses animais. Esses primeiros aparelhos causaram o alarde exagerado que não condiz com as estatísticas atuais, Figura 10. Hoje, para diminuir ainda mais as taxas de mortes aviárias, alguns parques instalam estímulos visuais e auditivos nas torres, evitando a ocorrência desses acidentes (COSTA, CASOTTI e AZEVEDO, 2009).



Figura 10 - Causa da morte de aves relativas a atividades humanas nos EUA, adaptado de (COSTA, CASOTTI e AZEVEDO, 2009).

Ainda deve-se considerar que gatos domésticos matam mais de um bilhão de aves ao ano. Comparando os aerogeradores com outras tecnologias geradoras de energia, é possível constatar que os primeiros matam menos por gigawatt-hora de energia gerada, Figura 11 (SOVACOOOL, 2009).

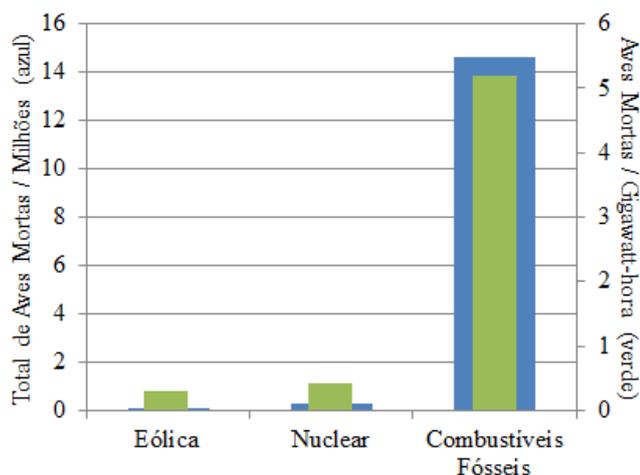


Figura 11 - Número estimado de mortes de pássaros pela geração de energia eólica, nuclear e fóssil por ano, adaptado de (SOVACOOOL, 2009).

Estes estudos estão limitados às áreas rurais, já que o aproveitamento da energia eólica no ambiente urbano ainda é incipiente. Não deve haver uma maior preocupação com os pássaros e morcegos devido ao número reduzido desses animais nas cidades. As colisões com prédios e janela devem se manter como um dos maiores fatores de risco de morte não natural aos animais.

Atualmente, vários estudos são feitos para a redução dos impactos ambientais dos aerogeradores como um todo, de forma a manter a energia eólica como uma das energias mais limpas do mundo, Tabela 1.

Tabela 1 - Impacto ambiental de diferentes fontes de energia, adaptado de (AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION, 2009).

Impacto	Eólica	Nuclear	Carvão	Gás Natural
Emissão de gases de efeito estufa	Não	Não	Sim	Sim
Poluição do ar	Não	Não	Sim	Limitada
Mercurio	Não	Não	Sim	Não
Mineração/Extração	Não	Sim	Sim	Sim
Resíduo sólido	Não	Sim	Sim	Não
Uso de água	Não	Sim	Sim	Sim
Impacto no habitat	Sim	Sim	Sim	Sim

2.1.5 Segurança

Aerogeradores sendo utilizados no ambiente urbano trazem maiores riscos por operarem em locais de densa população, no caso de um mau funcionamento. Como estão sujeitos a maior desgaste e fadiga devido à turbulência deve-se exigir fatores de segurança mais rígidos nestes locais (MERTENS, 2006).

2.1.6 Interferências eletromagnéticas

Um possível impacto negativo dos aerogeradores são as interferências nos meios de comunicação e navegação via ondas eletromagnéticas. Foi estudada essa possibilidade no parque dinamarquês no oceano Tuno Knob e nenhum efeito adverso foi encontrado em 18 meses de instalação (COSTA, CASOTTI e AZEVEDO, 2009). Os pequenos aerogeradores não devem provocar interferências, visto que as pás dos modelos mais modernos são fabricadas em madeira, fibra de vidro e outros compostos não metálicos (MELO, 2009).

2.2 O Vento

A região Nordeste do Brasil está compreendida entre a linha do equador e o trópico de capricórnio (23,5° S). Nesta zona, a circulação geral atmosférica se dirige para a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Figura 12. Na escala global, os ventos de superfície nesta região são chamados de ventos alísios e considerados as maiores fontes energéticas da região tropical (SILVA, 2003).

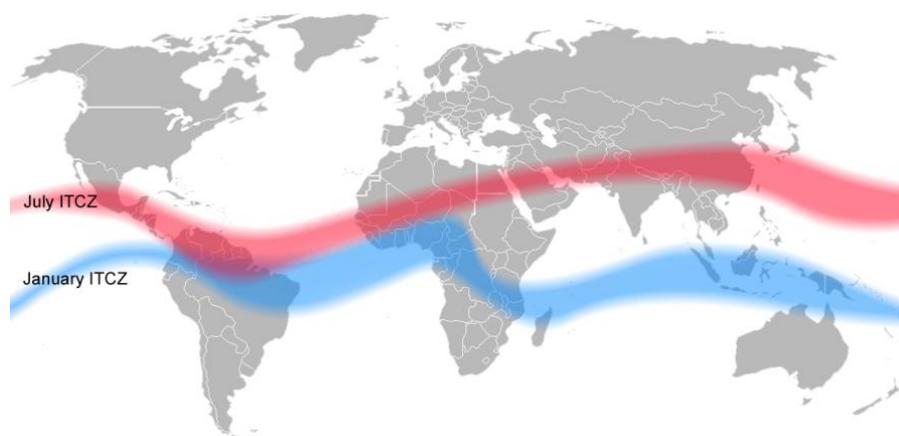


Figura 12 - Posição média da Zona de Convergência Intertropical nos meses de Julho (vermelho) e Janeiro (azul). Fonte: (HALLDIN, 2006).

Na escala regional, as brisas marítimas, que são formadas pelo gradiente de temperatura oriundos das diferenças de aquecimento, contribuem fortemente para o aumento na intensidade e na variação da direção dos ventos alísios no litoral da região Nordeste do Brasil. A incidência das brisas marítimas é maior nos meses de verão (SILVA, 2003).

2.2.1 Litoral Nordeste-Sudeste

A região litorânea que vai do extremo norte da Paraíba até o extremo sul da Bahia é denominada Litoral Nordeste-Sudeste, Figura 13. Nesta região, há uma diminuição gradual da intensidade de vento – na maioria da costa as velocidades de vento estão entre 5 a 8m/s a 50m de altura (SILVA, 2003).

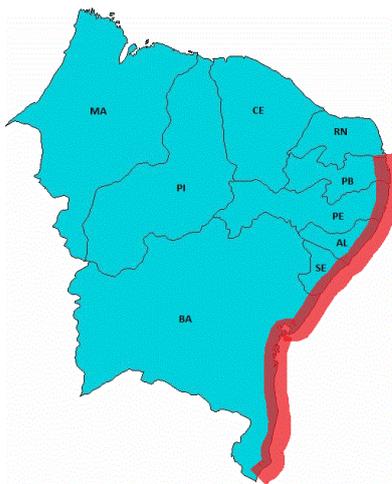


Figura 13 - Litoral Nordeste-Sudeste destacado em vermelho, adaptado de (SILVA, 2003).

São quatro os fenômenos responsáveis pela diminuição gradual da intensidade de vento no Litoral Nordeste-Sudeste:

- Redução dos ventos alísios – devido ao afastamento da Zona de Convergência Intertropical;
- Brisas marítimas mais fracas – devido ao menor gradiente térmico entre oceano e terra;
- Ação de frentes frias remanescentes propagadas do sul desta região;
- Divergência de direção entre os ventos alísios e brisas terrestres durante a noite, principalmente nos meses de outono e inverno.

As condições de vento da região podem ser avaliadas seguindo as características de seus recursos eólicos nesta região listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características dos recursos eólicos do Litoral Nordeste-Sudeste, adaptado de (SILVA, 2003).

Característica	Definição	Intensidade
Intensidade de Vento	Valor da velocidade média do vento	Moderada
Dispersão das ocorrências	Divergência da velocidade vento com relação à média	Baixa
Constância direcional	Regularidade na direção do vento	Alta
Valores extremos	Maior valor de velocidade de vento anual	Baixos
Níveis de turbulência	Variação dos valores instantâneos da velocidade de vento	Baixos
Gradiente vertical	Diferença da velocidade de vento com a altura	Baixo
Variação sazonal	Variação da velocidade média mensal durante o ano	Moderada
Regularidade interanual	Não variação da média anual ao longo dos anos	Alta

2.2.2 Perfil vertical do vento

O perfil vertical do vento – ou cisalhamento – é causado pela diminuição da velocidade do vento pelo atrito deste com a superfície terrestre. A camada mais próxima da superfície retarda as camadas superiores, causando um gradiente de velocidades crescente com a altura, Figura 14.

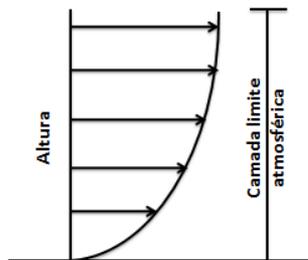


Figura 14 - Perfil vertical do vento, adaptado de (ROHATGI, 1994).

Esta região, onde há uma variação nas velocidades do vento dada a influência direta do atrito do solo, é chamada de camada limite atmosférica (CASTRO, 2007). Este perfil vertical pode ser aproximado pela lei logarítmica de Prandtl.

$$\bar{u}(z) = \frac{u \cdot}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

Onde $\bar{u}(z)$ é a velocidade média do vento à altura z ; $u \cdot$ é a velocidade de atrito; k é constante de Von Karman (aproximadamente 0,41); e z_0 é o comprimento característico da rugosidade do solo, que pode ser estimado como na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores aproximados dos comprimentos característico de rugosidade de superfícies e expoente da lei logarítmica para diferentes terrenos, adaptado de (ROHATGI, 1994).

Descrição do Terreno	z_0 (m)	α
Muito liso: gelo ou lama	1×10^{-6}	
Mar aberto e calmo	2×10^{-5}	
Mar agitado	5×10^{-5}	
Superfície de neve	0,003	0,10
Gramado	0,008	
Pastagem áspera	0,01	
Descampado	0,03	0,13
Plantação	0,05	0,19
Poucas árvores	0,1	
Várias árvores, cercas e poucos prédios	0,25	
Floresta e mata	0,5	
Subúrbios	1,5	0,32
Centros de cidades com prédios altos	3	

A equação pode ser simplificada, escrevendo duas expressões para os perfis logarítmicos, uma para a altura de referência z_r e outra para uma altura qualquer, z , e assim calcular a velocidade do vento em uma diferente altura.

$$\frac{\bar{u}(z)}{\bar{u}(z_r)} = \frac{\ln(z) - \ln(z_0)}{\ln(z_r) - \ln(z_0)} \quad (2)$$

Enquanto a lei de Prandtl é mais bem empregada para descrever a camada limite atmosférica, o perfil vertical completo é melhor aproximado pela lei da potência (LOPES, 2010), proposta por Hellman em 1915.

$$\frac{u(z)}{u(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (3)$$

Onde α é um expoente correlacionado com a rugosidade do solo, Tabela 3.

Para regiões de alta rugosidade – como no ambiente urbano – a lei da potência necessita ser modificada para incluir um parâmetro de altura que depende da altura média do elemento rugoso. A nova altura do nível virtual da superfície seria $z_0 + d$ acima da terra, onde d é a chamada altura do deslocamento (MERTENS, 2006).

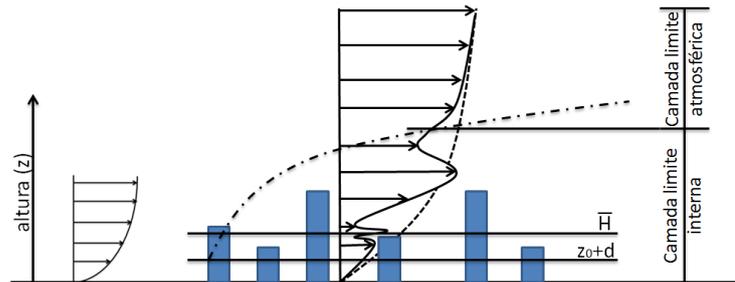


Figura 15 - Esquemático do perfil vertical do vento no ambiente urbano, adaptado de (MERTENS, 2006).

A lei da potência para superfície de alta rugosidade é válida para a camada limite atmosférica acima da região perturbada pelos edifícios – ou camada limite interna.

$$\bar{u}(z) = \frac{u}{k} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad (4)$$

2.2.3 Estabilidade atmosférica

Quando uma bolha de ar é deslocada verticalmente para cima na atmosfera atravessa um gradiente de pressão decrescente, expandindo-se. Essa expansão demanda trabalho, o que resulta em uma diminuição da temperatura dessa massa. Como este processo ocorre de forma rápida, é razoável considerar que é um processo adiabático (CHEREMISINOFF, 2002). De forma análoga, esta bolha pode ser empurrada para baixo e comprimir-se, resultando em um aumento da temperatura, Figura 16. Em uma atmosfera não saturada (umidade relativa menor que 100%), a taxa adiabática é constante e aproximadamente igual a 0,01°C/m, (AHRENS, 2008).

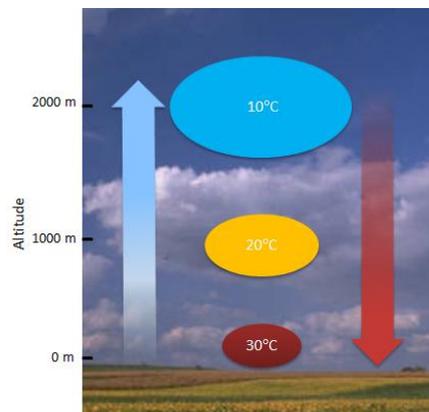


Figura 16 - Bolha de ar movendo-se verticalmente em uma atmosfera não saturada.

Considera-se que há um estado de atmosfera neutra quando a taxa de queda da temperatura atmosférica é a mesma do processo adiabático, portanto a bolha de ar atinge as

novas altitudes com a mesma temperatura que seu entorno (CHERMISINOFF, 2002), Figura 17(a).

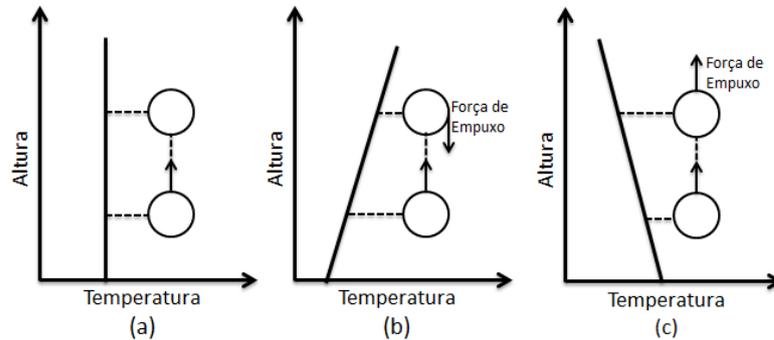


Figura 17 - Os estados da atmosfera: (a) neutra; (b) estável; e (c) instável, adaptado de (ROHATGI, 1994).

Quando a bolha sobe em um processo adiabático, mas em uma atmosfera que possui taxa de queda subadiabática, e atinge uma região atmosférica com menor temperatura, mas de mesma pressão, a massa desce para sua posição original. Considera-se nesta situação que há um estado de estabilidade atmosférica (CHERMISINOFF, 2002), Figura 17(b).

Em outro caso, quando o movimento da bolha de ar resulta em um acréscimo de temperatura, há uma diminuição da densidade desta massa, e a mesma continua a subir. Considera-se neste caso que há um estado de instabilidade atmosférica (CHERMISINOFF, 2002), Figura 17(c).

Existem basicamente seis condições de estabilidade atmosférica, as quais foram designadas por Pasquill como: A (extremamente instável), B (moderadamente instável), C (pouco instável), D (neutra), E (moderadamente estável), e F (extremamente estável). Depois, foi adicionada a condição G (estabilidade noturna) para representar condições de baixa velocidade de vento durante a noite (MOHAN e SIDDIQUI, 1998). A correlação entre a classificação da estabilidade atmosférica de Pasquill e os valores para gradiente vertical de temperatura do processo podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 - Correlação entre a classificação da estabilidade atmosférica de Pasquill e o gradiente vertical de temperatura, adaptado de (MOREIRA, TIRABASSI e MARCELO, 2008).

Condição de Estabilidade Atmosférica	Classificação de Pasquill	Gradiente de Temperatura (°C/m)
Extremamente instável	A	$dT/dZ < -0,019$
Moderadamente instável	B	$-0,019 \leq dT/dZ < -0,017$
Pouco instável	C	$-0,018 \leq dT/dZ < -0,015$
Neutra	D	$-0,015 \leq dT/dZ < -0,005$
Pouco estável	E	$-0,005 \leq dT/dZ < 0,015$
Extremamente estável	F	$0,015 \leq dT/dZ < 0,04$
Estabilidade Noturna	G	$0,04 \leq dT/dZ$

Enquanto a difusão da turbulência na camada de mistura depende fundamentalmente do conhecimento do perfil de temperatura, um sistema empírico dado por Pasquill é frequentemente usado em modelos de dispersão urbana para encontrar as condições de estabilidade atmosférica (CHEREMISINOFF, 2002). Neste modelo, as observações meteorológicas comuns – nível de insolação diurna e nebulosidade noturna – substituem as medições do perfil de temperatura por razões de praticidade e disponibilidade de dados. Os estados da atmosfera são dados na Tabela 5.

Tabela 5 - Relação entre o estado atmosférico e o clima, adaptado de (CHEREMISINOFF, 2002).

Velocidade de vento a 10m (m/s)	Condições de Insolação Diurna			Nebulosidade Noturna	
	Forte	Moderada	Fraca	Alta	Baixa
< 2	A	A - B	B		
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

O nível de nebulosidade é dado pela razão entre a parcela coberta por nuvens e a parcela sem nuvens. É considerada alta quando esta razão é maior que 4/8 e baixa quando menor que 3/8 (CHEREMISINOFF, 2002).

A estabilidade atmosférica e o perfil vertical do vento têm influência na potência eólica disponível e na intensidade de turbulência. A atmosfera neutra ocorre em velocidades de vento razoáveis e possuem baixa turbulência e pequeno cisalhamento. Do ponto de vista da extração de potência, a atmosfera instável é mais vantajosa por possuir altas velocidades de vento, porém, o ar quente ascendente gera vórtices verticais causando mais turbulência. A atmosfera estável é menos indicada à extração de energia eólica por possuir menores velocidades de vento (ROHATGI, 1994).

A estabilidade atmosférica não deve ser avaliada em observações feitas em um breve período de tempo, pois os resultados não devem ser indicativos de médias diárias ou sazonais. Porém, certas áreas tendem a ter uma condição de estabilidade definida dada as características térmicas do solo. Por exemplo, o deserto possui um grande aquecimento do solo por radiação e do ar por convecção durante o dia, portanto, produz condições atmosféricas instáveis mais frequentemente que um terreno plantado. À noite, o rápido resfriamento do terreno desértico por radiação e do ar por convecção induz a condições atmosféricas estáveis. Em áreas urbanas densamente povoadas, tanto de dia quanto a noite, geralmente tem-se condições atmosféricas instáveis, pois as grandes cidades agem como fonte de aquecimento para a atmosfera acima

dela (ROHATGI, 1994). Porém, apesar das melhores velocidades de vento das atmosferas instáveis, a rugosidade do solo urbano diminui as velocidades de vento.

2.2.4 Turbulência e fadiga

Edifícios, árvores, aerogeradores e outros obstáculos são fontes de turbulência para as regiões vizinhas. Turbulência é a alteração repentina da velocidade e direção, que causa diminuição na potência extraída pelos aerogeradores e ainda induz um processo de fadiga adicional à máquina (LYSEN, 1983). É uma característica não linear do escoamento – e não do fluido – que deve ser considerada no projeto dos aerogeradores.

A fadiga é um dano estrutural progressivo e localizado que ocorre em materiais sujeitos a diversos tipos de cargas. Uma turbina eólica está sujeita a cargas estáticas, cíclicas, estocásticas, aerodinâmicas e mecânicas. As cargas cíclicas e estocásticas – essa última devido predominantemente à turbulência dos ventos – são as que causam maiores falhas estruturais às máquinas. Além da fadiga, a turbulência afeta muitos outros parâmetros de projeto, como previsão de carga máxima, excitação estrutural, controle e qualidade da energia (RAGHEB, 2008).

Uma zona de turbulência pode se estender horizontalmente por até vinte vezes a altura do obstáculo e ser mais intensa horizontalmente na região posterior do obstáculo do que na frontal (CASTRO, 2007).

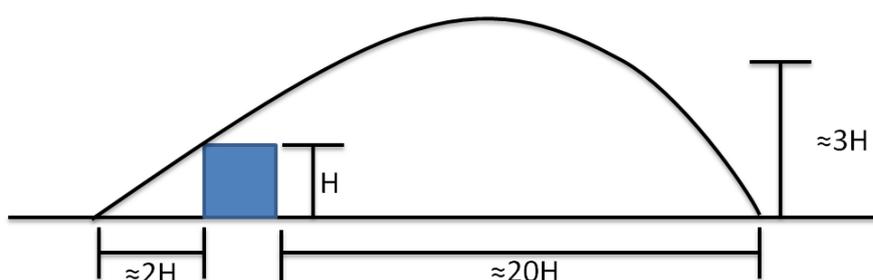


Figura 18 - Zona de turbulência próxima a um edifício, adaptado de (LYSEN, 1983).

A intensidade de turbulência I pode ser definida como a razão entre o desvio padrão da velocidade do vento σ_u e a média dessa velocidade (MERTENS, 2006).

$$I = \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \quad (5)$$

Os níveis de intensidade de turbulência aumentam com a rugosidade do solo e diminuem com a altura com relação à superfície terrestre. Usando valores típicos do ambiente urbano a intensidade máxima de turbulência é 0,77 (MERTENS, 2006).

Em condições de vento turbulentas como o das cidades, tanto os aerogeradores de eixo horizontal quanto o de vertical deverão ter problemas. O primeiro tipo terá dificuldade em alinhar-se com a direção de vento, que se altera muito rapidamente, podendo comprometer a eficiência dessas máquinas (BUSSEL e MERTENS, 2005). Ambos serão afetados pela fadiga ocasionada pelas cargas estocástica da turbulência. No entanto, o de eixo vertical ainda será afetado por cargas cíclicas devido a alterações constantes nas forças de sustentação durante as revoluções das pás (PREUS, 2004).

2.2.5 Aceleração no topo

Os topos de morros, montanhas e edifícios agem como um concentrador do fluxo de vento, causando uma aceleração próxima ao cume. O efeito de aceleração do topo é maximizado quando as inclinações na direção do vento predominante estão entre 6 e 16° com relação ao solo – esta última é tida como a ideal –, sendo que inclinações maiores que 27° desaceleram o fluxo próximo a superfície (LYSEN, 1983).

Nos edifícios, dado os ângulos agudos dos vértices das sacadas, acontece um efeito de recirculação de ar no teto, criando uma zona de baixa velocidade de vento e grande turbulência, onde os aerogeradores devem ser evitados (MERTENS, 2006) e, portanto, instalado com toda a área de varrição fora desta região (IZAGUIRRE, 2008). A recirculação aparece junto ao efeito de aceleração no topo, ambos dependem da:

- Direção do vento;
- Dimensões do edifício;
- Rugosidade da região próxima ao edifício – especialmente na direção predominante do vento.

Próximo ao edifício e longe da sacada, as velocidades de vento são menores e crescem ao se aproximar das sacadas maiores, criando um gradiente de pressões que gera o aparecimento da recirculação (MERTENS, 2006). Acima de um ângulo de 27° – tomando por base o teto –, a velocidade do vento pode ser estimada como a mesma ou maior do que aquela antes do fluxo de ar tocar o edifício (IZAGUIRRE, 2008), Figura 19.

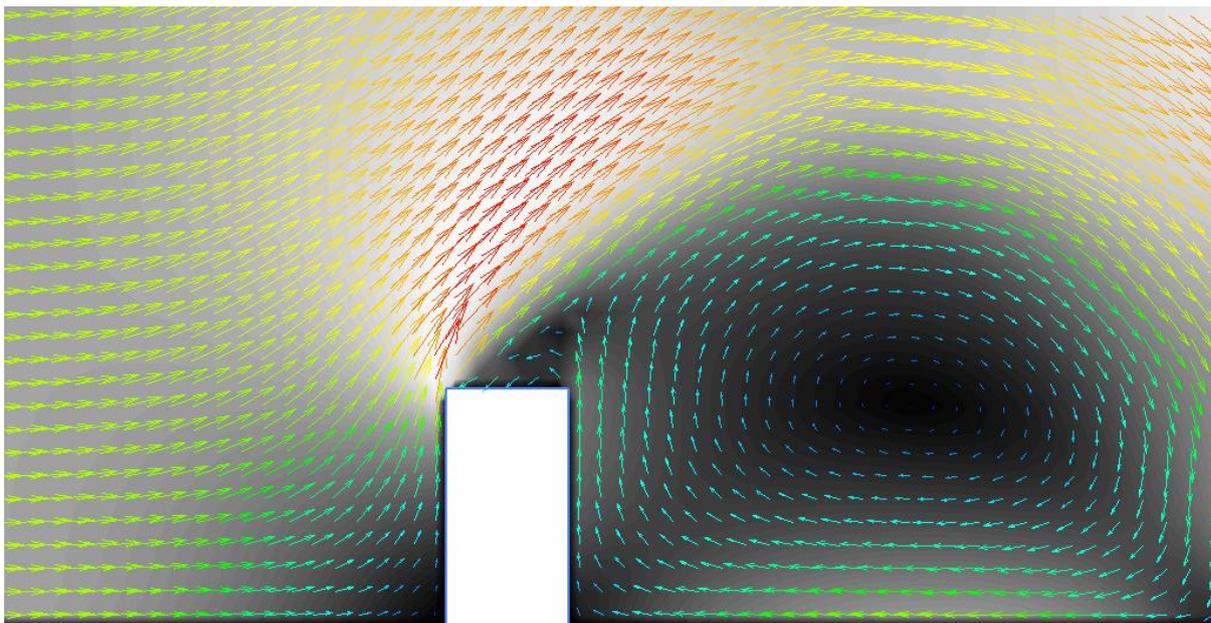


Figura 19 - Região de recirculação e aceleração no topo (esquerda), em detalhe e mostrando ângulo de 27° em destaque (direita), adaptado de (MERTENS, 2006).

Para diminuir a zona de recirculação pode ser adicionado à sacada formas como grades e aerofólios para atenuar inclinações e arrasto do topo do edifício (MERTENS, 2006). Se o efeito desejado for a aceleração do vento no topo, o formato de asa pode melhorar este efeito.

2.3 Aerogerador integrado ao edifício

O primeiro conceito moderno de aerogeradores integrados em edifícios foi desenvolvido pelo engenheiro alemão Hermann Honnef nas décadas de 1930 e 1940 (MÜLLER, JENTSCH e STODDART, 2008), Figura 20. Honnef acreditava que os aerogeradores de torres com três rotores de 160 metros de diâmetro, custariam cerca de um milhão de dólares e seriam capazes de fornecer energia a 100 mil habitantes. O engenheiro acreditava poder alcançar valores baratos de energia através dos ventos instalando a tecnologia em arranha-céus, em terra e até no mar (POPULAR SCIENCE MONTHLY, 1932).



Figura 20 - Aerogerador integrado no Empire States Building imaginado por Hermann Honnef. Fonte: (POPULAR SCIENCE MONTHLY, 1932).

Em 2008, a conclusão do Bahrain World Trade Center (BWTC), Figura 21, concretizou o que Honnef vislumbrou 80 anos antes com produção de energia eólica em grande escala em edifícios. O arranha-céu de Barém possui 240 metros de altura e três aerogeradores de 29 metros de diâmetro com potência de 225kW cada, integrados em um edifício projetado para canalizar o vento para as máquinas. Desta forma, os projetistas esperam suprir entre 11 e 15% da demanda da energia do edifício apenas através de seus aerogeradores (SMITH e KILLA, 2007).



Figura 21 - Bahain World Trade Center em Manama, Barém, construído em 2008 e possui três aerogeradores encapsulados pelo edifício. Fonte: (BAHRAIN WORLD TRADE CENTER, 2010).

Para sistemas de conversão eólicos integrados em edifícios, existem essencialmente três classificações possíveis:

- Aerogeradores de Eixo Vertical integrados aos edifícios;
- Aerogeradores de Eixo Horizontal integrados aos edifícios;
- Aerogeradores amplificados pelos edifícios.

As duas primeiras opções se detêm, geralmente, na instalação de pequenos aerogeradores em edifícios – geralmente para edificações já existentes. A última opção requer um planejamento de formas geométricas e volumetria e um projeto cuidadoso de modo que a geração de energia eólica seja parte integrante dos edifícios. Um método é dar formas aerodinâmicas ao edifício, formando um concentrador, a exemplo do BWTC, de forma a aumentar o desempenho dos aerogeradores. Outro método é formar um duto no edifício tirando vantagens da diferença de pressão na frente e atrás. Uma das vantagens dos aerogeradores concebidos juntos aos edifícios é do projeto ser integrado a paisagem a partir da visão conjunta de engenheiros e arquitetos (MÜLLER, JENTSCH e STODDART, 2008), possibilitando a otimização do projeto. Mais sobre aerogeradores no APÊNDICE A.

3 METODOLOGIA

O primeiro passo é a escolha do local de estudo, pois os dados disponíveis nas regiões podem ser fornecidos de formas bem distintas. Os dados deverão ser adaptados para subsidiar a metodologia e atingir o objetivo do estudo em análise. Os parâmetros escolhidos para esta metodologia são aqueles que possam influenciar a velocidade do vento no ambiente urbano. O fluxograma geral desta metodologia pode ser visto na Figura 22.

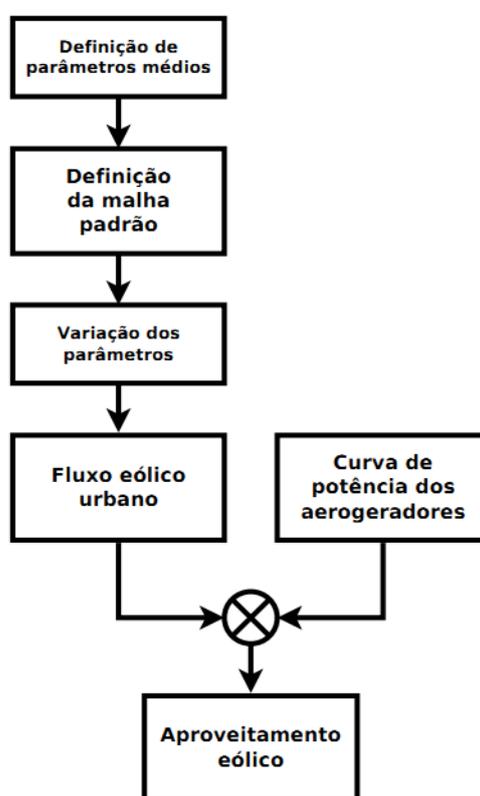


Figura 22 - Fluxograma para a obtenção do aproveitamento eólico urbano.

Algumas áreas de estudo possuem muitos obstáculos, aumentando o trabalho de mapeamento. Para estes casos, pode-se delimitar o local a partir da direção do vento predominante numa análise histórica. Não se deve, no entanto, deixar as delimitações muito próximas da região em estudo, sob o risco de gerar dados incorretos devido aos erros nas bordas das simulações.

3.1 Definição da malha padrão

A malha (ou grid) é formada por células de tamanho iguais ou variados e cada uma delas possui as informações que representarão seu entorno no modelo real. Um uso mal feito

da malha pode anular o modelo de turbulência, assim como um bem feito melhora a convergência dos resultados (MERTENS, 2006). Para um bom resultado com o software de fluidodinâmica computacional, a solução dos cálculos necessita ser independente do tamanho das células da malha, portanto, deve-se ter uma célula pequena o suficiente para que garanta esta condição (MERTENS, 2003).

Após a definição dos parâmetros representativos do fluxo eólico urbano predominante (velocidade média, direção de vento e estabilidade predominantes, etc.) são feitas simulações para testar e retirar qualquer influência do tamanho da malha. São simuladas malhas com diferentes tamanhos de células e sucessivamente decrescentes. Quando forem encontrados resultados iguais para diferentes tamanhos de células, a independência do cálculo quanto à malha é garantida. O procedimento é realizado conforme a Figura 23.

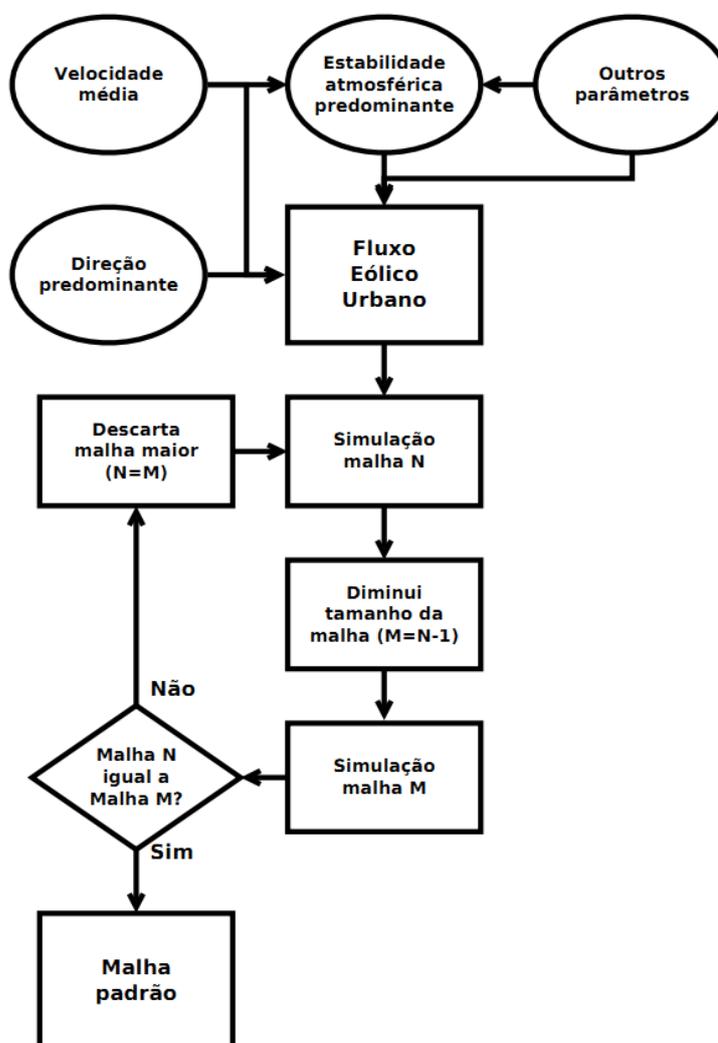


Figura 23 - Fluxograma para a definição da malha padrão.

A definição da malha padrão para os cálculos seguintes será por uma das malha que obteve resultados iguais. A preferência pode ser dada a maior destas, pois ao diminuir-se as células em uma mesma área aumenta-se o esforço computacional.

3.2 Fluxo eólico urbano

Para se obter uma simulação do fluxo eólico no ambiente urbano será necessária a definição de alguns parâmetros, dos quais, os principais são: a rugosidade urbana, o vento não perturbado e a estabilidade atmosférica. Estes dois últimos estão mais ligados às condições naturais da região, podendo ser obtidos de regiões próximas, sem muitas construções, onde estudos climatológicos são realizados com maior frequência e adaptados à região de interesse. A rugosidade urbana vai ter características peculiares próprias, dependendo de como aconteceu o crescimento da região urbana.

O fluxograma pode ser visto na Figura 24.

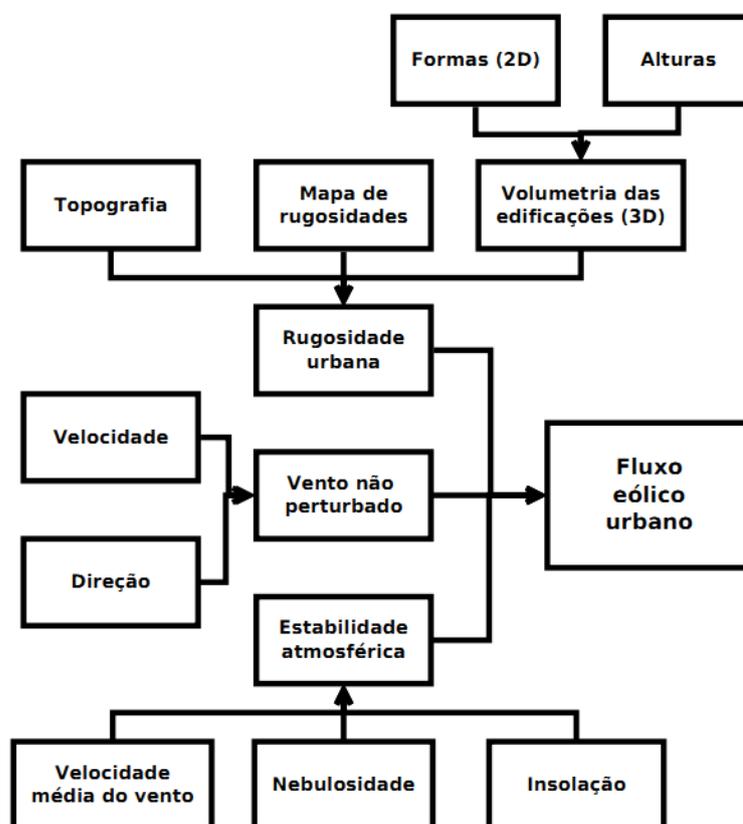


Figura 24 - Fluxograma para a obtenção do fluxo eólico urbano.

3.2.1 Vento não perturbado

A velocidade e direção do vento podem ser obtidas através de dados de medições individuais de cada um desses parâmetros ou de dados de medições das velocidades do vento nas direções zonal (Leste-Oeste) e meridional (Sul-Norte). É preferível uma série de ventos de vários anos, mas é possível aplicar a metodologia mesmo com médias mensais ou anuais. Em

caso de série de dados de vento, é recomendável a divisão dos dados de acordo com o método da caixa de contagens (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998), tanto para a velocidade quanto para a direção. Dados históricos de velocidades de vento para boa parte do mundo podem ser encontrados no NCEP/NCAR (NATIONAL OCEANIC & ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2010), mostrando um panorama mais abrangente da situação de vento da região.

Idealmente, necessita-se de dados de vento em mais de uma altura de medição, porém esta necessidade pode ser substituída com o uso da lei logarítmica de Prandtl ou a lei da potência – conforme sessão 2.2.2. Cada tipo de dado será utilizado conforme a necessidade do estudo realizado.

3.2.2 Estabilidade atmosférica

Outro parâmetro atmosférico que influenciará na simulação é a estabilidade atmosférica. Este parâmetro dependerá dos dados de nebulosidade, insolação e velocidade média do vento.

A estabilidade atmosférica não pode ser definida com apenas uma observação instantânea, pois os resultados devem ser indicativos de médias diárias ou sazonais. Devido à grande capacidade de reter calor, as regiões urbanas geralmente possuem condições atmosféricas neutras (ROHATGI, 1994).

De posse de observações sazonais dos diversos parâmetros, pode-se definir a estabilidade da atmosfera conforme a Tabela 5 e associar com os valores numéricos da Tabela 4, conforme a sessão 2.2.3.

3.2.3 Rugosidade urbana

A rugosidade do ambiente urbano é a parte mais complexa no estudo do vento nessas regiões. Nesta metodologia ela será definida como a associação do mapa de rugosidades, da topografia do terreno e da volumetria das edificações do local em análise. A volumetria das edificações, bem como a topografia do terreno, só é necessária na ausência de um modelo de elevação.

O mapa de rugosidades, a depender do software de fluidodinâmica computacional escolhido, é opcional. No entanto, o mapa pode ser feito através da observação das diversas rugosidades – regiões de altas ou baixas edificações, regiões arborizadas, etc. – vistas em fotos aéreas ou *in loco*, e associando com os parâmetros de uma tabela de rugosidades, como a Tabela 3. Essa informação traz uma maior precisão à simulação.

Existem métodos e ferramentas utilizados para a extração automática e semiautomática (com intervenção humana) da topografia do terreno, bem como da altura e forma dos edifícios, através de imagens de satélites (LAFARGEA, DESCOMBESA, *et al.*, 2008). Porém, a maioria desses métodos são aplicados em imagens de satélite com alta resolução ou utilizando dados obtidos através de tecnologias como o LiDAR (Light Detection And Ranging ou Detecção e Telemetria por Luz). Métodos como esse proporcionam modelos de representação do terreno com grandes amostras de pontos com coordenadas tridimensionais sobre uma superfície, coletadas em um curto espaço de tempo. Entretanto, embora o tempo de coleta seja reduzido, deve-se considerar que o seu uso ainda é limitado no Brasil, face ao custo do sistema de varredura a laser (DERMARQUI, HASEGAWA e GALO, 2008). Geralmente, os métodos de extração topográfica utilizam mais de uma foto para a obtenção das altitudes do relevo.

Os dados de topografia do terreno podem ser obtidos de forma gratuita, da Missão Topográfica Radar Shuttle (Shuttle Radar Topography Mission - SRTM). Estes oferecem uma base completa de cartas topográficas digitais da Terra em alta resolução entre 56°S e 60°N, e, portanto, pode servir de base para boa parte das cidades do mundo. Outros dados de topografia podem substituir os dados da SRTM caso estes não estejam disponíveis para a cidade em estudo ou possuam melhor resolução.

A volumetria das edificações é um parâmetro a ser incorporado tal qual uma topografia altamente acidentada ou como obstáculos externos. É necessária a obtenção das formas (2D) e alturas das edificações para a elaboração desta. Isso pode ser obtido por métodos automáticos, semi-automáticos e/ou manuais de fotogrametria. O uso de mais de uma imagem facilitará nos métodos automatizados.

Os métodos utilizados nesta proposta foram manuais, não necessitando de altas resoluções para utilização de métodos automatizados ou semiautomatizados, mas a aplicação dos métodos de identificação será similar ao destes processos. Grande parte dos erros resultantes será propiciada devido à qualidade das imagens e na consequente incerteza na quantidade de pixels medidos, causando perdas na precisão do processo.

3.3 Curva de potência dos aerogeradores

Devem ser selecionados diferentes aerogeradores para fazer o cruzamento com os dados eólicos e descobrir qual é mais adequada ao local. Se os fabricantes disponibilizarem os dados em faixas de 1m/s, a energia poderá ser facilmente calculada multiplicando-se o número de horas em que a máquina será exposta a cada vento. Caso apenas as curvas de potência forem disponibilizadas, um trabalho de captura gráfica dos valores deve ser feito e posteriormente utilizar o procedimento anterior.

Dentre os aerogeradores escolhidos deve-se dar prioridades àqueles que são projetados para as condições elevadas de turbulência no vento urbano.

4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo mostra o estudo de caso para parte do bairro de Boa Viagem e o Parque Natural Municipal dos Manguezais Josué de Castro, apresentando as ferramentas e dados utilizados e os aerogeradores escolhidos.

4.1 Ferramentas de análise

Diversas ferramentas podem ser utilizadas para a análise do fluxo de vento. Este trabalho priorizará a utilização de ferramentas gratuitas ou de baixo custo que podem ser obtidas na internet.

4.1.1 Fotografia de satélite - Google Maps® e Google Earth®

O Google Maps® é um serviço de mapas e imagens de satélites disponibilizadas gratuitamente na internet. Nele é possível visualizar mapas básicos ou com os serviços disponibilizados – desde linhas de ônibus até restaurantes – nas principais cidades do mundo (GOOGLE, 2010).

O Google Earth® é uma ferramenta que facilita a exploração das imagens de satélite que podem ser encontradas no Google Maps® (GOOGLE, 2010).

4.1.2 Base de dados de altura dos edifícios - Emporis®

A Emporis® é uma empresa especializada em dados de edifícios altos (conhecidos como Arranha-céus), sendo o seu site um grande banco de dados sobre edifícios, de vários locais do mundo, onde se pode encontrar a localização, altura, nome, dentre outras informações (EMPORIS, 2010).

4.1.3 Desenho assistido por computador - Unibase Piloto e Google Sketchup®

A Unibase Piloto é uma base de dados cartográfica única disponibilizada pela Prefeitura da Cidade do Recife que contém informações sobre edificações da cidade do Recife (REDE NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA, 2000). Esta contém contornos dos prédios, ruas, quarteirões e muros em formato de Desenho Assistido por Computador (Computer-Aided Design ou CAD) e Sistema de Informação Geográfica (Geographic Information System ou GIS), entre outros.

O Google Sketchup® é uma ferramenta de CAD, entre outros formatos, de fácil manuseio e que permite a criação de modelos tridimensionais (3D) facilmente (GOOGLE, 2010). Porém, esses modelos 3D não podem ser importados pelo Global Mapper®, por isso, ela só será utilizada para obter e desenhar os contornos do topo dos prédios.

4.1.4 Sistema de informação geográfica - Global Mapper®

O Global Mapper® é um software de sistema de informação geográfica de uso geral. Nele pode-se importar mapas de diversos formatos e georreferenciar essas imagens, por exemplo. Pode-se também medir distâncias e obter e inserir dados diversos sobre os mapas utilizados. Também é possível exportar em diversos formatos de arquivos, inclusive o de imagens com dados de altura, como o Arc ASCII Grid (GLOBAL MAPPER SOFTWARE LLC, 2009).

4.1.5 Fluidodinâmica - Windstation®

Os softwares de fluidodinâmica computacional (Computational Fluid Dynamics – CFD) fazem uma simulação do escoamento e a predição das velocidades, pressões, temperaturas e propriedades turbulentas do vento através de modelos microscópicos baseados nos princípios de conservação de massa, da energia e da quantidade de movimento, no espaço e no tempo.

Os CFDs são aplicados em áreas que vão desde a refrigeração de reatores nucleares até caracterização da poluição ambiental. Em energia eólica, pode ser usado em diversos

componentes, como pás e torres. No caso em estudo, será utilizado para averiguação da dinâmica do vento no prédio selecionado.

O Windstation® é um software de fluidodinâmica computacional que simula fluxo de vento em topografia complexa. É uma ferramenta que resolve equações tridimensionais completas de Navier-Stokes. A simulação também inclui modelagem de turbulência. A rugosidade do solo pode ser inserida ou calculada através do modelo de perfil de velocidades (LOPES, 2010).

4.1.6 Extração de dados de curvas – G3data®

O g3data® é um software livre que permite a inserção de gráficos em diversos formatos de imagem e extrair os pontos de formação dos mesmos. Depois de obtidos os pontos no software é possível exportá-los em formatos de bancos de dados, podendo ser aproveitado os pontos para cálculos em outros softwares na forma de tabela (FRANTZ, 2010).

4.2 Local de estudo

A região de mangue situada entre os bairros de Boa Viagem, Pina e Imbiribeira, na Zona Sul da Cidade do Recife é denominada Parque Natural Municipal dos Manguezais Josué de Castro pelo Decreto-Lei Municipal Nº 25.565 de 1º de Dezembro de 2010 (COELHO, 2010). Esta região é o maior manguezal em área urbana do Brasil – com uma área de 212,84 hectares com seu centro situado, aproximadamente, na latitude -8,099º e longitude -34,899º – e consiste de uma Zona Especial de Preservação Ambiental (ZEPA). Atualmente esta área “[...] encontra-se ameaçada, por invasões, aterros e a degradação decorrente da poluição e despejos de esgoto das comunidades ribeirinhas e de condomínios da região.” (CÂMARA MUNICIPAL DO RECIFE, 2007).

Como forma de tentar preservar a área, várias instâncias do âmbito executivo, legislativo e judiciário – Agência Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Companhia Independente de Policiamento ao Meio Ambiente, Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana, Câmara Municipal, Prefeitura da Cidade do Recife, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente, Governo do Estado, Polícia Militar, Marinha do Brasil, Ministérios Públicos do Estado e da União – trabalham juntas para resolver os problemas da

região. Busca-se uma solução viável e que contribua para a preservação do meio ambiente no local, que atualmente é amplamente explorada pela carcinicultura (CÂMARA MUNICIPAL DO RECIFE, 2007). Uma opção de preservação é transformar o parque em um gerador de energia eólica, trazendo ao local segurança e desenvolvimento, sem afetar significativamente o ambiente local e ainda gerando energia limpa e renovável para a cidade.

4.3 Volumetria dos edifícios (3D)

No Recife, o Google Maps® utiliza fotografias de satélite disponibilizadas pelos satélites da empresa DigitalGlobe®. A Figura 25 mostra a parte do mosaico de imagens do Google Maps® onde se encontra a área de estudo.

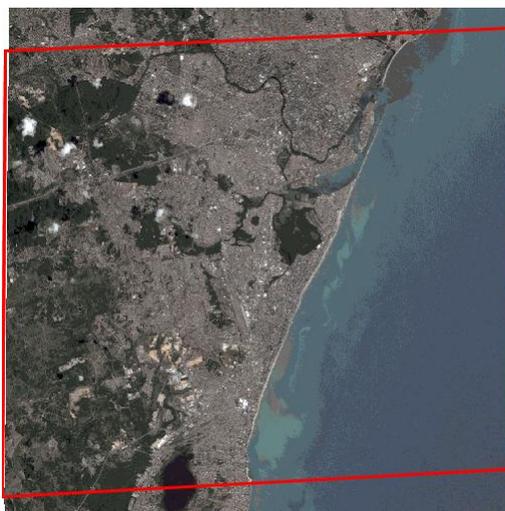


Figura 25 - Fotografia de satélite do Recife utilizada no estudo. Fonte: (DIGITAL GLOBE, 2010).

As fotos dos satélites dessas empresas podem ser feitas em alta resolução, porém, devida à baixa velocidade de rotação (15 voltas por dia na Terra, aproximadamente) e o grande número de requerimento dessas imagens, certos locais acabam sendo fotografados em baixíssima qualidade (SOARES, 2007). Esse é o caso do Recife, que possui fotos em uma menor resolução. Devido ao maior número de acessos da ferramenta em outras regiões, o Google® não possuía imagens de melhor resolução para a capital pernambucana.

Devido à falta de recursos para adquirir imagens com alta resolução, foram utilizadas as informações disponibilizadas gratuitamente na Internet por oferecer os dados necessários sem prejuízo da demonstração da proposta deste trabalho. No Recife, as imagens do Google Maps® são disponibilizadas com média resolução. A imagem utilizada (Figura 25) possui as características apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características da fotografia de satélite do Recife utilizada no estudo, adaptado de (DIGITAL GLOBE, 2007).

Fornecedor	DigitalGlobe
Satélite	Quickbird
Identificação no Catálogo	101001000572880A
Data da Captura	27 de janeiro de 2007
Latitude do Centro	-8,094°
Longitude do Centro	-34,933°
Ângulo de Inclinação Médio (β)	28°
Azimute Médio	79°
Sensor	QB02
Informação de Banda	Pan_MS1

4.3.1 Extração da altura dos edifícios

Ao se considerar uma fotografia aérea vertical, pode-se observar que as arestas próximas ao ponto nadir (ponto central e vertical da imagem) não apresentam deslocamento ou distorções. Porém, quando se afasta deste ponto, as arestas começam a apresentar um comportamento radial, de forma que, se prolongadas convergirão para o ponto nadir, conforme Figura 26.

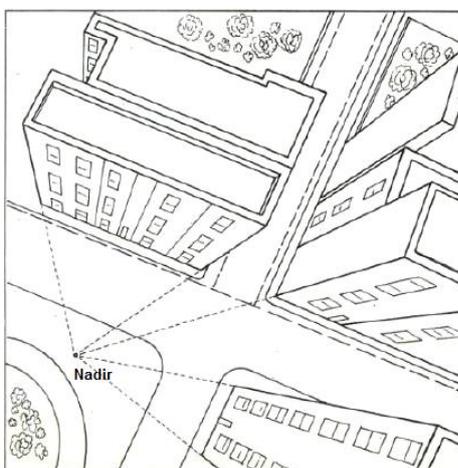


Figura 26 - Distorção dos edifícios em relação ao ponto nadir. Fonte: (DERMARQUI, HASEGAWA e GALO, 2008).

A aparência de inclinação do plano da imagem é diretamente proporcional à distância dos edifícios do ponto nadir e inversamente proporcional à altura do voo (DERMARQUI, HASEGAWA e GALO, 2008). A altura do edifício também influi em sua própria inclinação, sendo mais acentuada para edifícios mais altos e menos acentuada para os edifícios baixos (DERMARQUI, 2007). Não serão consideradas as distorções devido à curvatura da Terra por esta representar baixa influência nas coordenadas.

O ângulo das imagens de satélite do Recife favorece a extração das alturas dos edifícios. As arestas dos edifícios são facilmente visualizadas – devido ao ângulo da fotografia – e, portanto, medidas. Além dessa facilidade, a altura da órbita do satélite – conforme Tabela 7 – faz com que a diferença entre as alturas dos edifícios, devido a distorções causadas pelo comportamento radial das arestas seja insignificante fazendo com que os edifícios possuam uma relação de proporção linear entre suas alturas.

Tabela 7 - Informações sobre os satélites, alturas e fabricantes utilizados nas imagens do Google Maps® e Google Earth® (DIGITAL GLOBE, 2010) e (GEOEYE, 2010).

Satélite	Fabricante	Altura da órbita
GeoEye-1	GeoEye	680 km
IKONOS	GeoEye	680 km
Quickbird	DigitalGlobe	450 km

Desta forma, sabendo a altura de um edifício, medindo sua altura em pixels e por proporção simples, pode-se obter a altura de todos os edifícios em uma região. Por outro lado, pode prejudicar a extração dos topos que ficam distorcidos pelo ângulo das fotos.

Para a obtenção da altura dos edifícios, primeiro é identificada alguma aresta completamente visível no edifício. Com a identificação desta, a altura poderia ser calculada contando o número de pixels da base do edifício até o topo (isto corresponde ao c na Figura 27). Porém, devido à inclinação das arestas podem oferecer dificuldades e imprecisões extras no processo, então é utilizada a projeção da aresta no plano horizontal da imagem (o que corresponde ao a na Figura 27) para a obtenção destas alturas. A projeção vertical da altura do edifício corresponde ao b e o ângulo formado entre o cateto a e a hipotenusa ao α , conforme a Figura 27.



Figura 27 - Exemplo de dados de arestas coletados no edifício Saint Thomas em Boa Viagem, adaptado de (GOOGLE, 2010).

Onde,

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad (6)$$

Para estimar o erro deste processo e garantir que não interfira nos resultados, medem-se os ângulos – formados pelas respectivas arestas com o plano horizontal (ângulo α) – dos edifícios com altura conhecida nas proximidades do local e pertencentes a mesma fotografia. Para tal, foram escolhidos edifícios concluídos até 2006 – pois a imagem é de Janeiro de 2007 – localizados no Bairro de Boa Viagem, Tabela 8.

Tabela 8 - Edifícios ao longo de Boa Viagem e Pina concluídos até 2006 com altura conhecida no site Emporis®.

Nome do edifício	Andares	Ano	Altura Real (m)	Latitude	Longitude
Estação do Mar	41	2006	120	-8.135208	-34.901719
Porto Seguro	38	1997	117	-8.122739	-34.896687
Castelinho	35	2001	104	-8.128612	-34.898973
Castelo del Mar	35	2001	104	-8.128315	-34.898844
Rio dos Navegantes	33	2006	92	-8.117019	-34.894692
JCPM Trade Center	22	2006	84	-8.089493	-34.882150
Saint Thomas	24	2004	78	-8.140744	-34.905351
Saint John	24	2003	78	-8.140516	-34.905278
Empresarial Center III	20	2001	64	-8.117895	-34.903007
Saint Honoré	13	2004	43	-8.144204	-34.904970
Puerto Banus	13	1998	40	-8.106499	-34.887975

A distribuição espacial de oito desses edifícios – os outros três estão mais ao Sul da região de estudo – ao longo de Boa Viagem pode ser vista na Figura 28. O Castelinho e Castelo Del Mar formam um condomínio, por isso são representados apenas por uma seta. Os demais prédios estão localizados logo mais ao sul da Figura 28.



Figura 28 - Edifícios concluídos até 2006 ao longo de Boa Viagem com altura conhecida no site Emporis®, adaptado de (GOOGLE, 2010).

Com auxílio dos dados da Emporis® é possível fazer uma estimativa do fator de proporcionalidade, obtido pela razão entre o valor das arestas em pixels e a altura real conhecida dos edifícios em metros.

O ângulo foi calculado através do arcotangente da razão entre as projeções das arestas – calculadas pela quantidade de pixels.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{b}{a} \quad (7)$$

Com isso, se todos os prédios da região em análise possuírem mesmo ângulo de inclinação, a aresta dos edifícios, em pixels, pode ser calculada como:

$$c = \frac{a}{\cos \alpha} \quad (8)$$

Uma dificuldade para encontrar a altura em pixels correta dos edifícios é devida à falta de arestas completas cortadas por outros edifícios ou pelas garagens das próprias edificações. Isso resulta em certo erro que não deve interferir no processo geral deste trabalho.

Ainda para o caso do ângulo α entre os edifícios ser o mesmo, uma forma de calcular a altura da imagem poder ser através de um fator de proporcionalidade f , obtido pela razão entre a altura real H e a quantidade de pixels medida na projeção horizontal a .

$$f = \frac{H}{a} \quad (9)$$

As alturas reais de edifícios podem ser conhecidas em fontes de informação específicas ou através de medição no local, como o site da Emporis®.

O fator é calculado para todos os edifícios de altura conhecida, na mesma imagem, e calculada a média do fator de proporcionalidade. Depois é obtido o maior cateto de todos os edifícios relevantes para a região em estudo e multiplicado pelo do fator de proporcionalidade médio. Um cálculo alternativo das alturas dos edifícios esta no APÊNDICE G.

4.3.2 Extração das formas (2D) dos edifícios

A princípio, as formas do topo dos edifícios podem ser obtidas pela Unibase Piloto. Como esta ainda é um projeto em andamento, possui muitas diferenças entre os contornos dos prédios com o que pode ser observado nas fotografias aéreas do Google Maps®, além de vários prédios ainda não constarem na Unibase Piloto mais atual. Por isso, os dados foram complementados, alterados ou corrigidos manualmente pelo uso das imagens de satélite.

Os contornos que não são iguais na Unibase Piloto em comparação com as imagens de satélite – sejam por não se encontrarem desenhados ou por serem diferentes dos vistos nas imagens – serão refeitos no Google Sketchup®.

Existe uma distorção devido ao ângulo da fotografia aérea. Esta distorção acontece porque o plano da fotografia não é perfeitamente paralelo ao plano do solo, como exemplificado na Figura 29.

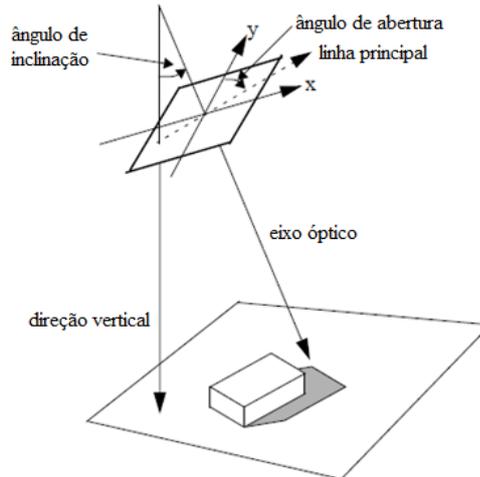


Figura 29 - Inclinação do plano de fotografia com relação ao objeto fotografado, adaptado de (LIN e NEVATIA, 1998).

A retificação é um processo que gera imagens perfeitamente verticais, com o plano da imagem paralelo ao plano fotografado e, assim, corrige as distorções de ângulo (DEMARQUI, 2007). No entanto, ainda não existem softwares comerciais que a corrijam, ficando as correções restritas a softwares do âmbito acadêmico e, portanto, inacessíveis.

Ainda assim, para garantir o controle dos erros, foi medida a largura e altura de alguns edifícios de Boa Viagem na Unibase Piloto (que possui os cortes sem distorções) e nos topos desenhados pelo Google Sketchup®, de modo a comparar a diferença entre estes.

A medição foi realizada em dois edifícios – cada uma com dimensões razoavelmente grandes em orientações perpendiculares entre si – de forma a minimizar os erros devidos à resolução da imagem. Após esse processo, o resto do procedimento para a obtenção das formas dos topos dos edifícios pode ser feito. Primeiro a imagem de satélite é localizada no Google Earth® e com isso podem ser importadas, já georreferenciadas, diretamente para o Google Sketchup®. Com a imagem, basta desenhar suas arestas para obter o desenho do topo dos edifícios, complementando os edifícios da Unibase Piloto.

4.4 Dados de vento

Parte dos dados de direção e velocidade do vento e temperatura do ar foi medida pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica da Universidade Federal de Pernambuco (CBEE/UFPE) na área de provas dos aerogeradores, localizado na cidade de Olinda-PE, no período compreendido entre Dezembro de 1996 e Dezembro de 1998 e contém o registro de velocidade, direção e temperatura do ar. O local fica nas coordenadas de latitude $-8,028^\circ$ e longitude $-34,861^\circ$.

Estes dados devem seguir o mesmo padrão dos ventos que podem ser encontrados na beira mar de Boa Viagem, pois o vento no local de coleta enfrenta baixa rugosidade por estar na frente do mar. Além disso, a distância (em linha reta) entre o local de medições e o de interesse desse estudo fica entre aproximadamente 8 e 10 km (do começo do Parque dos Manguezais ao final, respectivamente), Figura 30.

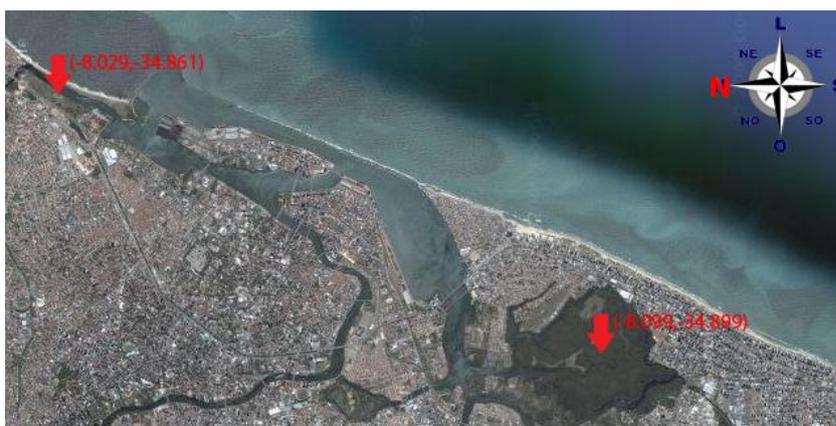


Figura 30 - Localização do aerogerador de Olinda e do Parque dos Manguezais, adaptada de (GOOGLE, 2010).

As medições foram realizadas a uma altura de 20m do nível do solo com uma taxa de amostragem de 1Hz, integradas e registradas a cada dez minutos. Os dados disponibilizados estão integrados em médias horárias.

Foram utilizados nas medições anemômetros de 3 copos Maximum #40 fabricado pela NRG Systems que mede velocidades de vento entre 1m/s e 96m/s com precisão de $\pm 0,1$ m/s (MELO, 2009).

Os dados obtidos com equipamentos operando em condições reais de campo podem apresentar muitas falhas e vazios. Para a série de Olinda, o ano de 1998 foi escolhido para esse estudo devido à menor perda dos dados coletados entre as séries disponíveis. Mesmo assim, neste ano da série histórica, ocorreram perdas de 273 amostras de registro referentes ao período de 6 a 17 de Abril e de 337 amostras de registro no período de 19 de Setembro a 3 de

Outubro, o que representou cerca de 6,9% do total dos dados (MELO, 2009). Os dados de 1998 foram complementados de modo que as características estatísticas da série fossem mantidas.

Também foi utilizada a série histórica de dados de vento disponibilizada gratuitamente pelo National Centers for Environmental Prediction e National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). A série está disponível em médias diárias de velocidades de vento em m/s nas direções zonal (Leste-Oeste) e meridional (Sul-Norte). São dados de vento já validados, obtidos a 10m de altura em relação à superfície e disponibilizados para o período desde Janeiro de 1948 até os dias atuais (NATIONAL OCEANIC & ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2010).

Os dados do NCEP/NCAR estão disponíveis para todo o mundo em coordenadas específicas. Para a obtenção de um dado para um local específico existem programas que interpolam os pontos mais próximos e levam em consideração as condições climáticas e de relevo local. Os dados para o Recife já foram obtidos devidamente tratados (ARAÚJO, 2010).

4.5 Dados de aerogeradores

Foram escolhidos aerogeradores de eixo horizontal (Westwind 5k) e dois tipos de eixo vertical – um Rotor-H (UGE-4k) e um Savonius (GALE 5) – para o cálculo da energia gerada por eles se fossem instalados no topo de um edifício, Figura 31. O aerogerador de eixo horizontal escolhido não é específico para a implantação no ambiente urbano, ao contrário dos de eixo vertical que se constituem a melhor opção para este meio – mais informações sobre os dois tipos de aerogeradores no APÊNDICE A.



Figura 31 - Da esquerda para direita os aerogeradores UGE-4k, GALE 5 e Westwind 5k. Fontes: (EVOLVE GREEN, 2010), (TANGARIE ALTERNATIVE POWER, 2010) e (WESTWIND WIND TURBINES, 2010).

Algumas das principais características desses aerogeradores podem ser vistas na Tabela 9.

Tabela 9 - Características dos aerogeradores UGE-4k (EVOLVE GREEN, 2010), GALE 5 (TANGARIE ALTERNATIVE POWER, 2010) e Westwind 5k (WESTWIND WIND TURBINES, 2010).

Característica	UGE-4k	GALE 5	Westwind 5k
Orientação do Eixo	Vertical	Vertical	Horizontal
Potência Nominal	4kW	5kW	5,5kW
Velocidade de Potência Nominal	12m/s	19m/s	14m/s
Velocidade de Partida	2,2m/s	1,5m/s	2m/s
Velocidade Cut-in	3,5m/s	1,9m/s	3m/s
Velocidade Cut-out	25m/s	-	-
Velocidade Máxima ou Embandeiramento	50m/s	-	17m/s
Diâmetro	2m	1m	5,1m
Altura (para eixo vertical)	3,6m	2m	-
Peso do Aerogerador com Gerador	190kg	386kg	200kg

Os valores de potência para as velocidades de vento do UGE-4k estavam disponíveis no site da Evolve Green® (EVOLVE GREEN, 2010) a intervalos de 1m/s a partir de 2m/s até 17m/s.

Para o GALE 5, só havia disponibilidade dos valores de potência em milhas por hora (mph) no site da Tangarie Alternative Power® (TANGARIE ALTERNATIVE POWER, 2010). Portanto, foi necessário fazer uma aproximação por interpolação pela equação de terceiro grau obtida por sobreposição das curvas:

$$P = 0,8463u^3 \quad (10)$$

Verificado os valores com os valores reais, o erro médio foi praticamente nulo (aproximadamente 0,007%). O GALE 5 produz sua máxima potência a 18,8 m/s (ou 42 mph). Com esses dados, podem-se obter os valores de potência para as velocidades em m/s para o intervalo desejado.

O fabricante do Westwind 5k só disponibiliza a curva de potência do aerogerador graficamente. Por isso foi necessário aproximar os valores através do software g3data®, de modo a reduzir o erro no processo manual.

As potências de saída (em watts) para cada velocidade de vento (em metros por segundo) dos aerogeradores UGE-4k, GALE 5 e Westwind 5k são dadas conforme Figura 32.

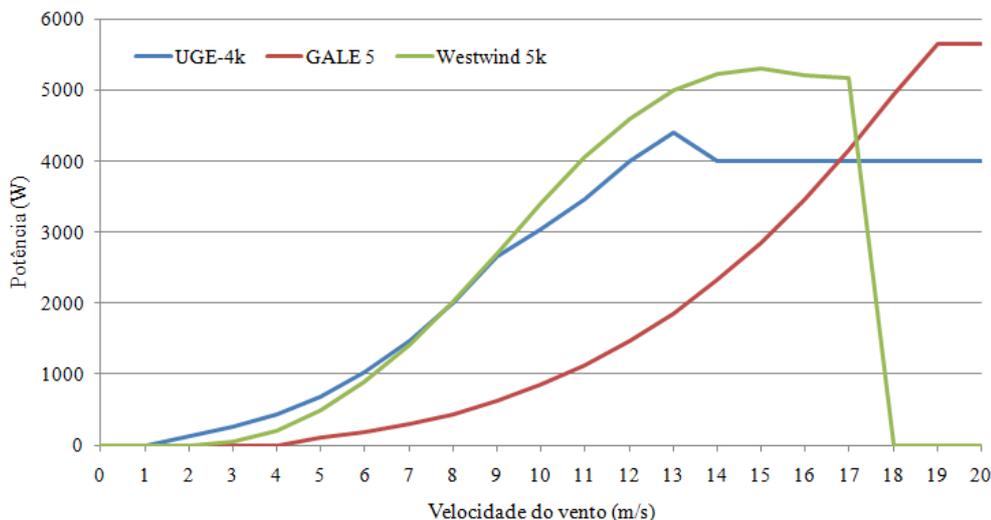


Figura 32 - Curvas de potência dos aerogeradores analisados.

As curvas de potência elétrica das máquinas analisadas vistas na Figura 32 foram elaboradas através dos dados da Tabela 48, que se encontra no APÊNDICE D.

4.6 Aplicação da metodologia ao estudo de caso

Primeiro, delimitou-se a área de estudo de acordo com a direção de vento predominantes no Recife, obtida através da média de dados do NCEP/NCAR. Foram importados para o Global Mapper® os dados da Unibase Piloto, das fotografias de satélites obtidas no Google Maps®, da topografia SRTM (que pode ser visto no ANEXO A) e o mapa das formas (2D) gerado a partir do Google Sketchup® – todos relacionados à área delimitada.

Com esses dados inseridos no software, foram obtidas as alturas dos edifícios na região como descrito na sessão 4.3.1. Essas alturas são inseridas nos seus respectivos dos elementos de forma, de maneira que possa ser exportado um mapa de elevação com a volumetria dos prédios e topografia do terreno. O mapa é então exportado (em formato Arc ASCII Grid) com uma alta resolução de malha para as situações com e sem edifícios.

No Windstation® são inseridos:

- O mapa de elevações do local, exportado em Arc ASCII Grid;
- Os dados de vento – em forma de estação meteorológica com uma velocidade de vento para cada altura, extrapoladas pela lei de Prandtl;
- A imagem de satélite – para ajudar na localização espacial dos elementos inseridos.

O mapa de rugosidades é elaborado através da observação na imagem de satélite dos diversos elementos – oceano, edificações baixas e altas e área de mangue – no próprio Windstation®. Além disso, são configuradas as condições climáticas – como estabilidade atmosférica –, a maior altura de simulação e as condições de parada da simulação.

Para garantir uma independência do cálculo quanto à malha, comparam-se diversos tamanhos de células – da maior a menor – até que os resultados sejam aparentemente os mesmos. Importante lembrar que quanto menor a célula da malha for maior a precisão obtida na simulação, mas, por outro lado, maior o tempo computacional para se obter as simulações. Estas simulações são feitas com a média anual do vento obtida nos dados do NCEP/NCAR, condições atmosféricas neutra – predominante no Recife – e a rugosidade urbana completa – mais complexo para simular.

Definida a malha ideal, são feitas as diversas simulações, visando a análise desejada. A primeira para obter o impacto dos edifícios na velocidade de vento no manguezal. Depois, as velocidades médias de vento para cada mês dos dados do NCEP/NCAR e os dados de estabilidade atmosférica são utilizados para encontrar o local com melhor potencial eólico. Encontrado este local, foi simulado os dados de vento do ano de 1998 em Olinda. Com estes dados, pode-se aplicar às curvas de potências de diversos aerogeradores para obter a energia que seria gerada caso estes fossem instalados nestes locais.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo mostra os principais resultados e análise dos dados de vento, da obtenção das formas e volumetrias das edificações e de outros parâmetros como estabilidade atmosférica e rugosidade urbana, além das simulações no ambiente urbano.

5.1 Dados do NCAR/NCEP

Com os valores de velocidades médias mensais históricas – zonal u e meridional v – do Recife do NCEP/NCAR, foram calculados o módulo da velocidade e a direção do vento. Os pontos da rosa dos ventos são referidos em termos do ângulo que fazem com o Norte (0°). Os resultados estão na Tabela 10.

Tabela 10 - Média mensal da direção e velocidade do vento para o Recife no período de 1948 a 2004, dados adaptados do (KALNAY, KANAMITSU, *et al.*, 1995).

Mês	Componente Zonal u (m/s)	Componente Meridional v (m/s)	Velocidade de Vento (m/s)	Direção ($^\circ$)
Janeiro	-6,18	1,89	6,46	163
Fevereiro	-5,67	1,69	5,92	163
Março	-5,27	1,51	5,48	164
Abril	-5,13	2,03	5,52	158
Mai	-5,52	2,97	6,27	152
Junho	-5,93	3,89	7,09	147
Julho	-6,17	4,34	7,54	145
Agosto	-6,56	4,60	8,01	145
Setembro	-6,83	4,00	7,92	150
Outubro	-6,98	2,86	7,54	158
Novembro	-7,00	2,07	7,30	164
Dezembro	-6,73	1,91	7,00	164

Levando em consideração a quantidade de dias de cada mês, a média anual histórica é de 6,78m/s a 10m e a direção predominante é 155° .

5.2 Dados de Olinda

O ano de 1998 foi complementado mantendo as características estatísticas da série (MELO, 2009). As velocidades e direções parâmetros do vento para cada mês da série estão na Tabela 11.

Tabela 11 - Características do vento de Olinda em 1998.

Mês	Velocidade (m/s)	Direção (°)
Janeiro	4,78	76.99
Fevereiro	5,32	84.93
Março	5,14	103.47
Abril	4,77	150.95
Maio	5,72	123.91
Junho	6,25	152.04
Julho	5,80	159.40
Agosto	5,76	124.59
Setembro	5,74	122.96
Outubro	5,93	116.05
Novembro	5,71	77.68
Dezembro	5,99	86.99

A média anual da velocidade de vento para Olinda em 1998 foi de 5,65m/s e a direção predominante de 113°.

Os dados foram isolados em caixas de contagem, começando pelo intervalo de 0 a 1,5m/s e depois fazendo acréscimos de 1m/s aos intervalos, conforme (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998). Cada intervalo na Tabela 12 representa uma velocidade e contém um determinado número de ocorrências em horas.

Tabela 12 - Intervalo de velocidades de vento e número de ocorrência em horas para Olinda-PE em 1998.

Intervalo (m/s)	Velocidade Representada (m/s)	Número de Ocorrências (horas)
0,0 - 1,5	1	243
1,5 - 2,5	2	321
2,5 - 3,5	3	409
3,5 - 4,5	4	1047
4,5 - 5,5	5	2007
5,5 - 6,5	6	2144
6,5 - 7,5	7	1519
7,5 - 8,5	8	690
8,5 - 9,5	9	294
9,5 - 10,5	10	72
10,5 - 11,5	11	10
11,5 - 12,5	12	3
12,5 - 13,5	13	1

Com os dados divididos por faixa de velocidade, obtém-se o histograma das velocidades de vento para o período, Figura 33, que dá ideia da distribuição do vento para Olinda no ano de 1998.

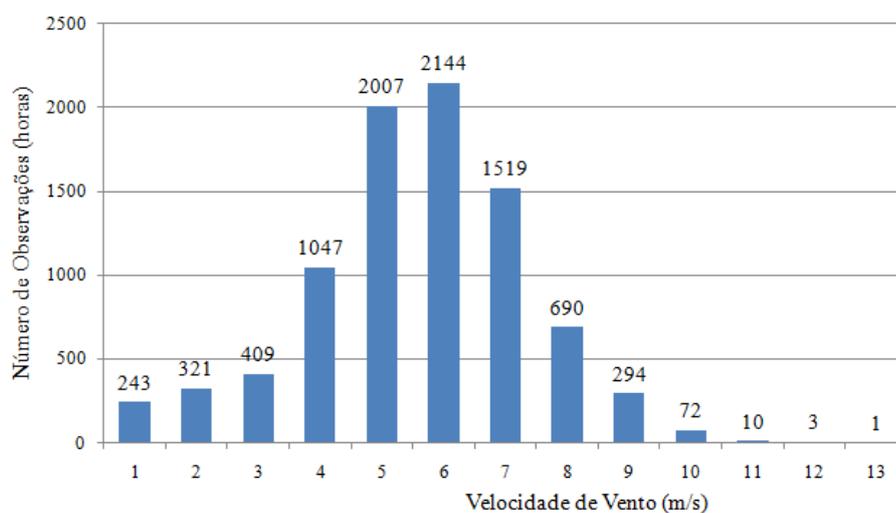


Figura 33 - Histograma do número de horas de observações derivado do método das caixas de contagem para o vento de Olinda-PE em 1998.

Os dados também foram divididos em 12 setores, cada um abrangendo representando uma direção do vento. A direção de maior energia disponível é de 120° com quase 40% da energia do vento, conforme Figura 34.

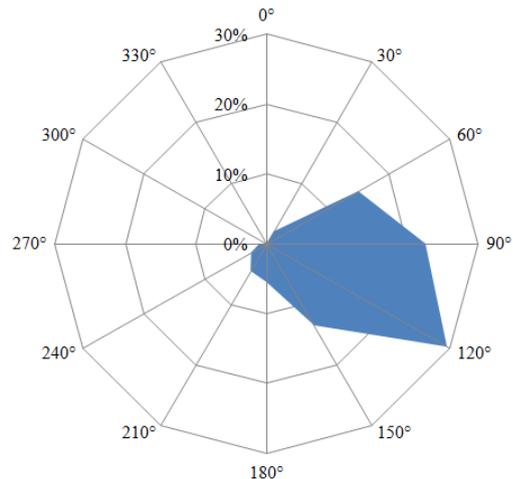


Figura 34 - Frequência da direção do vento em Olinda em 1998.

Os dados de vento divididos em caixas de contagem para a velocidade e direção de vento estão no APÊNDICE C.

5.3 Comparação entre os dados de vento

Os dados da série de Olinda são capturados através de anemômetros e representam a velocidade real de vento para o ano de 1998, naquela localidade, a 20m de altura. Os dados do NCEP/NCAR são feitos por métodos numéricos através de inúmeros dados de vento para o período de 1948 até a atualidade a 10m de altura.

Para fazer a comparação é necessário extrapolar os dados para a mesma altura, aplicando a lei da potência, equação (3). No caso, as velocidades de vento da série histórica foram estimadas para 20m. Sabendo que para condições de estabilidade atmosférica neutra – veja item 5.9 – o coeficiente α é igual a 0,11 (HSU, MEINDL e GILHOUSEN, 1994).

A média anual histórica das velocidades de vento para o NCEP/NCAR foi de 7,32m/s a 20m. Portanto a média anual de Olinda em 1998 a 20m está 1,67m/s abaixo da média histórica e a direção desviada em 42°. Também é possível fazer uma comparação entre as médias das velocidades mês a mês, Figura 35.

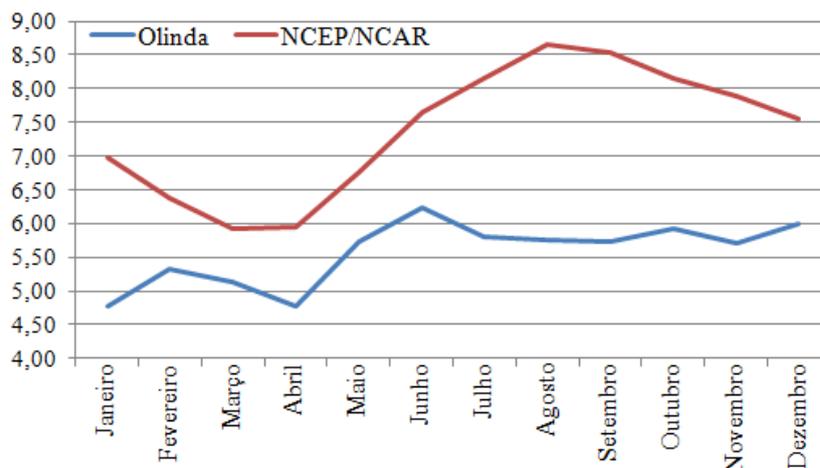


Figura 35 - Comparação entre as velocidades de vento de Olinda e do NCEP/NCAR mês a mês.

As duas séries de vento seguem aproximadamente a mesma tendência, com exceção dos ventos entre Julho e Setembro, onde divergem muito na tendência. A série de Olinda possui velocidades de vento bem menores que a série histórica. Essa diferença na intensidade do vento provavelmente deve-se ao fenômeno do El Niño – fenômeno que provoca a diminuição dos Ventos Alísios, predominantes na região Nordeste do Brasil – que teve intensidade forte no ano de 1998 (SILVA, 2003).

5.4 Delimitações da área de estudo

Foi escolhida arbitrariamente uma delimitação do campo de escoamento de interesse que contivesse a região do Parque dos Manguezais de acordo com as direções predominantes do vento, Figura 36.



Figura 36 - Área de estudo com o local onde estão os edifícios escolhidos delimitada pelas linhas vermelhas.

A região de estudo ficou então delimitada no Global Mapper® – em coordenadas do Sistema Universal Transverso de Mercator (UTM) –, conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Delimitações da região de estudo em coordenadas UTM.

Direção	Coordenada UTM
Norte	9105470,20353197
Oeste	289597,611030297
Sul	9100926,34399915
Leste	293065,293305339

Nem todos os edifícios de altura conhecida na Tabela 8 estão contidos na região de simulação. Outros edifícios mais altos podem ser encontrados após a verificação da altura dos edifícios.

5.5 Altura dos edifícios

Todos os edifícios construídos até 2007 e com altura conhecida no site da Emporis® tiveram seus dados calculados – pois a foto utilizada do Google Maps® foi feita em Janeiro de 2007. Além disso, foram escolhidos apenas os prédios da região de Boa Viagem, devido à inclinação da fotografia. Medindo os dois catetos foi possível averiguar o ângulo α da Equação 8 e módulo da altura c dos edifícios de altura conhecida da Equação 9, Tabela 14.

Tabela 14 - Projeções horizontais e verticais, alturas (hipotenusas) e ângulos dos edifícios de altura conhecida em Boa Viagem.

Nome do edifício	Projeção horizontal b (px)	Projeção vertical a (px)	Altura c (px)	Ângulo α (em graus)
Estação do Mar	115	25	118	12,08
Porto Seguro	105	23	108	12,50
Castelinho	102	22	104	12,11
Castelo del Mar	102	22	104	12,11
Rio dos Navegantes	88	19	90	12,30
JCPM Trade Center	81	18	83	12,24
Saint Thomas	73	16	75	12,09
Saint John	73	16	75	12,09
Empresarial Center III	61	13	62	12,43
Saint Honoré	42	9	43	12,38
Puerto Banus	40	9	41	12,61

O valor médio do ângulo dos edifícios é de $12,27 \pm 0,19^\circ$. Isso indica que todos os edifícios devem estar na mesma fotografia por possuírem aproximadamente o mesmo ângulo. Com isso também é possível obter apenas um dos catetos – de preferência o maior, ou seja, o da projeção horizontal – para representar a hipotenusa, pois todos são proporcionais ao cosseno (e ao seno) do mesmo ângulo.

A resolução da imagem disponibilizada no site do Google Maps® não é informada. Para obter este valor, será feita duas medições da pista de pouso do Aeroclube de Pernambuco situada ao Norte do Parque dos Manguezais. A pista possui tamanho bem definido, é plana, está em solo e possui grandes proporções, fatores que ajudam a diminuir os erros dessa medição. A primeira medição é da quantidade de pixels horizontais e verticais na pista e a segunda é a da distância em metros através de ferramenta de medição disponibilizada pelo Google Maps®, Figura 37.



Figura 37 - Dimensões horizontal e vertical em pixels e total em metros da pista do Aeroclube.

Obteve-se 1017 pixels na vertical e 910 pixels na horizontal e 803,536 metros para o comprimento da pista.

$$\text{ângulo de inclinação} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{pixels vertical}}{\text{pixels horizontal}} \right) \quad (11)$$

Obteve-se entre a pista e o plano horizontal da imagem um ângulo de 48,18°. Portanto, as dimensões na vertical e horizontal em metros podem ser calculadas através do seno e cosseno do ângulo, respectivamente. A vertical mede 598,8m e a horizontal 535,8m. A resolução é calculada em 1,698 pixels/metro para a imagem de 27 de Janeiro de 2007.

Fazendo a razão entre a altura real e o cateto da projeção horizontal, obtém-se o fator de proporcionalidade para cada edifício, Tabela 15.

Tabela 15 - Altura dos edifícios de Boa Viagem, cateto paralelo medido (em pixels) e fator de proporcionalidade.

Nome do edifício	Altura Real (m)	Cateto paralelo medido (px)	Fator de proporcionalidade
Estação do Mar	120	115	1,043
Porto Seguro	117	105	1,114
Castelinho	104	102	1,020
Castelo del Mar	104	102	1,020
Rio dos Navegantes	92	88	1,045
JCPM Trade Center	84	81	1,037
Saint Thomas	78	73	1,068
Saint John	78	73	1,068
Empresarial Center III	64	61	1,049
Saint Honoré	43	42	1,024
Puerto Banus	40	40	1,000

O fator de proporcionalidade médio é de $1,044 \pm 0,031$. Aplicando este fator à altura de todos os edifícios estima-se uma altura em metros. Comparando com a altura real dos edifícios, obtêm-se os erros para cada edifício.

Tabela 16 - Características dos edifícios de Boa Viagem e suas alturas medidas (em pixels) e estimadas (em metros) e o erro da medição de acordo com o valor conhecido, adaptado de (EMPORIS, 2010).

Nome do edifício	Altura Real (m)	Altura Estimada (m)	Erro (%)
Estação do Mar	120	120	0,00%
Porto Seguro	117	110	5,98%
Castelinho	104	107	2,88%
Castelo del Mar	104	107	2,88%
Rio dos Navegantes	92	92	0,00%
JCPM Trade Center	84	85	1,19%
Saint Thomas	78	76	2,56%
Saint John	78	76	2,56%
Empresarial Center III	64	64	0,00%
Saint Honoré	43	44	2,33%
Puerto Banus	40	42	5,00%

O erro médio foi de $2,31 \pm 1,97\%$ – considerado baixo. O erro máximo para esses edifícios foi de 5,98%, um pouco acima dos 5% tolerados em análises de engenharia. Porém, como o erro médio é bem pequeno, o método geral deve ser validado.

Após definido os critérios de localização e altura mínima dos edifícios – maior que 12 metros ou, aproximadamente, 4 andares –, um total de 406 prédios foram medidos. Os valores de altura em pixel e a calculada em metros estão no APÊNDICE B. A Figura 38 apresenta um histograma onde as alturas dos edifícios são divididas em categorias de quatro andares cada.

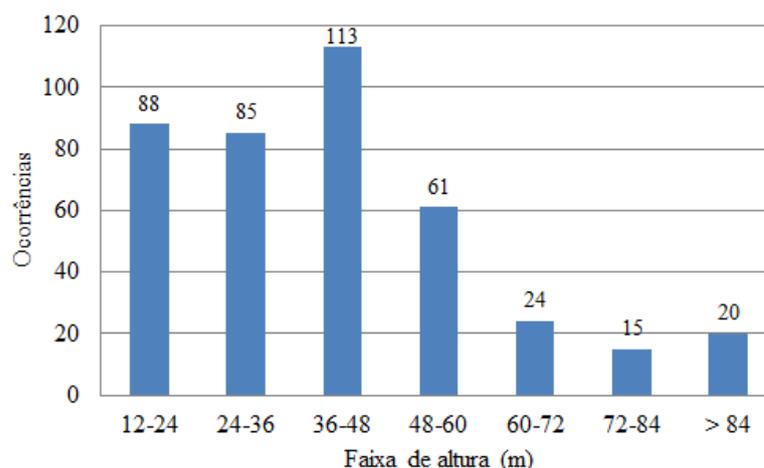


Figura 38 - Histograma das alturas dos edifícios de Boa Viagem.

Os edifícios mais baixos estudados possuem 13 metros de altura e o mais alto possui 116 metros – o Estação del Mar (120m) está localizado em Boa Viagem, porém não próximo o suficiente da região de estudo.

5.6 Formas (2D) dos edifícios

Primeiro foi comparada às dimensões das formas dos topos de alguns edifícios medidos com a ferramenta CAD na Unibase Piloto – considerada o valor real – e a medida em pixels – e posteriormente convertida em metros – na imagem de satélite do Google Maps®. Selecionou-se as maiores dimensões do Edifício Andalucia situado na Avenida Boa Viagem número 2454 e outro no Conjunto Residencial Pernambucano Bloco Jatinã de Baixo na Avenida Conselheiro Aguiar número 1350.

As dimensões na Unibase Piloto são medidas através da ferramenta interna dos programas de CAD – Autocad ou MicroStation, por exemplo – e o valor obtido de 58,4 metros para o Edifício Andalucia e de 25,8 metros para o Bloco Jatinã de Baixo, Figura 39.



Figura 39 - Imagem da Unibase Piloto para o Edifício Andalucia e o Bloco Jatinã de Baixo com os valores da medição em metros.

No Google Maps® foram medidas as distâncias horizontal e vertical da imagem em pixels. Como a resolução é de 1,698 pixels/metro é possível obter valor 56,1 metros para o Andaluçia e de 26,3 metros para o Bloco Jatinã de Baixo, Figura 40.



Figura 40 - Imagem do Google Maps® para o Edifício Andaluçia e o Bloco Jatinã de Baixo com valores das medições horizontal e vertical em pixels.

Os erros de medição foram de 4,07% e 2,08% para o Edifício Andaluçia e o Bloco Jatinã de Baixo, respectivamente. Valores pequenos que não devem influenciar no processo geral deste trabalho. O resumo dos valores obtidos pode ser observado na Tabela 17.

Tabela 17 - Resumo dos valores obtidos para o topo dos edifícios Jatinã de Baixo e Edifício Andaluçia.

	Bloco Jatinã de Baixo	Edifício Andaluçia
Horizontal (px)	20	81
Vertical (px)	40	50
Valor Calculado (m)	26,3	56,1
Valor Real (m)	25,8	58,4
Erro (%)	2,08	4,07
Ângulo com a horizontal (°)	63,4	148,3

Vale a pena observar que os edifícios estão orientados quase perpendicularmente um ao outro – a diferença entre o ângulo dos dois é de 84,9°.

Dado o baixo erro devido ao ângulo da imagem de satélite, foi possível complementar e corrigir a Unibase Piloto com o Google Sketchup® para incluir todos os edifícios da área de estudo. As formas dos topos destes edifícios estão destacados na Figura 41.



Figura 41 - Formas (2D) dos edifícios de Boa Viagem digitalizados com escala de altura.

5.7 Volumetria das Edificações (3D)

Após introduzir as formas dos edifícios no Global Mapper®, as alturas são atribuídas em cada edifício. Também foi inserida uma imagem da Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM) para obter o relevo aproximado da região. Aplicando a opção de visualizar em três dimensões pode-se ter idéia do resultado geral, Figura 42.

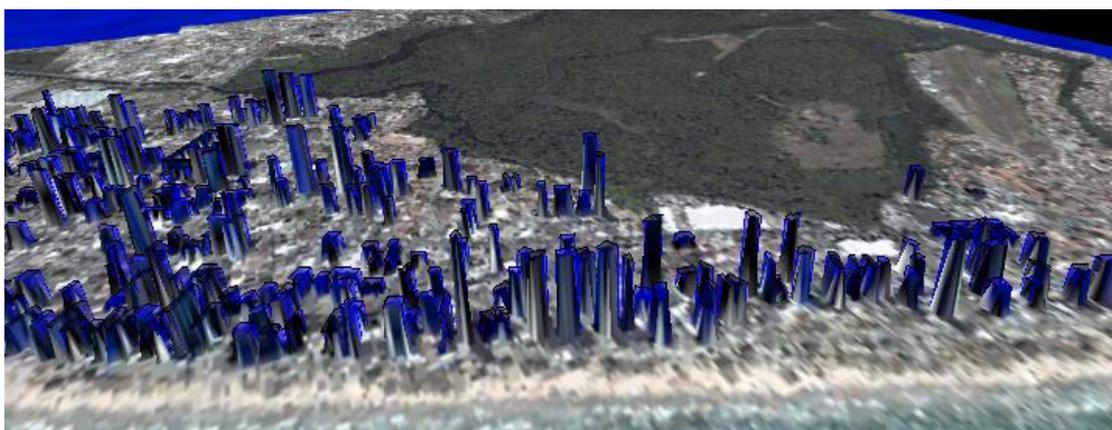


Figura 42 - Vista aérea do Parque dos Manguezais e da volumetria tridimensional das edificações em seu entorno de leste a oeste.

Pode-se comparar as edificações em três dimensões com uma fotografia aérea em ângulo parecido, Figura 43.



Figura 43 - Fotografia aérea da área do Parque dos Manguezais e das edificações em seu entorno de leste a oeste. Fonte: (BRAGA, SELVA e JUNIOR, 2008).

A opção de “exageração vertical” do Global Mapper® pode causar distorções na visualização das alturas, porém os valores inseridos não se alteram.

5.8 Mapa de rugosidades

O mapa de rugosidades foi desenhado a partir do próprio Windstation®, levando-se em conta as diversas rugosidades da região de estudo, foram divididas em quatro categorias: oceano, mangue, pequenas edificações e prédios altos. Definida as diferenças, consultou-se a Tabela 3 para definir quais os valores de rugosidade para cada local, conforme Tabela 18.

Tabela 18 - Rugosidades do terreno na área de estudo.

Local	Descrição do Terreno	z_0(m)	Cor
Oceano	Mar aberto e calmo	2×10^{-5}	Azul
Parque dos Manguezais	Floresta e mata	0,5	Verde
Arredores do Parque	Subúrbios	1,5	Amarelo
Orla de Boa Viagem	Centros de cidades com prédios altos	3	Vermelho

O programa só aceita valores de rugosidade entre 0,01m e 50m, portanto, o menor foi utilizado como valor para “mar aberto e calmo”.

Assim, através da visualização da imagem de satélite, constituiu-se o mapa de rugosidades para o cenário atual e para a possibilidade de que não houvesse edifícios, Figura 44.

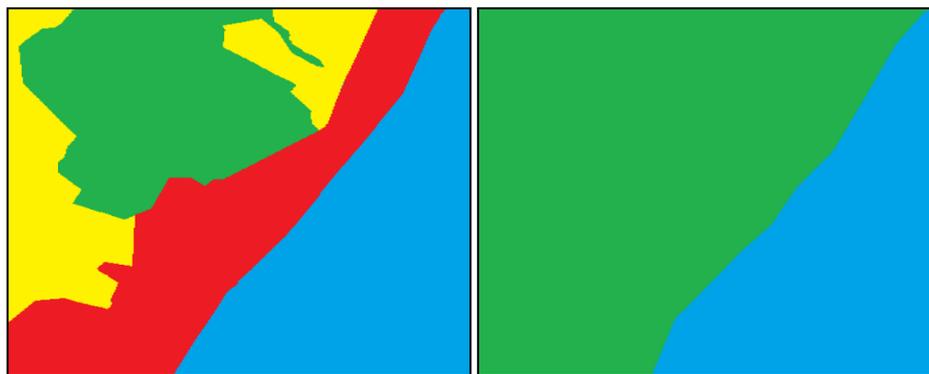


Figura 44 - Mapas de rugosidades da região de Boa Viagem para o cenário atual e para a possibilidade de que não houvesse edifícios.

5.9 Estabilidade atmosférica

O WindStation® possui parâmetros definidos para a condição de estabilidade atmosférica. A cada mês, há um nível de insolação, nebulosidade e velocidades de vento diferentes. O gráfico da insolação do Recife, encontrada no INMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010) é apresentado na Figura 45.

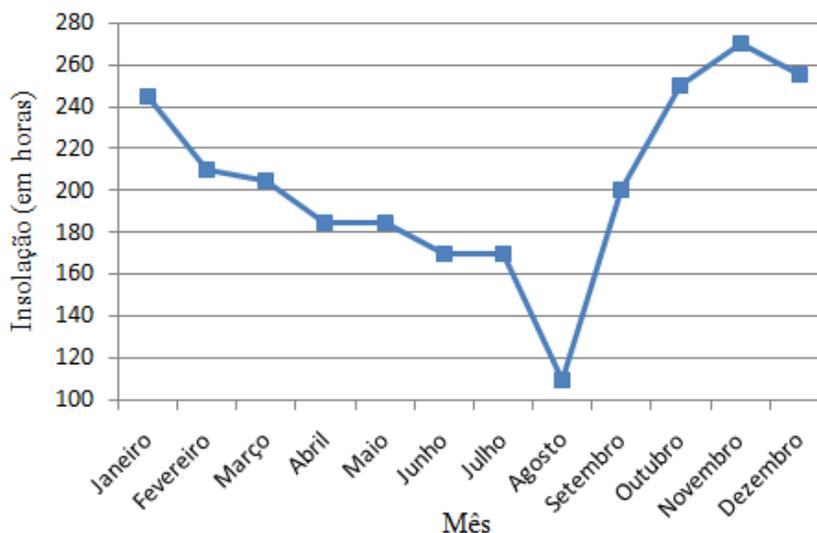


Figura 45 - Média de horas mensais de insolação do Recife no período de 1961 a 1990, adaptado de (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010).

Observa-se que há um alto índice de insolação nos meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro para a cidade do Recife.

A nebulosidade não foi encontrada para esta cidade na página do INMET em valores numéricos, entretanto, nos Normais Climatológicos, pôde-se obter uma aproximação das médias mensais de 1961 a 1990 pelos mapas de nebulosidade, ANEXO B.

Apesar da imprecisão dos dados, como todas as médias de velocidade de vento são acima de 5 m/s, então o parâmetro de nebulosidade não terá muito efeito na estabilidade

atmosférica, vide Tabela 5. Localizando aproximadamente a cidade do Recife nas Normais Climatológicas, ANEXO B, podem-se obter os valores de nebulosidade, conforme Tabela 19.

Tabela 19 - Média mensal do nível de nebulosidade de Pernambuco para o período de 1961-1990 através de normais climatológicos.

Mês	Nebulosidade	Classificação
Janeiro	7/10	Alta
Fevereiro	7/10	Alta
Março	7/10	Alta
Abril	7/10	Alta
Maio	7/10	Alta
Junho	7/10	Alta
Julho	7/10	Alta
Agosto	7/10	Alta
Setembro	7/10	Alta
Outubro	6/10	Alta
Novembro	6/10	Alta
Dezembro	7/10	Alta

Todos os valores são acima de 4/8, portanto, a nebulosidade é sempre alta para a cidade do Recife.

Portanto, devido aos parâmetros de velocidade de vento, insolação e nebulosidade, será considerada uma condição atmosférica pouco instável para os meses de outubro a janeiro no período diurno, e uma condição atmosférica neutra para o período noturno e para os demais meses do ano, conforme Tabela 20.

Tabela 20 - Condição de estabilidade atmosférica mensal nos períodos diurno e noturno para o Recife.

Mês	Velocidade de Vento (m/s)	Condição de Insolação Diurna	Condição de Nebulosidade Noturna	Estabilidade Atmosférica	
				Diurna	Noturna
Janeiro	6,46	Forte	Alta	Pouco instável	Neutra
Fevereiro	5,92	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Março	5,48	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Abril	5,52	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Maio	6,27	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Junho	7,09	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Julho	7,54	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Agosto	8,01	Fraca	Alta	Neutra	Neutra
Setembro	7,92	Moderada	Alta	Neutra	Neutra
Outubro	7,54	Forte	Alta	Pouco instável	Neutra
Novembro	7,30	Forte	Alta	Pouco instável	Neutra
Dezembro	7,00	Forte	Alta	Pouco instável	Neutra

5.10 Simulações dos fluxos eólicos

Para a simulação, as delimitações da área de cálculo no Windstation® foram de acordo com a Tabela 21.

Tabela 21 - Delimitações da região de cálculo em coordenadas UTM.

Direção	Coordenada UTM
Norte	9105440
Oeste	289727,6
Sul	9101640
Leste	292357,6

Esta área está inclusa na área de estudo, sem perdas de edifícios ou área de mangue, partes importantes deste trabalho, conforme retângulo vermelho na Figura 46. A área total de simulação é de 9,99km² – equivalente a 2.630m no eixo Leste-Oeste por 3800m no norte-sul.



Figura 46 - Delimitações da área de estudo para a simulação geral.

São definidos alguns parâmetros de convergência escolhidos como se pode ver na Tabela 22.

Tabela 22 - Parâmetros de convergência.

Parâmetro	Valor
Precisão	1×10^{-4}
Máximo de Interações	200
Ajuste Z	70
Sub-relaxação	2

A precisão definirá o critério de convergência para todos os resíduos; o máximo de interações define quando o programa deverá parar de simular mesmo sem ter convergido; o ajuste Z estabiliza a convergência para as diferenças de altura de um terreno acidentado; e o valor de sub-relaxação equivale a um parâmetro de uma das equações internas do programa. É

importante usar valores altos de ajuste z e baixos de sub-relaxação para terrenos com topografias íngremes e acidentadas, como é o caso da cidade com vários edifícios, porém isso tornará a simulação mais lenta (LOPES, 2010).

Uma estação anemométrica fictícia com a velocidade média anual foi colocada em um local arbitrário no oceano, de forma que as delimitações da região de cálculo não interferissem no fluxo do vento, Tabela 23.

Tabela 23 - Coordenadas UTM da estação anemométrica da média anual.

Direção	Coordenada UTM
X	292326,9
Y	9101688

Nessas estações serão colocados os dados de vento com intervalos de 1m/s para a simulação do vento de Olinda, com a média anual para verificar a diferença do vento no Parque dos Manguezais, dada a existência dos edifícios, e mensal para a simulação da média histórica do vento.

Observou-se que a estabilidade atmosférica do Recife obedece apenas duas condições: neutra e pouco instável. Portanto, a simulação foi feita apenas com esses parâmetros, de acordo com a Tabela 24.

Tabela 24 - Correlação entre a estabilidade atmosférica e os valores de simulação.

Estabilidade Atmosférica	Valor
Neutra	-0,009°C/m
Pouco Instável	-0,01°C/m

5.10.1 Ajuste da malha de simulação

A primeira simulação foi para o ajuste da malha de simulação, na qual foram escolhidos diversos tamanhos de malhas de forma a obter a melhor aproximação dos resultados reais. Foi simulado sucessivamente com condição de estabilidade atmosférica neutra e utilizado a média anual histórica da velocidade e direção do vento do NCEP/NCAR. Os parâmetros que determinam o domínio do vento estão na Tabela 25, com exceção da malha horizontal.

Tabela 25 - Parâmetros do domínio do vento.

Parâmetro	Valor
Número de Planos Verticais	10
Máximo Vertical	416m
Mínimo Vertical	10m

Esses espaçamentos influenciam bastante na qualidade do cálculo e no tempo de execução da simulação. Por isso é importante a escolha que se adéque melhor a uma boa solução e não comprometa o tempo de simulação. Para a contraposição entre as diversas malhas, foram comparadas as velocidades máxima e mínima do vento e as coordenadas desses eventos a 50 metros de altura. Os resultados do ajuste da malha estão na Tabela 26.

Tabela 26 – Quantidade de nós de simulação e velocidades de vento com suas respectivas coordenadas UTM para as diversas malhas a 50m.

Malha (m)	Quantidade de nós	Vento Máximo			Vento Mínimo		
		Vel. (m/s)	UTM X	UTM Y	Vel. (m/s)	UTM X	UTM Y
50	41.580	8,69	291602,6	9102815	6,48	291552,6	9103615
30	113.920	8,87	291002,6	9101805	5,40	290882,6	9103035
20	255.940	9,43	290817,6	9101710	4,20	290837,6	9101770
14	519.520	9,66	290826,6	9101703	3,82	290882,6	9103019
10	1.014.600	10,24	290882,6	9101745	1,53	290842,6	9101755
8	1.586.500	10,34	290827,6	9101708	0,87	290883,6	9103012

As malhas menores que 8m por 8m não foram simuladas, pois não houve memória suficiente nos computadores disponíveis – a malha 2m por 2m, por exemplo, simula mais de 25 milhões de nós.

Uma análise visual das imagens geradas também é utilizada como parâmetro de comparação. A menor malha simulada – de 8m por 8m – para a velocidade e intensidade de turbulência do vento pode ser vista na Figura 47. Em todas as simulações, o ponto preto indica o local de maior valor da simulação de vento e o branco o menor – tanto para a velocidade de vento quanto para a intensidade de turbulência.

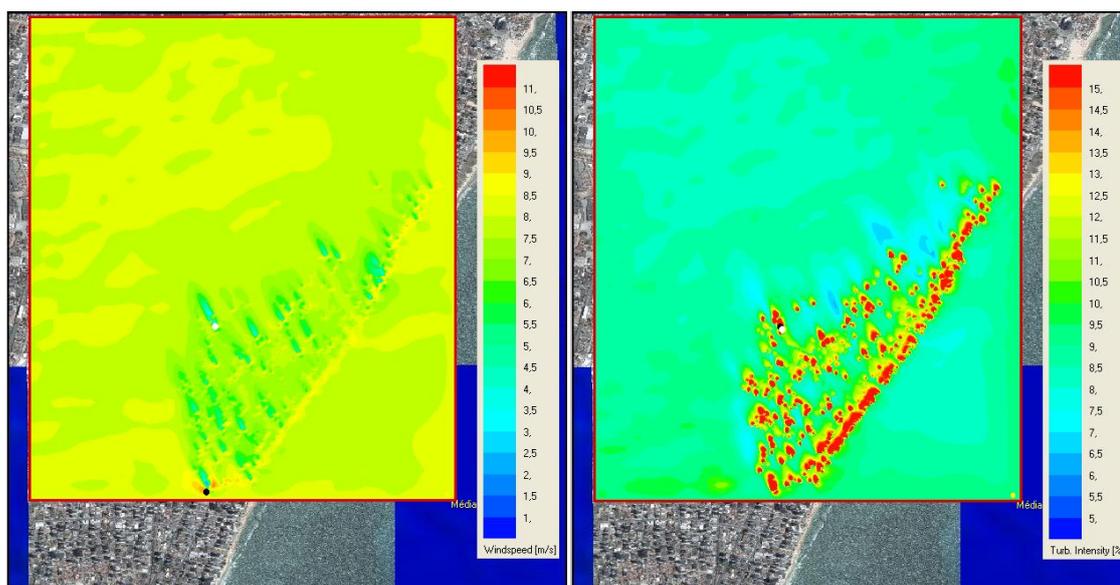


Figura 47 - Simulação da velocidade (esquerda) e intensidade de turbulência (direita) do vento com edifícios para a malha de 8x8 a 50m.

Os outros resultados visuais das malhas estão no APÊNDICE D.

Verificou-se que a diferença entre as máximas velocidades de vento entre as duas simulações foi de 0,98%. Apesar da diferença de 56,86% entre as velocidades mínimas, a diferença visual entre as duas imagens também é pequena, podendo apenas ser constatado um aumento no número de esteiras de edifícios (manchas azuis atrás das edificações). Essas pequenas diferenças já indicam um padrão de convergência dos resultados. Portanto, as simulações não executadas daí em diante apenas devem confirmar o resultado obtido e garantir pequenos ganhos de detalhamento das imagens. A diferença entre as velocidades mínimas se dá, principalmente, pela mudança de locais de baixo vento – influenciada pelo aumento de uma esteira em um prédio mais estreito que o outro.

No ponto de maior velocidade – na parte mais ao Sul da simulação –, os prédios estão alinhados de forma a receber o fluxo de vento quase de frente e canalizá-los pela cidade formando um cânion artificial, observar edifícios mais a esquerda na Figura 48.

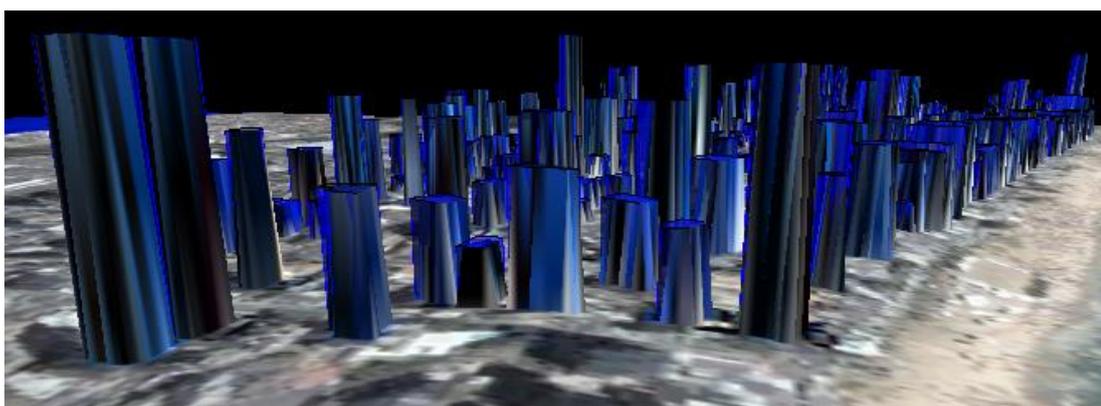


Figura 48 - Formação de um cânion artificial.

Porém, por se tratar de pontos no limite da área de simulação, não devem ser considerados por não conter os edifícios existentes ao redor deste ponto e não representados neste estudo.

5.10.1.1 Simulação sem edifícios

A simulação da região sem os edifícios é importante para avaliar o impacto dos mesmos no vento local. Esta simulação foi feita utilizando apenas a imagem da SRTM para levar em consideração a topografia local. Os parâmetros do ajuste Z e sub-relaxação foram alterados por serem utilizados para locais com terreno acidentado, o que não é o caso do Recife, Tabela 27.

Tabela 27 - Parâmetros alterados para a simulação sem os edifícios.

Parâmetro	Valor
Ajuste Z	25
Sub-relaxação	4

No entanto, essa simulação não representa perfeitamente como seria o Recife sem edifícios. Apesar de a cidade ser extremamente plana, a imagem da SRTM foi feita com os edifícios já existentes, levando ao aparecimento de pequenos morros artificiais. Mesmo assim, deve-se tratar de uma boa aproximação do caso da cidade sem edifícios. A simulação também foi feita para a malha de 8m por 8m, conforme Figura 49.

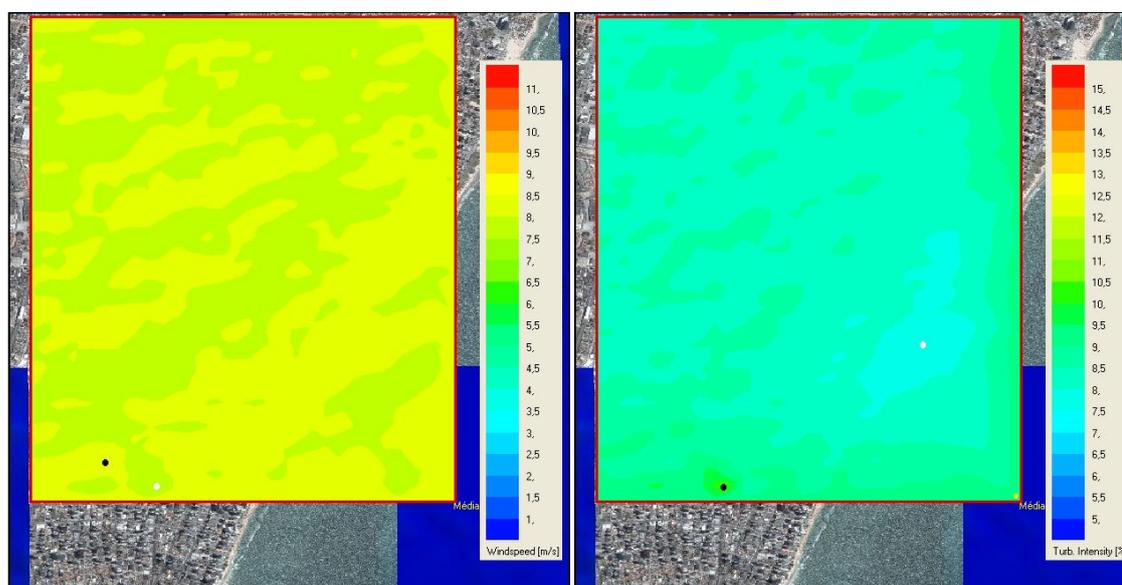


Figura 49 - Simulações da velocidade e intensidade de turbulência do vento sem edifícios para a malha de 8x8 a 50m.

5.10.1.2 Análise do impacto dos edifícios na região

Através da Tabela 28 é possível fazer uma comparação entre as velocidades máxima e mínima com a simulação com edifícios para a mesma malha de 8m por 8m.

Tabela 28 - Comparação entre as velocidades de vento nas simulações com e sem edifícios a 50m.

Simulação	Vento Máximo			Vento Mínimo		
	Vel. (m/s)	UTM X	UTM Y	Vel. (m/s)	UTM X	UTM Y
Sem Edifícios	8,4	290187,6	9101948	7,47	290507,6	9101764
Com Edifícios	10,34	290827,6	9101708	0,87	290883,6	9103012

O impacto dos edifícios – com a diminuição das velocidades e aumento na turbulência do vento – fica evidente após as duas simulações. Quando não há edifícios, as velocidades de

vento são mais constantes, variando apenas em uma faixa de 1m/s, enquanto que, quando são colocados estes obstáculos, varia em uma faixa de 10m/s.

Há também um aumento das manchas verdes – velocidades entre 7m/s e 7,5m/s – em todo o mapa quando se adiciona os edifícios. Porém, na área mais distante dos prédios, existe uma região de mancha amarela – velocidades entre 7,5m/s e 8m/s – muito semelhantes para ambas as simulações, mostrando uma área de recuperação da velocidade do vento.

Na parte frontal dos edifícios, há um aumento de velocidade com relação à velocidade média entre 0,5m/s e 1m/s, o que indica o efeito acelerador de vento nos prédios. Na região posterior, contudo, cria-se uma grande área de baixas velocidades de vento, inclusive com sua quase anulação em alguns locais.

A turbulência, na simulação com os edifícios, aumentou significativamente. Enquanto a intensidade máxima de turbulência para a simulação sem edifícios é de 10,24%, com edifícios esse valor chega a 86,52% - cerca de 8 vezes mais e inclusive maior que os valores típicos máximos de 77% –, conforme Tabela 29.

Tabela 29 - Comparação entre a intensidade de turbulência do vento nas simulações com e sem edifícios a 50m.

Simulação	Turbulência Máxima			Turbulência Mínima		
	Int. (%)	UTM X	UTM Y	Int. (%)	UTM X	UTM Y
Sem Edifícios	10,24	290515,6	9101756	7,51	291747,6	9102868
Com Edifícios	86,52	290883,6	9103012	5,07	290883,6	9103012

Além do mais, as diferenças entre velocidades e intensidade de turbulência do vento nas Figura 47 e Figura 49 são visíveis, principalmente na região dos edifícios. Nesta região, há um grande aumento na intensidade de turbulência. Nos demais locais o acréscimo é pequeno, e na região de mangue mais distante dos edifícios os valores são muito próximos.

5.10.1.3 Energia disponível no Parque dos Manguezais

É possível verificar que a energia eólica disponível no Parque dos Manguezais a 50m de altura está entre 1,78 e 2,66MWh/m² ao ano (respectivamente nas áreas verdes e amarelas), utilizando o valor da massa específica do ar 1,184kg/m³ – válido para temperatura de 25° e pressão de 1 atm. A turbulência no manguezal é pequena – principalmente na área mais distante dos edifícios –, credenciando a opção de geração em grande escala, a depender da viabilidade econômica dos aerogeradores.

5.10.2 Dados do NCEP/NCAR

Devido às limitações dos computadores e à velocidade computacional requerida, a área de estudo para os dados de vento do NCEP/NCAR foi limitada pelas coordenadas da Tabela 30, ou seja, somente para a área ocupada por edifícios.

Tabela 30 - Delimitações da região de cálculo para os dados NCEP/NCAR em coordenadas UTM.

Direção	Coordenada UTM
Norte	9104136
Oeste	290651,6
Sul	9101640
Leste	292355,6

A área total de simulação é de 4,25km² – equivalente a 1.704m no eixo Leste-Oeste por 2.496m no norte-sul – e pode ser vista na Figura 50.



Figura 50 - Delimitações da área de estudo para a simulação dos dados NCEP/NCAR.

Foi simulado o vento para todos os meses de dados do NCEP/NCAR com condição atmosférica neutra. Os resultados obtidos para as velocidades máxima e mínima estão na Tabela 31.

Tabela 31 - Velocidades máxima e mínima de vento para os edifícios de Boa Viagem para os dados NCEP/NCAR com condição atmosférica neutra.

Mês	Vento Máximo			Vento Mínimo		
	Vel. (m/s)	UTM X	UTM Y	Vel. (m/s)	UTM X	UTM Y
Janeiro	9,83	290879,6	9101748	1,19	290927,6	9102196
Fevereiro	9,02	290879,6	9101748	1,09	290927,6	9102196
Março	8,38	290879,6	9101748	0,97	290927,6	9102196
Abril	8,30	290831,6	9101708	1,16	290927,6	9102196
Maio	9,40	290831,6	9101708	1,30	291303,6	9103052
Junho	10,52	290879,6	9101756	1,40	291303,6	9103052
Julho	11,16	290879,6	9101756	1,51	291303,6	9103052
Agosto	11,87	290879,6	9101756	1,61	291303,6	9103052
Setembro	11,83	290831,6	9101708	1,63	291303,6	9101708
Outubro	11,38	290831,6	9101708	1,59	290927,6	9102196
Novembro	11,14	290879,6	9101748	1,29	290927,6	9102196
Dezembro	10,67	290879,6	9101748	1,24	290927,6	9102196

Nos meses que há condições atmosféricas pouco instáveis – o período diurno dos meses de Outubro a Janeiro – o parâmetro de estabilidade atmosférica foi alterado conforme Tabela 24. Novas simulações foram feitas e os resultados estão na Tabela 32. Para qualquer caso onde há condições atmosféricas diferentes da neutra, o WindStation® exige cálculo em domínio fechado – ou seja, com conservação da energia do sistema.

Tabela 32 - Velocidades máxima e mínima de vento para os edifícios de Boa Viagem para os dados NCEP/NCAR com condição atmosférica instável nos meses de Outubro a Janeiro.

Mês	Vento Máximo			Vento Mínimo		
	Vel. (m/s)	UTM X	UTM Y	Vel. (m/s)	UTM X	UTM Y
Janeiro	9,87	290879,6	9101748	1,37	290927,6	9102196
Outubro	11,44	290879,6	9101748	1,70	290927,6	9102188
Novembro	11,18	290879,6	9101748	1,51	290927,6	9102196
Dezembro	10,70	290879,6	9101748	1,45	290927,6	9102196

O mês de Outubro possui a terceira maior velocidade de vento para a condição de atmosfera neutra e a maior para a condição atmosférica pouco instável, Figura 51.

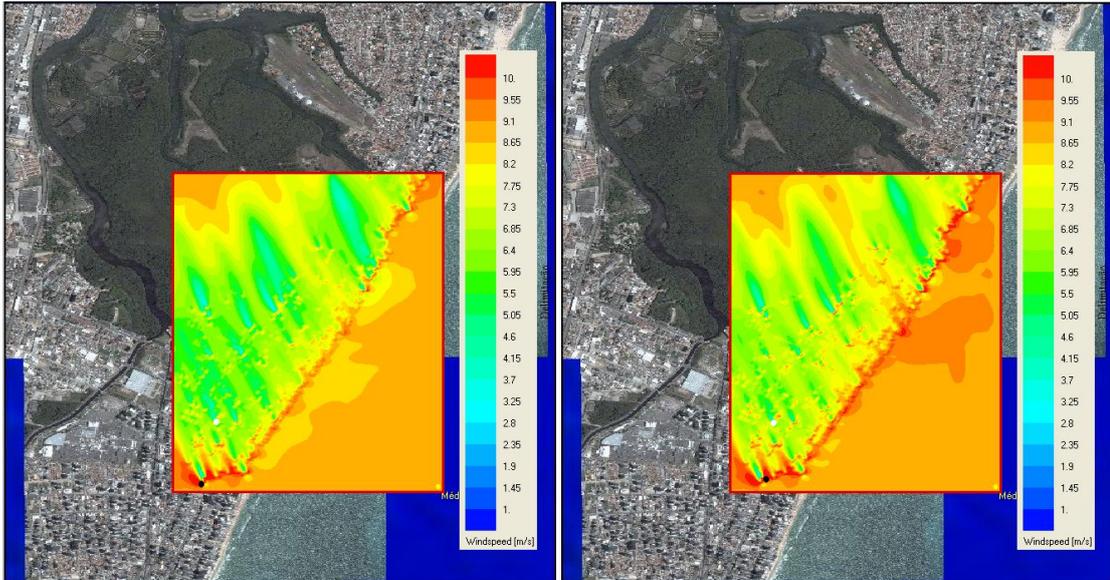


Figura 51 – Simulações para os dados do NCEP/NCAR para Outubro em condições atmosféricas neutra (esquerda) e pouco instável (direita).

Os outros meses estão no APÊNDICE F.

Para os meses de Outubro a Janeiro, observa-se que a velocidade média do vento aumenta quando há condições atmosféricas instáveis.

A parte inferior da simulação, onde estão as maiores velocidades de vento, não possui os prédios dos arredores do local e estão próximas aos limites de simulação, portanto, esses valores foram desconsiderados. Desconsiderando os ventos dessa região é possível encontrar as velocidades de acordo com a Tabela 33 para condições atmosféricas neutras.

Tabela 33 - Velocidades máxima e mínima de vento para os edifícios de Boa Viagem para os dados NCEP/NCAR com condição atmosférica neutra, desconsiderando região de simulação próxima as fronteiras da simulação.

Mês	Vento Máximo			Vento Mínimo		
	Vel. (m/s)	UTM X	UTM Y	Vel. (m/s)	UTM X	UTM Y
Janeiro	8,65	291887,6	9103212	1,19	290927,6	9102196
Fevereiro	7,93	291887,6	9103212	1,09	290927,6	9102196
Março	7,35	291887,6	9103212	0,97	290927,6	9102196
Abril	7,40	291887,6	9103212	1,16	290927,6	9102196
Maio	8,54	291879,6	9103212	1,30	290927,6	9102196
Junho	9,74	291879,6	9103212	1,40	291303,6	9103052
Julho	10,50	291879,6	9103212	1,51	291303,6	9103052
Agosto	11,16	291879,6	9103212	1,61	291303,6	9103052
Setembro	10,74	291887,6	9103212	1,63	290927,6	9102196
Outubro	10,16	291887,6	9103212	1,59	290927,6	9102196
Novembro	9,77	291887,6	9103212	1,29	290927,6	9102196
Dezembro	9,35	291887,6	9103212	1,24	290927,6	9102196

E de acordo com a Tabela 34 para condições atmosféricas pouco instáveis.

Tabela 34 - Velocidades máxima e mínima de vento para os edifícios de Boa Viagem para os dados NCEP/NCAR com condição atmosférica instável nos meses de Outubro a Janeiro, desconsiderando região de simulação próxima as fronteiras da simulação.

Mês	Vento Máximo			Vento Mínimo		
	Vel. (m/s)	UTM X	UTM Y	Vel. (m/s)	UTM X	UTM Y
Janeiro	9,50	291887,6	9103212	1,37	290927,6	9102196
Outubro	11,10	291887,6	9103212	1,70	290927,6	9102188
Novembro	10,75	291887,6	9103212	1,51	290927,6	9102188
Dezembro	10,28	291887,6	9103212	1,45	290927,6	9102188

Como a mudança maior na direção do vento ocorre nos meses de Junho, Julho e Agosto e a alteração do local de velocidade máxima de vento ocorre principalmente nesses meses, pode-se correlacionar a direção do vento com os locais onde há uma maior velocidade de vento. No Recife, as direções do vento variam pouco com os meses do ano.

Com essas simulações, é possível observar que há um maior acúmulo de vento – e um bom potencial eólico – na área onde há uma menor distância entre o mar e o mangue nesta região. Em específico, as velocidades de vento máximas foram encontradas próximas ao Edifício Tereza Novaes, o mais alto da região de simulação. Pode-se comparar os resultados das máximas velocidades de vento com a velocidade do NCEP/NCAR a 10 e 50m de altura, Figura 52.

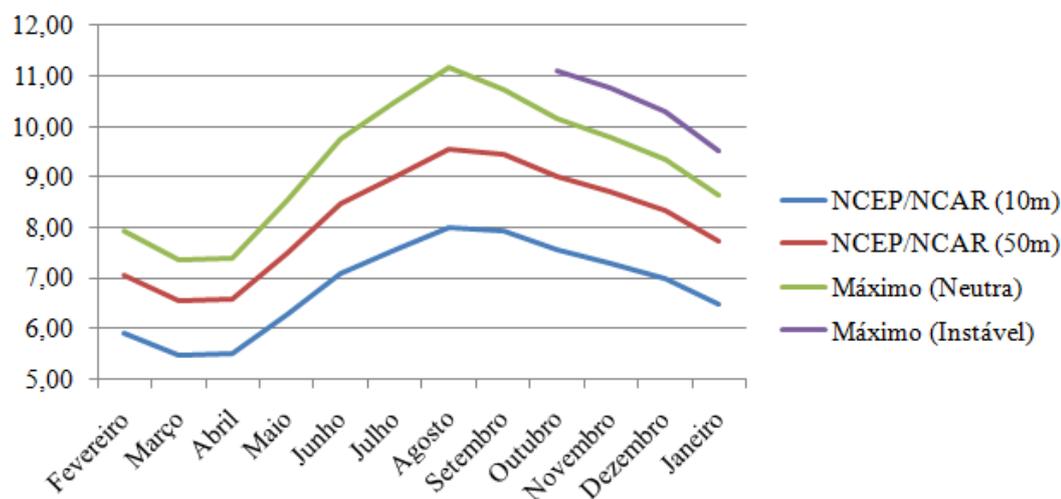


Figura 52 - Velocidades de vento máximas para os dados do NCEP/NCAR a 10m e extrapolado para 50m e as velocidades máximas obtidas pela simulação para condições atmosféricas neutra e pouco instável.

O mês de Janeiro foi deslocado para o final para obter uma curva contínua de dados quando há condição atmosférica pouco instável. Pode-se observar também que as máximas velocidades de vento – assim como para a comparação de imagens feita anteriormente – para as condições de atmosfera pouco instável são maiores que para neutra.

5.10.3 Dados de Olinda

Tomando como base os locais onde houve um bom potencial eólico obtido na sessão 5.10.2, foram simulados os ventos para cada um dos 12 setores de direção e dos 13 intervalos de velocidade (quando ocorriam para uma determinada direção) dos dados de Olinda nesta região delimitada pelas coordenadas da Tabela 35.

Tabela 35 - Delimitações da região de cálculo para os dados de Olinda em coordenadas UTM.

Direção	Coordenada UTM
Norte	9104100
Oeste	291337,6
Sul	9102780
Leste	292489,6

A área total de simulação é de 2,05km² – equivalente a 1.152m no eixo Leste-Oeste por 1.320m no norte-sul – e pode ser vista na Figura 53.



Figura 53 - Delimitações da área de estudo para a simulação dos dados de Olinda.

Com a diminuição da área de análise, as estações anemométricas que representaram os dados de Olinda foram realocadas para uma região interna às novas delimitações, Tabela 36.

Tabela 36 - Coordenadas UTM das estações anemométricas dos dados NCEP/NCAR.

Direção	Coordenada UTM
X	292456
Y	9102811

Aumentou-se também a quantidade de níveis verticais da simulação de 10 para 20. Desta forma, pode-se estudar com melhor precisão a influência dos ventos nas várias alturas dos edifícios.

Para 50m de altura com relação ao solo, velocidade de 6m/s e direção de 113°, a simulação resultou em velocidade máxima de 10m/s (nas coordenadas de latitude 291341,6 e longitude 9103008) e mínima de 1,36m/s (latitude 291565,6 e longitude 9103552), como pode ser visto na Figura 54.

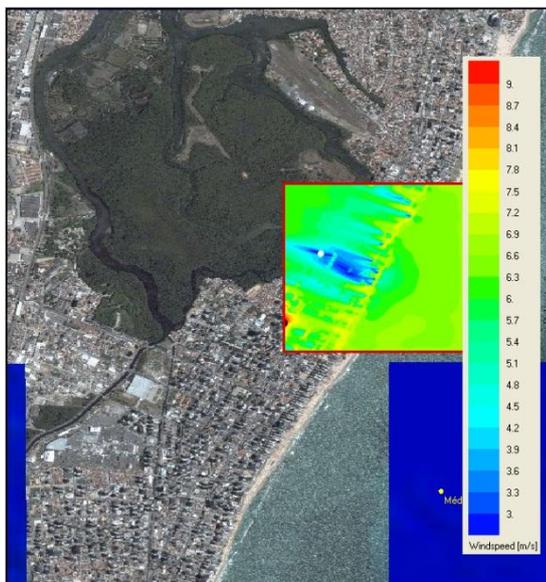


Figura 54 - Simulação para velocidade de vento com os dados de Olinda para ventos de 6m/s.

O valor de velocidade máxima está nos limites da simulação. Desconsiderando este local, os arredores do Edifício Tereza Novaes possuem as maiores velocidades de vento. Existe uma grande esteira – rastro de cor azul da Figura 54 – localizada detrás de cinco grandes edifícios com alturas de 79m, 90m, 93m, 95m e 116m – este último, o Edifício Tereza Novaes. É possível fazer um corte vertical entre dois pontos – com coordenadas disposta na Tabela 37 – de forma a aparecer todos esses prédios.

Tabela 37 - Pontos do corte vertical da simulação para os dados de Olinda.

Ponto	Coordenadas	
	UTM X	UTM Y
1	291855.9	9103159
2	291959	9103429

Com isso é possível traçar o diagrama vertical dos ventos no local, conforme Figura 55.

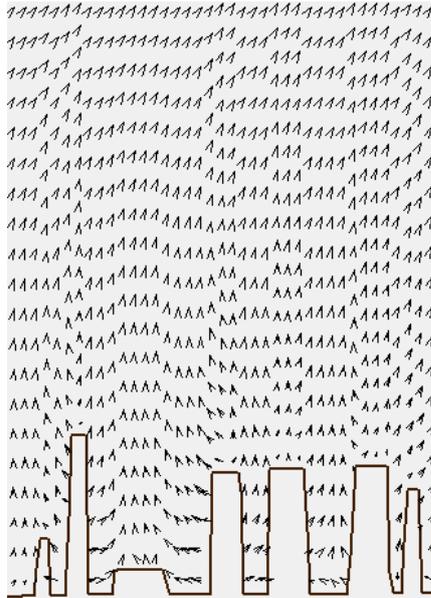


Figura 55 - Simulação em corte vertical em cinco dos maiores edifícios da região de estudo.

A vista tridimensional do local está na Figura 56.

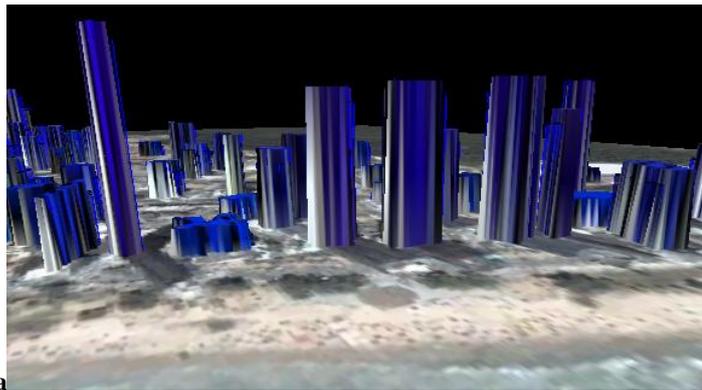


Figura 56 - Vista tridimensional de cinco dos maiores edifícios de Boa Viagem.

A intensidade de turbulência máxima na região chega a 52,47% a 50m de altura (na latitude 291349,6 e longitude 9103112) e a sua distribuição está na Figura 57.

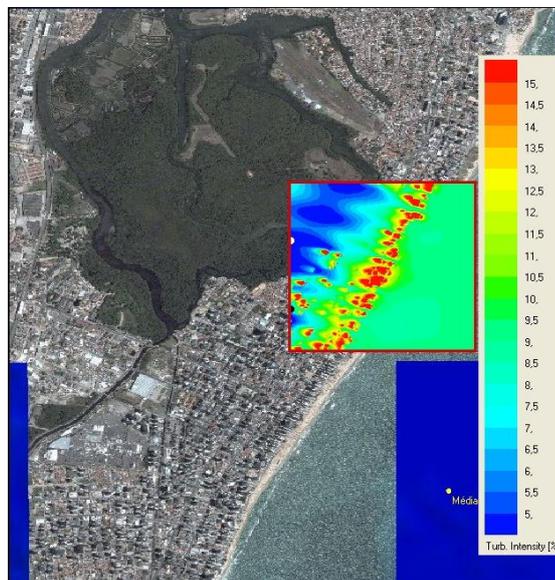


Figura 57 - Resultado da simulação para turbulência com os dados de Olinda para ventos de 6m/s.

Observando o comportamento do vento a 20m de altura, pode-se notar entre os dois edifícios laranja mais ao topo da Figura 58, um efeito concentrador do fluxo de vento, causado pelo posicionamento dos prédios e da direção do vento, acelerando o fluxo entre estas edificações. Neste local, encontra-se a velocidade de vento máxima da região, com valor de 7,83m/s – 30,5% a mais que a velocidade de entrada na mesma altura.

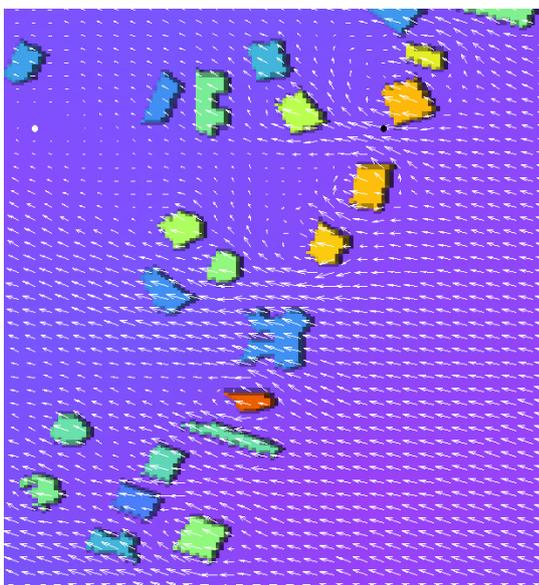


Figura 58 - Simulação com vetores representando as velocidades e direções do vento.

Essas peculiaridades de cada região urbana levam à necessidade da simulação em cada caso para identificar locais de máximas e mínimas velocidades de vento, onde possa ser avaliado, preliminarmente, o potencial eólico local.

5.11 Geração eólica nos edifícios

Foram simulados os fluxos eólicos sob os mesmos parâmetros da sessão 5.10.3 para as várias velocidades e direções do vento de Olinda, divididos conforme as tabelas do APÊNDICE C.

Considerou-se a instalação de um aerogerador com seu rotor instalado a 5m de altura do topo do edifício e afastado 1m de sua fachada. Tendo como base os locais de melhor velocidade de vento, foram escolhidos dois prédios: um de 116m (Edifício Tereza Novaes) – o mais alto da região – e outro de 24m (Edifício Casa Alta) – este ladeado pelo primeiro e por outro de 90m. Esses dados foram capturados nas coordenadas da Tabela 38.

Tabela 38 - Coordenadas de instalação do aerogerador.

Edifício	Altura (m)	Coordenadas	
		UTM X	UTM Y
Edifício Tereza Novaes	116	291880,6	9103203
Edifício Casa Alta	24	291894,8	9103243

Nesses pontos, obteve-se uma intensidade de turbulência média de 14% para o Edifício Tereza Novaes e de 28% para o Edifício Casa Alta e ambos alteraram a direção em 4%, em média. As velocidades de vento – médias de todas as direções ponderada pelo número de ocorrências – para os dois locais estão na Tabela 39.

Tabela 39 - Velocidades de vento para os pontos de instalação do aerogerador correlacionada à velocidade original.

Velocidade de vento (m/s)		
Olinda	Tereza Novaes	Casa Alta
1	0,90	0,75
2	1,84	1,45
3	3,03	2,58
4	4,17	3,77
5	5,29	4,87
6	6,36	5,85
7	7,35	6,89
8	8,30	7,75
9	9,39	8,83
10	10,59	10,25
11	11,65	10,97
12	12,73	12,52
13	12,46	6,75

Para o Edifício Tereza Novaes, houve uma aceleração da velocidade de vento com relação à velocidade em Olinda – aumento da média em 4,84%. Já o Edifício Casa Alta sofreu um efeito contrário – redução da média em 3,23 %. Encontrou-se também uma intensidade de turbulência maior no Edifício Casa Alta, talvez por este estar ladeado de grandes edifícios, enquanto o Edifício Tereza Novaes está praticamente isolado em sua altura.

Os valores de velocidade de vento foram incluídos em intervalos de 1m/s com o primeiro intervalo com 1,5m/s (começando do zero), conforme o método das caixas de contagem, conforme (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998). O número de ocorrências foi replicado conforme a correlação dos dados com as velocidades de vento de Olinda. A mostra como ficou a distribuição.

Tabela 40 - Intervalo de velocidades de vento e número de ocorrência em horas para Olinda, Edifício Tereza Novaes e Edifício Casa Alta.

Intervalo (m/s)	Velocidade Representada (m/s)	Número de Ocorrências (horas)		
		Olinda	Edifício Tereza Novaes	Edifício Casa Alta
0,0 - 1,5	1	243	274	487
1,5 - 2,5	2	321	301	321
2,5 - 3,5	3	409	457	658
3,5 - 4,5	4	1047	1037	977
4,5 - 5,5	5	2007	2018	2421
5,5 - 6,5	6	2144	1693	1748
6,5 - 7,5	7	1519	1537	1256
7,5 - 8,5	8	690	842	259
8,5 - 9,5	9	294	272	430
9,5 - 10,5	10	72	251	162
10,5 - 11,5	11	10	65	30
11,5 - 12,5	12	3	9	9
12,5 - 13,5	13	1	4	2

Confrontando estes dados com as curvas de potência dos aerogeradores escolhidos, obtém-se a energia produzida para os dados de 1998 em Olinda nos dois edifícios, conforme Tabela 41.

Tabela 41 - Energia produzida pelos aerogeradores UGE-4k, GALE 5 e Westwind 5k em Olinda, no Edifício Tereza Novaes e no Edifício Casa Alta.

Local	Energia Produzida (kWh/ano)		
	UGE-4k	GALE 5	Westwind 5k
Olinda (20m)	8,819	1,604	7,600
Edifício Tereza Novaes	9,413	1,808	8,359
Edifício Casa Alta	8,217	1,506	6,990

A produção de energia no Edifício Tereza Novaes foi a melhor para os três aerogeradores, devido às maiores velocidades de vento no local. O aerogerador UGE-4k foi o que mais gerou energia, apesar de seu gerador ser de 4kW – ao contrário dos outros dois de 5kW. O Edifício Casa Alta possui um potencial eólico bem parecido ao de Olinda, não havendo perdas significativas na produção anual de energia para os aerogeradores escolhidos.

O UGE-4k gerou 7% a mais no Edifício Tereza Novaes do que em Olinda e 7% menos no Edifício Casa Alta comparando ao mesmo local. Para o GALE 5 e o Westwind 5k, o Edifício Tereza Novaes gerou 13% e 10% mais energia que em Olinda, respectivamente. Já as perdas do Edifício Casa Alta para estes dois aerogeradores foram de 6% e 8%, respectivamente.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para analisar o comportamento do vento em área urbana, especificamente no bairro de Boa Viagem na parte em frente ao Parque dos Manguezais no Recife, propondo um procedimento com ferramentas acessíveis e de fácil manuseio. Após a conclusão deste trabalho, houve repercussão em diversos meios de comunicação como pode ser visto no ANEXO C.

Os dados utilizados – referentes à Olinda no ano de 1998 e da série histórica do NCEP/NCAR – mostraram diferenças entre suas médias anuais, porém uma mesma curva de tendência. Por ter sido um ano afetado por um El Niño de grande intensidade, os dados de Olinda podem estar comprometidos para a análise do potencial eólico da região. Há ainda uma grande necessidade de se obter mais dados anemométricos para que os estudos de vento possam ser executados com maior certeza.

As condições de estabilidade atmosférica do Recife ajudam a propiciar ventos de boa qualidade para a região. Com a estabilidade predominantemente neutra, diminuem as fadigas causadas nos aerogeradores. Já nos poucos meses do ano em que a condição é pouco instável, favorece a maior extração de energia.

A metodologia desenvolvida revisou brevemente técnicas de fotogrametria para a extração de alturas dos edifícios com apenas uma fotografia aérea. Com a verificação de que as edificações na imagem possuíam ângulos parecidos ao longo de toda Boa Viagem, foi possível utilizar proporção simples para a obtenção dos valores das diversas alturas. Na nova imagem do Google Maps® (de 25 de Novembro de 2009) para o Recife, os edifícios de Boa Viagem possuem ângulos bem distintos entre si, devido à distorção relativa ao ângulo nadir e resultante proximidade da imagem aérea. Portanto, a metodologia de captura dos valores das alturas dos edifícios por meio de proporção direta se invalidaria para este caso. A formação de um banco de dados com as alturas dos edifícios – a exemplo do site da Emporis® – é de grande ajuda para este processo de estudo.

O desenho do topo dos edifícios foi facilitado pela ferramenta da Unibase Piloto. Seria mais proveitoso se a mesma estivesse atualizada e possuísse menos erros. Se este projeto da Prefeitura da Cidade do Recife for concluído, a modelagem tridimensional dos bairros ficará mais rápida e poderá se fazer um estudo mais completo das regiões onde verifica-se baixa circulação de ar e onde o aproveitamento do potencial eólico urbano possa ser executado.

A existência de edifícios em toda a orla de Boa Viagem gera um bloqueio ao vento na metade da área do Parque dos Manguezais mais próxima dos edifícios, sendo que na parte mais distante, o vento recupera sua velocidade e direção, além de reduzir a intensidade de turbulência. A energia disponível a 50m na região de mangue está entre 1,78MWh/m² ao ano e 2,66MWh/m² ao ano, entre as áreas onde há menores e maiores velocidades de vento, respectivamente. Entende-se que a criação de um parque de uso coletivo e com finalidade de preservação pode passar diretamente pela geração de energia renovável na região. Essa redução do potencial eólico no manguezal se dá porque logo atrás dos edifícios há esteiras com baixíssimas velocidades de vento – zonas de turbulência que podem se estender por até vinte vezes a altura dos obstáculos. Como há diversos edifícios na região, o baixo fluxo afeta uma grande área do parque.

Na parte frontal do topo dos prédios há uma aceleração do vento, tornando os locais bem atrativos à extração de energia eólica. Porém, os edifícios aumentam a intensidade de turbulência dificultando a extração de energia por meio de aerogeradores de eixo horizontal. Há ainda um efeito de diminuição da média do vento devido ao excesso de edificações na região.

No entorno dos edifícios, criam-se zonas de circulação de ar, e dependendo do posicionamento destes, podem ocorrer zonas de aceleração do fluxo de vento. Essas peculiaridades de cada região urbana levam à necessidade da simulação em cada caso para identificar locais de máximas e mínimas velocidades de vento, onde pode-se avaliar, preliminarmente, o potencial eólico local – visto que a medição *in loco* não deve ser dispensada.

O aerogerador de eixo vertical tipo Giromill (UGE-4k) foi o que produziu mais energia para todos os casos nas simulações feitas. O aerogerador de eixo horizontal (Westwind 5k) produziu próximo dos valores do Giromill, mas, por não ser adaptado ao ambiente urbano, poderá ter problemas de fadiga e perda de potência devido aos níveis elevados de turbulência – fatores não considerados no cálculo simplificado. Além disso, os níveis de ruído devem ser maiores para aerogeradores de eixo horizontal, gerando incômodos à vizinhança. O aerogerador de eixo vertical tipo Savonius (GALE 5) foi o que menos produziu energia, o que já era esperado por utilizar força de arrasto ao invés de sustentação para lhe dar propulsão. De qualquer modo, aerogeradores de eixo vertical geralmente são mais silenciosos e mais adaptados aos ambientes urbanos devido à natureza caótica dos ventos no local.

6.1 Propostas de trabalhos futuros

- Ampliar a área de estudo para toda orla de Boa Viagem e verificar o impacto econômico e ecológico da implantação de vários aerogeradores no alto dos edifícios.
- Realizar o estudo financeiro da implantação de aerogeradores na região do Manguezal do Pina.
- Realizar estudo financeiro com foco nos condomínios da orla de Boa Viagem.
- Analisar regiões de canalização do fluxo de vento e a possibilidade de geração de energia nestes cânions artificiais.
- Analisar as regiões afetadas pelas esteiras dos edifícios maiores e impactos na circulação do vento na cidade.
- Analisar cidades onde o desenvolvimento foi pensado para melhorar a circulação de ar – Maceió, por exemplo, onde há um crescimento dos gabarito dos edifícios se dá com a distância da orla — e verificar as diferenças de impacto nas velocidades de vento e turbulência.
- Validar a metodologia através da verificação dos dados obtidos através de medições simultâneas das velocidades e direções do vento na praia de Boa Viagem e no alto dos edifícios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEROTECHTURE INTERNACIONAL INC. IBEW Local Union 701. **Aerotechture Internacional Inc.**, 2010. Disponível em: <http://www.aerotechture.com/projects_ibew.html>. Acesso em: 4 Outubro 2010.

AGÊNCIA BRASIL. Para especialista, Brasil precisa de uma Belo Monte por ano de energia. **Canal Rural**, 2010. Disponível em: <<http://www.canalrural.com.br/canalrural/jsp/default.jsp?uf=2§ion=Canal%20Rural&id=2883491&action=noticias>>. Acesso em: 22 setembro 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração**, 2010. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>. Acesso em: 20 Setembro 2010.

AHRENS, C. D. **Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere**. 5ª. ed. Belmont: Thomson Learning Inc., 2008. ISBN 0-495-11558-4.

AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION. **AWEA Small Wind Turbine Global Market Study**. AWEA. Washington DC, p. 5-6. 2009.

AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION. **Wind Energy and Wildlife**. AWEA - American Wind Energy Association. Washington DC, p. 4. 2009.

AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION. **AWEA Small Wind Turbine Global Market Study**. AWEA. Washington DC. 2010.

ANDRADE, H. C. L. **Metodologia de projeto de sistema híbrido eólico/solar/diesel aplicada à vila de Sucuriju**. Recife: UFPE, 2007.

ANTVORSKOV, S. Introduction to integration of renewable energy in demand controlled hybrid ventilation systems for residential buildings. **Building and Environment**, Valby, v. 43, p. 1350–1353, 2008. ISSN 0360-1323.

ARAÚJO, A. M. **Ventilação Aplicada à Engenharia de Segurança no Trabalho. Especialização em Engenharia de Segurança no Trabalho**, 2010. Disponível em: <<http://www.ufpe.br/mecfluamb/resources/Unidade%202%20Ventilacao2010.pps>>. Acesso

em: 25 Novembro 2010. v. II, p. 46. Disciplina "Ventilação e Qualidade do Ar" ministrada nos Cursos de Especialização da Universidade Federal de Pernambuco e Universidade de Pernambuco.

ARAÚJO, A. M. et al. Simulación de la Producción de Energía Eléctrica con Aerogeneradores de Pequeño Tamaño. **Información Tecnológica**, Recife, v. 20, p. 37-44, Maio-Junho 2009.

ARAÚJO, M. Estudo Revela Impacto de Prédios na Orla. **Jornal do Commercio**, v. 93, n. 9, p. 6, 9 Janeiro 2011. ISSN 14157659.

ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL. ANEEL. 2ª. ed. Brasília: ANEEL, 2005. ISBN 85-87491-09-1.

BAHRAIN WORLD TRADE CENTER. Download. **Bahrain World Trade Center**, 2010. Disponível em: <<http://www.bahrainwtc.com/>>. Acesso em: 28 set. 2010.

BERGMANN, A.; COLOMBO, S.; HANLEY, N. Rural versus urban preferences for renewable energy developments. **Ecological Economics**, Stirling, v. 65, n. 3, p. 616-625, 15 Abril 2008. ISSN 0921-8009.

BRAGA, R.; SELVA, V.; JUNIOR, C. C. **Estratégias para conservação e gestão do manguezal do Pina**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 39. 2008.

BRITISH WIND ENERGY ASSOCIATION. **BWEA Small Wind Systems - UK Market Report**. RenewableUK. Londres, p. 7-9. 2010.

BUSSEL, G. J. W. V.; MERTENS, S. M. Small wind turbines for the built environment. **The Fourth European & African Conference on Wind Engineering**, Praga, v. 210, Julho 2005.

CÂMARA MUNICIPAL DO RECIFE. Parque dos Manguezais. **Câmara Municipal do Recife**, 16 Junho 2007. Disponível em: <<http://noticias.recife.pe.gov.br/index.php?GrupoCodigo=13&UltAnt=1627&DatAnt=16/06/2007&GrupoCodigoMateria=13>>. Acesso em: 7 Novembro 2010.

CASTRO, R. M. G. **Introdução a Energia Eólica**. Lisboa: IST, 2007.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. Potencial Eólico. **CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito**, 2007. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 12 Novembro 2010.

CHEREMISINOFF, N. P. **Handbook of Air Pollution Prevention and Control**. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2002. 283-284 p. ISBN 0-7506-7499-7.

COELHO, M. Decreto-Lei Municipal Nº 25.565/2010, Recife, 1 Dezembro 2010.

COLLOR, F. Projeto de Lei do Senado Nº 311 de 2009, Brasília, 2009.

COSTA, R. A. D.; CASOTTI, B. P.; AZEVEDO, R. L. S. D. Um panorama da indústria de bens de capital relacionados à energia eólica. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, Março 2009. 229-278.

DALTON, G. J.; LOCKINGTON, D. A.; BALDOCK, T. E. Feasibility analysis of renewable energy supply options for a grid-connected large hotel. **Renewable Energy**, Brisbane, 26 Outubro 2009. 955-964.

DANTAS, G. D. A.; LEITE, A. L. D. S. **Os Custos da Energia Eólica Brasileira**. UFRJ. Rio de Janeiro, p. 6. 2009. Disponível em: <http://www.nuca.ie.ufrj.br/gesel/tdse/TDSE9.pdf>.

DATAFOX. DATACOOOL - Data Loggers para Aquisição de Dados, Automação Industrial, PLC e Supervisórios. **FAQ**, 2007. Disponível em: <<http://www.ez2main.com/datacool/FAQ.asp>>. Acesso em: 11 dezembro 2007.

DAYAN, E. Wind energy in buildings: Power generation from wind in the urban environment - where it is needed most. **Urban Environment**, v. 7, n. 2, p. 33-38, Março-Abril 2006. ISSN 1471-0846.

DEMARQUI, E. N. **Determinação Semi-Automática da Altura de Edifícios em Imagens Aéreas**. Presidente Prudente: UNESP, 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, UNESP, 2007.

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS. **A Crise de Energia - Possíveis Impactos**. DIEESE - Departamento Intesindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos. São Paulo. 2001.

DERMARQUI, E. N.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M. Método Monoscópico para a Determinação Automática da Altura de Edifícios em Fotografias Aéreas, Curitiba, 14, n. 2, Abril-Junho 2008. 272-293.

D'ESTRIES, M. Ducted Wind Turbine Provides Efficient Rooftop Energy. **Groovy Green**, 25 Janeiro 2008. Disponível em: <<http://www.groovygreen.com/groove/?p=2523>>. Acesso em: 25 Outubro 2010.

DIGITAL GLOBE. Digital Globe Browse. **Informações da Imagem 101001000572880A**, 2007. Disponível em: <<http://browse.digitalglobe.com/imagefinder/showBrowseMetadata?buffer=1.0&catalogId=101001000572880A&imageHeight=1024&imageWidth=1024>>. Acesso em: 14 Junho 2010.

DIGITAL GLOBE. Digital Globe. **Quickbird**, 2010. Disponível em: <<http://www.digitalglobe.com/index.php/85/QuickBird>>. Acesso em: 14 Junho 2007.

DSZ. Vectors Help You Calculate Wind Speed. **National Severe Storms Laboratory**, 2002. Disponível em: <<http://www.nssl.noaa.gov/edu/ideas/vectors2.html>>. Acesso em: 25 Outubro 2010.

EKOPOWER. Wind Sensors. **Ekopower**, 2008. Disponível em: <<http://www.ekopower.nl/windsensors.htm>>. Acesso em: 25 Outubro 2010.

ELDRIDGE, F. R. **Wind Machines**. 2^a. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1980.

EMPORIS. Emporis. **Site da Emporis**, 2010. Disponível em: <<http://www.emporis.com/application/?lng=7>>. Acesso em: 25 Junho 2010.

ERDOGDU, E. On the wind energy in Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Balgat, Ankara, Turkey, 13, 2009. 1361-1371.

ERIKSSON, S.; BERNHOFF, H.; LEIJON, M. Evaluation of different turbine concepts for wind power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Uppsala, v. 12, p. 1419-1434, Maio 2006. ISSN 1364-0321.

EVOLVE GREEN. 4000 Watt (4 KW) VAWT Urban Green Wind Turbine (Off-Grid & On-Grid Avail) Tower Included! **Evolve Green**, 2010. Disponível em: <<http://www.evolvegreen.ca/catalog/item/6319999/6630634.htm>>. Acesso em: 3 Novembro 2010.

FOREMAN, K. M.; GILBERT, B.; OMAN, R. A. Diffuser augmentation of wind turbines. **Solar Energy**, Bethpage, v. 20, n. 4, p. 305-311, 1978. ISSN 0038-092X.

FRANTZ, J. g3data. **Jonas Frantz Homepage**, 2010. Disponível em: <<http://www.frantz.fi/software/g3data.php>>. Acesso em: 20 Novembro 2010.

GEOEYE. GeoEye. **Imagery Sources**, 2010. Disponível em: <<http://www.geoeye.com/CorpSite/products/imagery-sources/Default.aspx#ikonos>>. Acesso em: 14 Junho 2007.

GLOBAL MAPPER SOFTWARE LLC. Global Mapper. **Overview**, 2009. Disponível em: <<http://www.globalmapper.com/product/overview.htm>>. Acesso em: 25 Junho 2010.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Energy Outlook 2008**. GWEC - Global Wind Energy Council. Bruxelas, p. 60. 2008.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind 2009 Report**. GWEC - Global Wind Energy Council. Bruxelas, p. 68. 2010.

GOOGLE. Google Earth. **Saiba mais sobre o Google Earth**, 2010. Disponível em: <http://www.google.com.br/enterprise/earthmaps/earth_pro.html>. Acesso em: 14 Junho 2010.

GOOGLE. Google Maps. **Guia do usuário do Google Maps**, 2010. Disponível em: <<http://maps.google.com/support/bin/static.py?hl=br&page=guide.cs&guide=21670>>. Acesso em: 14 Junho 2010.

GOOGLE. Google Sketchup. **Saiba mais sobre o Google Sketchup**, 2010. Disponível em: <<http://sketchup.google.com/intl/pt-BR/product/gsu.html>>. Acesso em: 14 Junho 2010.

GRANT, A.; JOHNSTONE, C.; KELLY, N. Urban wind energy conversion: The potential of ducted turbines. **Renewable Energy**, Glasgow, v. 33, p. 1157-1163, Outubro 2007. ISSN 0960-1481/S.

HALLDIN, M. Intertropical Convergence Zone. **Wikipédia**, 13 Dezembro 2006. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:ITCZ_january-july.png>. Acesso em: 20 Outubro 2010.

HANSEN, M. O. L. **Aerodynamics of Wind Turbines**. 2ª Edição. ed. London: Earthscan, 2008.

HOBBS, E. S. **A Quantitative Study of Kite Performance in Natural Wind with application to Kite Anemometry**. Cranfield: Cranfield University, 1986.

HSU, S. A.; MEINDL, E. A.; GILHOUSEN, D. B. Determining the Power-Law Wind-Profile Exponent under Near-Neutral Stability Conditions at Sea. **Journal of Applied Meteorology**, Mississippi, 33, Junho 1994. 757-772.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Séries Estatísticas & Séries Históricas. **IBGE**, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/series_estatisticas/index.php>. Acesso em: 29 Setembro 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Gráficos Climatológicos. **INMET - Instituto Nacional de Meteorologia**, 2010. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/clima.php?lnk=http://www.inmet.gov.br/html/clima/graficos/index4.html>>. Acesso em: 14 Setembro 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais Climatológicas. **INMET - Instituto Nacional de Meteorologia**, 2010. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas/?mapa=tmax>>. Acesso em: 17 Setembro 2010.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Wind turbine generator systems. **IEC 61400-12**, Geneva, 1998. 50.

IZAGUIRRE, P. D. **Urban Wind Power - Installation of an Urban Wind Power turbine in Polhemsskolan in Gävle**. Gävle: University of Gävle, 2008. Dissertação (Master in Energy Systems) - Department of Technology and Built Environment, University of Gävle, 2008.

JUSTO, D. A. R. Visual 1.32. **Instituto de Matemática da UFRGS**, 2008. Disponível em: <<http://www.mat.ufrgs.br/~dago/visual/visual.html>>. Acesso em: 14 Outubro 2010.

KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of American Meteorological Society**, Washington DC, 5 Setembro 1995. 437-470.

LAFARGE, F. et al. Automatic building extraction from DEMs using an object approach and application to the 3D-city modeling. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Cedex, v. 63, n. 3, p. 365-381, Maio 2008. ISSN 0924-2716.

LIN, C.; NEVATIA, R. Building Detection and Description from a Single Intensity Image. **Computer Vision and Image Understanding**, Los Angeles, v. 72, n. 2, p. 101-121, Novembro 1998. ISSN 1077-3142.

LOPES, A. M. G. **Windstation Version 2.0.6 User's Manual**. EasyCFD. Coimbra. 2010.

LYSEN, E. H. **Introduction to Wind Energy**. 2^a. ed. Amersfoort: CWD, 1983.

MAIA, P. **Análise das séries históricas da produção e das reservas de óleo e gás: auto-suficiência, por quanto tempo?** Rio de Janeiro: UERJ, 2009.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. 2^a. ed. Chippingham: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-01500-1.

MELO, G. M. **Um Estudo da Aplicação e Viabilidade de Pequenos Aerogeradores na produção de Energia Elétrica**. Recife: UFPE, 2009. Dissertação (Mestrado em Energia Eólica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPE, 2009.

MERTENS, S. Wind energy in urban areas: Concentrator effects for wind turbines close to buildings. **Refocus**, Delft, v. 3, n. 2, p. 22-24, Março/Abril 2002. ISSN 1471-0846.

MERTENS, S. The energy yield of roof mounted wind turbines. **Wind Engineering**, Delft, v. 27, n. 6, p. 507-518, 2003. ISSN 0309-524X.

MERTENS, S. **Wind Energy in the Build Environment**. United Kingdom: Multi-Science Publishing Co. Ltd., 2006. ISBN 0906522358.

MIRANDA, E. E. D. Brasil em Relevô. **Campinas**: Embrapa, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 26 Janeiro 2010.

MISTAYA ENGINEERING INC. Features. **Windographer**, 2010. Disponível em: <<http://www.windographer.com/features/access-data-quickly/>>. Acesso em: 27 Outubro 2010.

MOHAN, M.; SIDDIQUI, T. A. Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification. **Atmospheric Environment**, Nova Deli, v. 32, n. 21, p. 3775-3781, Agosto 1998. ISSN 1352-2310.

MONTEZANO, B. Tutorial de Energia Eólica - Princípios e Tecnologias. **CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito**, 2007. Disponível em: <<http://http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 11 dezembro 2007.

MOREIRA, D. M.; TIRABASSI, T.; MARCELO, M. R. D. Meteorologia e poluição atmosférica. **Ambiente & sociedade**, Campinas, v. XI, n. 1, p. 1-13, Janeiro-Junho 2008. ISSN 1414-753X.

MÜLLER, G.; JENTSCH, M. F.; STODDART, E. Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings. **Renewable Energy**, Southampton, 34, 18 Novembro 2008. 1407-1412.

MUSEO DI LEONARDO DA VINCI. Anemometer and Anemoscope. **Museo Leonardo da Vinci**, 2009. Disponível em: <<http://www.mostredileonardo.com/site.asp?idSite=1&idLingua=10&idPagina=237>>. Acesso em: 25 Outubro 2010.

NATIONAL OCEANIC & ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. NCEP/NCAR Reanalysis Monthly Means and Other Derived Variables. **NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration**, 2010. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.derived.surfaceflux.html>>. Acesso em: 9 Setembro 2010.

NETTO, L. F. Feira de Ciências. **Meteorologia (A ciência da atmosfera)**, 2007. Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala02/02_0m0.asp>. Acesso em: 11 dezembro 2007.

OINEGUE, E. Análise editorial. **Análise Energia**, 2008. Disponível em: <http://analiseinstitucional.sb2.construnet.com.br/editora/analiseenergia_apresentacao.php?setEdit=true&acao3_cod0=a3f3bbe42c73849f72dc268aee9a190>. Acesso em: 20 Maio 2009.

OLIVEIRA, A. J. C. **Viabilidade econômica de alternativas energéticas para o meio rural nordestino**. Fortaleza: UFC, 1991. Dissertação (Mestrado em Economia Rural). Departamento de Economia Agrícola. Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

OMAN, R. A.; FORMEAN, K. M. **Advantages of the Diffuser-Augmented Wind Turbine**. Grumman Aerospace Corporation. Bethpage, p. 103-106. 1973.

OPPENHEIM, D.; OWEN, C.; WHITE, G. Outside the square: Integrating wind into urban environments. **Refocus**, v. 5, n. 3, p. 32-35, Maio/Junho 2004. ISSN 1471-0846/04.

PASCUAL, A. E. **Sistema mixto eólico fotovoltaico en vivienda rural basada en el concepto de "Permacultura"**. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 1998. Dissertação (Maestria en Ingeniería de Telecomunicación) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 1998.

PEREIRA, S. Ventos Urbanos. **Ciência Hoje**, v. 47, n. 279, p. 60, Março 2011. ISSN 0101-8515. Revista de Divulgação Científica da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC).

POPULAR SCIENCE MONTHLY. Skyscraper Windmills to Harness Air for Power. **Popular Science Monthly**, Nova Iorque, v. 120, n. 6, p. 21, Junho 1932.

PORTUGAL. Comunicado do Conselho de Ministros de 8 de Julho de 2010. **Governo de Portugal - Presidência do Conselho de Ministros**, 2010. Disponível em: <<http://www.portugal.gov.pt/pt/GC18/Governo/ConselhoMinistros/ComunicadosCM/Pages/20100708.aspx>>. Acesso em: 24 Setembro 2010.

PREUS, R. Thought on VAWTs - Vertical Axis Wind Generator Perspectives. **Home Power**, Neweberg, v. 104, p. 98 - 100, Dezembro 2004.

RAGHEB, M. **Dynamics and structural loading in wind turbines**. University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana. 2008. Disponível em: <https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Dynamics%20and%20Structural%20Loading%20in%20Wind%20Turbines.pdf>.

REDE NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA. RNP. **Notícias RNP**, 2000. Disponível em: <<http://www.rnp.br/noticias/2000/not-001016b.html>>. Acesso em: 14 Junho 2010.

RIEGLER, H. HAWT versus VAWT: Small VAWTs find a clear niche. **Refocus**, Bozen, v. 4, n. 4, p. 44-46, Julho 2003. ISSN S1471-0846.

ROHATGI, J. S. **Wind characteristics: An analysis for the generation of wind power**. 1^a. ed. Canyon: Alternative Energy Institute, West Texas A&M University, 1994. ISBN 0808714783.

SILVA, G. R. **Características de Vento da Região Nordeste**. Recife: UFPE, 2003. Dissertação (Mestrado em Energia Eólica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPE, 2003.

SILVA, N. F.; ROSA, L. P.; ARAÚJO, M. R. The utilization of wind energy in the Brazilian electric sector's expansion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 3, p. 289-309, Junho 2005. ISSN 1364-0321.

SKYSCRAPER PAGE. Skyscraper Forum. **Skyscraper Page**, 6 Setembro 2010. Disponível em: <<http://forum.skyscraperpage.com/showthread.php?p=4982768>>. Acesso em: 30 Setembro 2010.

SMITH, R. F.; KILLA, S. Bahrain World Trade Center (BWTC): the first large-scale application of wind turbines in a building. **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, Dubai, v. 16, p. 429-439, 2007. ISSN 1541-7808.

SOARES, B. Under Google. **De Onde Vem as Fotos do Google Earth?**, 2007. Disponível em: <<http://www.undergoogle.com/blog/2007/geral/de-onde-vm-as-fotos-do-google-earth.html>>. Acesso em: 14 Junho 2010.

SOVACOOOL, B. K. Contextualizing avian mortality: A preliminary appraisal of bird and bat fatalities from wind, fossil-fuel, and nuclear electricity. **Energy Policy**, Singapore, 18 March 2009. 2241-2248.

TANGARIE ALTERNATIVE POWER. Power Your Home. **Tangarie Alternative Power**, 2010. Disponível em: <http://www.tangarie.com/i/products/power_your_home.html>. Acesso em: 03 Novembro 2010.

WEGLEY, H. **Siting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems**. Richland: Windbooks, Incorporated, 1980. ISBN 0880160039.

WESTERHOLM, G. The wind energy frontier: Urban retail markets. **Refocus**, v. 5, n. 4, p. 42-45, Julho/Agosto 2004. ISSN 1471-0846.

WESTWIND WIND TURBINES. 5KW Westwind. **Westwind Wind Turbines**, 2010. Disponível em: <<http://www.westwindturbines.co.uk/products/5kwwindturbine.asp>>. Acesso em: 3 Novembro 2010.

WILLIAMS, J. L. WTRG Economics. **Oil Price History and Analysis (Updating)**, 2010. Disponível em: <<http://www.wtrg.com/prices.htm>>. Acesso em: 21 Setembro 2010.

ZANETTI, G. **Energy Generation System with Self Opening and Closing Sails**. WO 2010/015720 A2, 11 Fevereiro 2010.

APÊNDICE A – MAIS SOBRE AEROGERADORES

Os primeiros aerogeradores de que se tem notícia eram de eixo vertical (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine) e foram utilizados pelos persas em 644 D.C, Figura 59. Na Idade Média, surgiram os primeiros aerogeradores de eixo horizontal (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine), como o moinho de quatro pás neerlandês na Europa e o multipás nos EUA, utilizados principalmente para o bombeamento de água e moagem de grãos. Em 1888, foram feitas as primeiras tentativas de se obter eletricidade a partir da força dos ventos nos Estados Unidos por Charles Brush. Já seu contemporâneo, Marcellus Jacobs, utilizou um aerogerador tripá, parecido com os mais utilizados até hoje (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009).



Figura 59 - Aerogerador de eixo vertical de Sistan Basin na fronteira entre Irã e Afeganistão. Fonte: (MÜLLER, JENTSCH e STODDART, 2008).

Os primeiros aerogeradores para a extração de energia elétrica foram os de eixo horizontal, estes receberam sucessivos investimentos e se desenvolveram rapidamente. Os aerogeradores de eixo vertical só voltaram à atenção com o desenvolvimento do Rotor-H de pás retas em 1989. Certos autores não veem uma vantagem óbvia entre os dois tipos de aerogeradores (ERIKSSON, BERNHOFF e LEIJON, 2006). Hoje, com a difusão da energia

eólica no mundo, diversos modelos estão aparecendo de forma experimental, como os balões TWIND® para extração de energia em grandes altitudes, Figura 60.

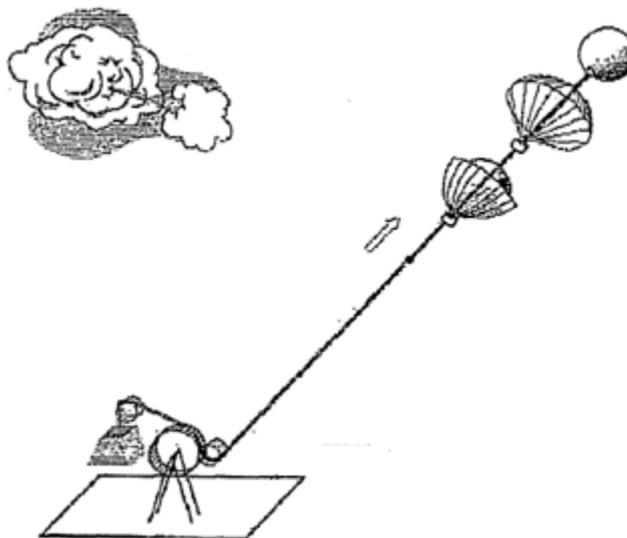


Figura 60 - Balão aerogerador TWIND. Fonte: (ZANETTI, 2010).

A EIXO HORIZONTAL

Os aerogeradores de eixo horizontal podem diferir entre seus modelos em vários conceitos, exemplos em (ELDRIDGE, 1980). Um dos modos mais comuns de diferenciá-los é no número de pás, por exemplo, existem modelos de:

- Uma pá – possuem um contrapeso e um alto coeficiente de potência;
- Duas pás – não são muito utilizados devido à instabilidade e propensão a turbulência;
- Três pás – os mais comuns entre os aerogeradores;
- Multipás – também conhecidos como moinhos americanos, são mais utilizados para bombeamento d'água.

B EIXO VERTICAL

Os aerogeradores de eixo vertical também possuem modelos bastante diferentes entre si, exemplos em (ELDRIDGE, 1980). A diferença fundamental está no modo de atuação das forças propulsoras – de arrasto e sustentação. Entre os que se destacam estão o:

- Savonius – usa força de arrasto como propulsor;

- Darrieus – utiliza força de sustentação como propulsora;
- Giromill (Rotor-H) – o mais robusto e promissor para aplicação no ambiente urbano, possui variantes com combinação entre as forças de arrasto e sustentação para garantir partida própria (DAYAN, 2006).

C COMPARAÇÃO ENTRE AEROGERADORES DE EIXO HORIZONTAL E VERTICAL

Com o mercado de aerogeradores de grande porte dominado pelos modelos de eixo horizontal, é difícil algum fabricante se arriscar investir no desenvolvimento de um modelo experimental de eixo vertical – se não forem apresentadas vantagens muito claras. Porém, para aerogeradores com potência nominal menor que 10kW, há diversas aplicações potenciais que ainda não foram apropriadas pelos modelos de eixo horizontal, como aplicações em montanhas, locais de ventos fortes e em áreas urbanas (RIEGLER, 2003). As principais diferenças entre os principais modelos de aerogeradores de eixo vertical e os de eixo horizontal estão resumidas na Tabela 42.

Tabela 42 - Sumário das características das diferenças mais importantes entre os aerogeradores Rotor-H, Darrieus e de eixo horizontal, adaptado de (ERIKSSON, BERNHOFF e LEIJON, 2006).

Característica	Eixo Horizontal	Giromill (Eixo Vertical)	Darrieus (Eixo Vertical)
Perfil da Pá	Complicada	Simples	Complicada
Mecanismo de Yaw	Sim	Não	Não
Mecanismo de Pitch	Opcional	Opcional	Não
Torre	Sim	Sim	Não
Estaiamento	Não	Opcional	Sim
Ruído	Alto	Baixo	Moderado
Área da Pá	Pequena	Moderada	Grande
Posição do Gerador	No topo da torre	No chão	No chão
Partida Própria	Sim	Não	Não
Interferência da Torre	Grande	Pequena	Pequena
Fundação	Extensiva	Moderada	Simples
Estrutura Geral	Complicada	Simples	Simples

i Mecanismo de direcionamento

A maior diferença entre os aerogeradores de eixo horizontal e vertical, excetuando a orientação do eixo, é que o primeiro necessita de um mecanismo para direcioná-lo ao vento (yaw), enquanto o segundo capta vento de todas as direções. Além do custo deste mecanismo, existe uma fadiga relacionada ao processo de rotação, gerando custos de operação e manutenção – principalmente no caso dos aerogeradores de grande porte. Os aerogeradores de eixo vertical não perdem energia, ou mesmo a desperdiça, enquanto gira para buscar o vento, (ERIKSSON, BERNHOFF e LEIJON, 2006).

Desta forma, uma turbina onidirecional é ideal para locais onde os ventos são turbulentos ou mudam muito de direção. Atualmente há indicações de que os aerogeradores de eixo vertical têm amplas vantagens sobre os de eixo horizontal no ambiente urbano (MERTENS, 2003).

ii Gerador e caixa de marchas

Devido à posição do eixo, os aerogeradores de eixo vertical permitem que os geradores sejam colocados próximo ao chão tornando as torres mais leves e baratas. Facilita também a instalação, operação e manutenção, bem como diminui as cargas estruturais na torre. Desta forma, os geradores podem ser projetados com foco na eficiência e não em seus tamanhos e pesos, (ERIKSSON, BERNHOFF e LEIJON, 2006).

Apesar dos aerogeradores de eixo horizontal mais modernos já possuírem sistemas Direct-Drive, essa solução já seria facilmente implantada nos de eixo vertical. As caixas de marchas geralmente são frágeis e possuem baixa vida útil, sendo associadas sempre a quebras. Um aerogerador sem caixas de marchas diminuiria a manutenção, com a desvantagem de aumentar o diâmetro dos geradores, e então, para o caso dos HAWTs, aumentariam o diâmetro de seus cubos. Mesmo para aerogeradores sem o sistema Direct-Drive, a troca da caixa de marchas no topo de uma torre de um aerogerador de eixo horizontal é bem mais complicada do que esta troca no solo, como seria feito em um sistema de eixo vertical.

iii Pás

As pás de um aerogerador de eixo horizontal são submetidas a cargas periódicas e variação na atuação da gravidade ao longo de sua operação. Desta forma, precisam ser projetadas com muito cuidado, e acabam envolvendo altos custos de produção para os aerogeradores de eixo horizontal.

Para os aerogeradores de eixo vertical, o Darrieus possui pás bastante complexas e o Giromill possui pás retas de simples fabricação (ERIKSSON, BERNHOFF e LEIJON, 2006). Esta vantagem deste último, além de baratear os custos de produção, pode reduzir os custos de transporte – muito onerosos no Nordeste do Brasil (DANTAS e LEITE, 2009).

iv Controle de potência

O controle de potência é necessário para a proteção dos geradores em altas velocidades de vento. Os aerogeradores de eixo horizontal usam diversas estratégias para o controle de potência:

- Controle do ângulo de passo (pitch) – o aerogerador gira suas pás para diminuir a eficiência aerodinâmica;
- Estol (stall) – utiliza o próprio formato aerodinâmico da pá como um freio nas maiores velocidades;
- Embandeiramento – o aerogerador é retirado da direção predominante do vento, de forma que a energia produzida é nula;
- Freio mecânico – um freio a disco é aplicado.

Nos aerogeradores de eixo vertical Darrieus não é possível aplicar o controle do ângulo de passo, porém, Peter Musgove inventou o conceito de pás dobráveis em altas velocidades de vento, o que depois foi abandonado pelo controle por estol (ERIKSSON, BERNHOFF e LEIJON, 2006). Para o Giromill, o controle de sua velocidade pode ser feito por estol ou freio mecânico.

v Coeficiente de potência

Coeficiente de potência C_p pode ser definido como a razão entre a potência mecânica extraída pela máquina P_m e a potência disponível no vento.

$$C_p = \frac{P_m}{P_{disp}} \quad (12)$$

Essa razão possui seu máximo teórico, para aerogeradores de eixo horizontal, quando a velocidade do vento desacelerada pelo rotor é $1/3$ da velocidade de vento não perturbada – antes da interação com o rotor. Com isso, o Limite de Betz é calculado como máximo de extração de energia do vento de $16/27$ (aproximadamente 59,3%) da energia disponível.

Os diversos fabricantes de aerogeradores tentam aperfeiçoar suas máquinas para maximizar sua eficiência e sua extração de energia eólica. O Giromill possui valores mais altos de coeficientes de potência do que os aerogeradores de eixo horizontal e para menores razões de velocidade de ponta de pá (tip speed ratio ou TSR), Figura 61.

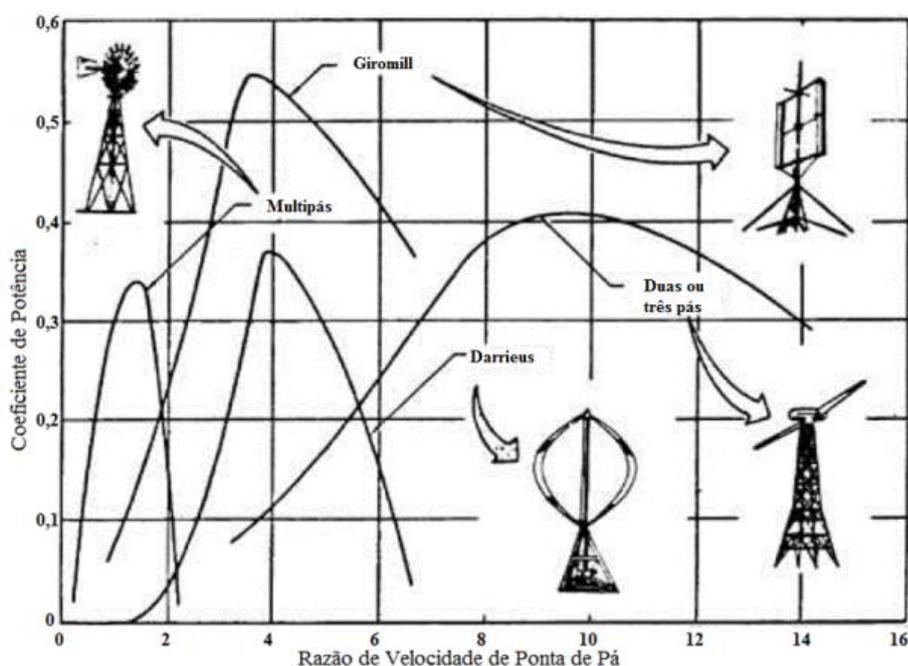


Figura 61 - Coeficiente de potência pela razão de velocidade de ponta de pá de diversos aerogeradores, adaptado de (PASCUAL, 1998).

vi Ruído e impacto ambiental

Aerogeradores de eixo vertical trabalham a razões de velocidades de ponta de pá em cerca de metade do valor das de eixo horizontal – faixa onde possuem melhor eficiência, Figura 61. Razões de velocidade mais baixas geram menos ruído aerodinâmico e oferecem menor risco para morcegos e pássaros (ERIKSSON, BERNHOFF e LEIJON, 2006).

A geração de vórtices deve ser evitada, uma vez que as diferenças de velocidade e pressão são fontes de ruído e, portanto, o efeito de estol não é aconselhado (MERTENS, 2006). Assim, aerogeradores de eixo vertical com rotores que utilizam ambas as forças de propulsão, arrasto e sustentação, são preferíveis para prevenir estes efeitos. Para atender essas exigências um aerogerador promissor é o H-Darrieus (MERTENS, 2006) – uma mistura entre o Giromill e o Darrieus – é pequeno e opera a baixas razões de velocidade de ponta de pá, logo causa pouco ruído.

vii Vibrações

Aerogeradores de eixo horizontal produzem vibrações devido ao direcionamento ao vento e também em frequências múltiplas do número de pás e da frequência de rotação de suas pás. Aerogeradores de eixo vertical produzem vibrações em frequências relacionadas ao desbalanceamento das pás. Se comparados, os de eixo vertical produzem vibrações em frequências duas vezes maiores que os de eixo horizontal por sofrer carga do vento de barlavento – nas pás da frente – e sotavento – nas pás de trás – (MERTENS, 2006).

Os edifícios possuem frequência de ressonância inversamente proporcionais as suas alturas e os aerogeradores pequenos possuem altos valores de frequência. Portanto, as vibrações em frequência de ressonância são perigosas em prédios menores – os menos interessantes à extração de energia eólica (MERTENS, 2006).

D ENCAPSULADO

É possível se envolver os aerogeradores com estruturas capazes de aumentar o fluxo de vento que passa por este e majorar a potência produzida. Existem, por exemplo,

aerogeradores de eixo horizontal e vertical encapsulados com difusores, concentradores, defletores e geradores de vortex.

Com um difusor com forma de aerofólio envolvendo um aerogerador é possível exceder o Limite de Betz (HANSEN, 2008). Lilley e Rainbird (1956) concluíram estudos – depois foram confirmados por Oman e Foreman (1973 – que indicam que aerogeradores com difusores, Figura 62, poderiam produzir até duas vezes a potência daqueles desencapsulados de mesmo diâmetro (OMAN e FORMEAN, 1973). Outra vantagem clara dos aerogeradores encapsulados (DAWT - Difuser Augmented Wind Turbine) é de tornar ventos de menores velocidades úteis à geração.

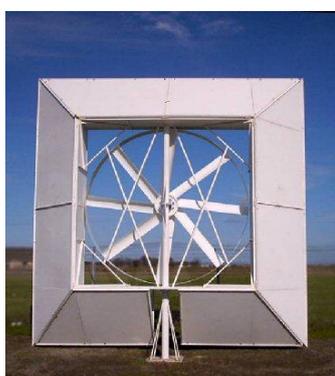


Figura 62 - Aerogerador encapsulado produzido pela Marquiss Wind Power (D'ESTRIES, 2008).

O difusor aumenta a velocidade de vento atrás do rotor e, como consequência, aumenta a diferença de pressão com relação à frente do mesmo, permitindo que um maior fluxo de vento seja captado pela máquina. A velocidade desse fluxo pode ser aumentada de 20% a 60% em relação à velocidade do vento livre – nos aerogeradores convencionais esta velocidade é reduzida em 67%. Esse procedimento pode permitir o rotor começar a operar em baixas velocidades de vento (OMAN e FORMEAN, 1973).

E FORÇA DE ARRASTO E DE SUSTENTAÇÃO

Dentre algumas classificações, as turbinas eólicas podem usar as forças de arrasto (drag) ou de sustentação (lift) para a geração de torque no eixo do rotor. Ainda há a possibilidade da utilização de um misto entre ambas as forças, como é o caso da Savonius com espaçamento entre as pás e da Aerotecture – uma invenção que mistura a Savonius com o Giromill e que pode ser utilizada tanto como aerogerador de eixo horizontal quanto vertical –, Figura 63.



Figura 63 - Aerogerador Aerotecture instalado no topo do International Brotherhood of Electrical Workers (IBEW). Fonte: (AEROTECHTURE INTERNACIONAL INC., 2010).

Considerando o coeficiente de potência de cada uma das tecnologias é possível constatar que, dentre os tipos, os aerogeradores que funcionam com forças de sustentação conseguem extrair maior potência do vento, Tabela 43. Pois, além dos seus valores de coeficiente de potência máximo $C_{pMÁX}$ mais altos do que os aerogeradores de arrasto, para uma mesma área de rotor é possível notar um menor uso de material. Os aerogeradores mistos possuem um valor de $C_{pMÁX}$ razoável – encontrado através de testes em túnel de vento –, e, portanto, dentre as que usam arrasto, deveriam ser o primeiro tipo a ser examinado para um possível uso, (MERTENS, 2006). Esse tipo gera menos ruído por trabalhar em menores razões de velocidade de ponta de pá.

Tabela 43 - Valores do Coeficiente de Potência Máximo para as diferentes forças de tração das turbinas eólicas, adaptado de (MERTENS, 2006).

Tecnologia	$C_{pMÁX}$
Sustentação	$16/27 \cong 59,3\%$
Arrasto	$3/27 \cong 11\%$
Mista	$\cong 24\%$

APÊNDICE B – ALTURA DOS PRÉDIOS DE BOA VIAGEM

As alturas utilizadas para os prédios de Boa Viagem usados nas simulações estão na Tabela 44 e Tabela 45.

Tabela 44 - Número denominado e alturas em pixel e metros dos edifícios de Boa Viagem - Parte 1

Nº	px	m	Nº	px	m	Nº	px	m	Nº	px	m	Nº	px	m	Nº	px	m
1	44	46	30	29	30	70	23	24	109	77	80	149	36	38	189	29	30
2a	17	18	31	40	42	71	25	26	110	45	47	150	39	41	190	29	30
2b	17	18	32	90	94	72	57	60	111	31	32	151	39	41	191	29	30
2c	17	18	33	49	51	73	20	21	112	14	15	152	96	100	192	21	22
2d	17	18	34	25	26	74	19	20	113	39	41	153	38	40	193	11	11
2e	17	18	35	76	79	75	20	21	114	14	15	154	54	56	194	24	25
2f	17	18	36	91	95	76	20	21	115	39	41	155	38	40	195	20	21
2g	17	18	37	89	93	77	20	21	116	31	32	156	18	19	196	26	27
2h	17	18	38	86	90	78	29	30	116	42	44	157	27	28	197	23	24
2i	17	18	39	63	66	79	19	20	118	31	32	158	37	39	198	21	22
2j	17	18	40	32	33	80	13	14	119	29	30	159	17	18	199	72	75
2k	17	18	41	47	49	81	30	31	120	36	38	160	41	43	200	89	93
2l	17	18	42	23	24	82	31	32	121	40	42	161	41	43	201	28	29
3	46	48	43	27	28	83	21	22	122	34	36	162	75	78	202	32	33
4	50	52	44	81	85	84	27	28	123	46	48	163	79	83	203	26	27
5	42	44	45	32	33	85	28	29	124	42	44	164	95	99	204	23	24
6	41	43	46	40	42	86	32	33	125	38	40	165	47	49	205	18	19
7	30	31	47	46	48	87	14	15	126	41	43	166	22	23	206	15	16
8	30	31	48	59	62	88	35	37	127	38	40	167	23	24	207	21	22
9	63	66	49	53	55	89	36	38	128	38	40	168	18	19	208	16	17
10	61	64	50	55	57	90	30	31	129	42	44	169	27	28	209	35	37
11	36	38	51	23	24	91	46	48	130	38	40	170	19	20	210	44	46
12	41	43	52	23	24	92	32	33	131	47	49	171	19	20	211	17	18
13	43	45	53	111	116	93	30	31	132	48	50	172	49	51	212	74	77
14	87	91	54	43	45	94	37	39	133	21	22	173	45	47	213	36	38
15	40	42	55	35	37	95	57	60	134	21	22	174	26	27	214	42	44
16	44	46	56	43	45	96	41	43	135	17	18	175	27	28	215	39	41
17	42	44	57	40	42	97	29	30	136	25	26	176	29	30	216	20	21
18	42	44	58	53	55	98	43	45	137	19	20	177	46	48	217	20	21
19	47	49	59	19	20	99	36	38	138	80	84	178	21	22	218	38	40
20	74	77	60	48	50	99	36	38	139	30	31	179	38	40	219	66	69
21	60	63	61	32	33	100	39	41	140	34	36	180	76	79	220	43	45
22	20	21	62	53	55	101	37	39	141	35	37	181	57	60	221	48	50
23	48	50	63	30	31	102	37	39	142	45	47	182	54	56	222	38	40
24	94	98	64	27	28	103	35	37	143	43	45	183	54	56	223	24	25
25	20	21	65	32	33	104	37	39	144	43	45	184	29	30	224	25	26
26	44	46	66	37	39	105	40	42	145	54	56	185	22	23	225	23	24
27	47	49	67	41	43	106	45	47	146	58	61	186	29	30	226	12	13
28	47	49	68	49	51	107	75	78	147	51	53	187	19	20	227	12	13
29	52	54	69	23	24	108	42	44	148	29	30	188	26	27	228	18	19

Tabela 45 - Número denominado e alturas em pixel e metros dos edifícios de Boa Viagem - Parte 2

Nº	px	m	Nº	px	m	Nº	px	m	Nº	px	m	Nº	px	m	Nº	px	m
229	18	19	257	40	42	285	22	23	313	53	55	343	21	22	371	61	64
230	34	36	258	42	44	286	48	50	314	86	90	344	46	48	372	55	57
231	69	72	259	61	64	287	44	46	315	41	43	345	52	54	373	63	66
232	59	62	260	27	28	288	51	53	316	21	22	346	38	40	374	48	50
233	34	36	261	31	32	289	51	53	317	23	24	347	47	49	375	59	62
234	57	60	262	20	21	290	45	47	318	22	23	348	34	36	376	48	50
235	31	32	263	62	65	291	46	48	319	17	18	349	48	50	377	71	74
236	35	37	264	24	25	292	48	50	320	34	36	350	33	34	378	53	55
237	35	37	265	62	65	293	34	36	321	78	81	351	49	51	379	45	47
238	30	31	266	20	21	294	45	47	322	55	57	352	26	27	380	57	60
239	33	34	267	49	51	295	53	55	323	48	50	353	36	38	381	55	57
240	30	31	268	18	19	296	22	23	324	31	32	354	41	43	382	60	63
241	19	20	269	49	51	297	39	41	325	35	37	355	51	53	383	44	46
242	56	58	270	68	71	298	40	42	326	20	21	356	52	54	384	39	41
243	70	73	271	64	67	299	35	37	327	72	75	357	37	39	385	24	25
244	45	47	272	68	71	300	35	37	328	25	26	358	36	38	386	31	32
245	22	23	273	20	21	301	45	47	329	69	72	359	58	61	387	53	55
246	22	23	274	29	30	302	43	45	330	31	32	360	33	34	388	77	80
247	25	26	275	29	30	303	25	26	331	32	33	361	55	57	389	84	88
248	45	47	276	28	29	304	21	22	333	19	20	362	35	37	390	51	53
249	61	64	277	89	93	305	23	24	334	84	88	363	47	49	391	21	22
250	89	93	278	43	45	306	27	28	336	21	22	364	55	57	392	35	37
251	50	52	279	29	30	307	44	46	337	95	99	365	35	37	393	24	25
252	42	44	280	105	110	308	47	49	338	45	47	366	48	50	394	28	29
253	30	31	281	64	67	309	33	34	339	20	21	367	45	47	395	19	20
254	55	57	282	15	16	310	49	51	340	31	32	368	35	37	396	18	19
255	39	41	283	32	33	311	21	22	341	19	20	369	42	44			
256	82	86	284	67	70	312	40	42	342	33	34	370	26	27			

APÊNDICE C – DIVISÃO DOS DADOS DE VENTO DE OLINDA

Os dados de vento de Olinda para o ano de 1998 foram divididos por faixas de velocidade em intervalos de 1m/s – com exceção do primeiro intervalo que é de 0,0 a 1,5m/s – e de direção em intervalos de 30°, conforme a Tabela 46 e Tabela 47.

Tabela 46 - Ocorrências (em horas) das velocidades de vento divididas pelos setores de direção do vento - Parte 1.

Intervalo (m/s) e (°)	345° - 15°	15° - 45°	45° - 75°	75° - 105°	105° - 135°	135° - 165°
0,0 - 1,5	4	1	3	10	10	29
1,5 - 2,5	4	3	5	12	38	42
2,5 - 3,5	4	14	50	88	62	63
3,5 - 4,5	2	61	180	333	239	116
4,5 - 5,5	0	69	377	620	578	245
5,5 - 6,5	0	48	477	542	656	281
6,5 - 7,5	0	9	172	275	628	263
7,5 - 8,5	0	0	13	74	308	157
8,5 - 9,5	0	2	2	18	127	97
9,5 - 10,5	0	0	0	2	29	33
10,5 - 11,5	0	1	0	1	4	4
11,5 - 12,5	0	0	0	1	2	0
12,5 - 13,5	0	1	0	0	0	0

Tabela 47 - Ocorrências (em horas) das velocidades de vento divididas pelos setores de direção do vento - Parte 2.

Intervalos (m/s) e (°)	165° - 195°	195° - 225°	225° - 255°	255° - 285°	285° - 315°	315° - 345°
0,0 - 1,5	23	26	80	37	16	4
1,5 - 2,5	34	88	57	31	7	0
2,5 - 3,5	44	60	13	11	0	0
3,5 - 4,5	57	25	13	21	0	0
4,5 - 5,5	75	20	12	11	0	0
5,5 - 6,5	87	34	13	6	0	0
6,5 - 7,5	87	54	24	7	0	0
7,5 - 8,5	76	56	5	1	0	0
8,5 - 9,5	26	21	1	0	0	0
9,5 - 10,5	7	1	0	0	0	0
10,5 - 11,5	0	0	0	0	0	0
11,5 - 12,5	0	0	0	0	0	0
12,5 - 13,5	0	0	0	0	0	0

APÊNDICE D – CURVA DE POTÊNCIA DOS AEROGERADORES

As curvas de potência dos aerogeradores podem ser discretizadas em intervalos de 1m/s, conforme a Tabela 48. A forma de obtenção destes valores está explanada na sessão 4.5.

Tabela 48 - Tabela de potência para os aerogeradores UGE-4k, GALE 5 e Westwind 5k.

Velocidade de Vento (m/s)	Potência (W)		
	UGE-4k	GALE 5	Westwind 5k
0	0	0	0
1	0	0	0
2	128	0	0
3	250	0	50
4	436	0	210
5	686	106	480
6	1024	183	900
7	1458	290	1410
8	2000	433	2020
9	2662	617	2700
10	3041	846,3	3400
11	3456	1126	4050
12	4000	1462	4600
13	4394	1859	5000
14	4000	2322	5230
15	4000	2856	5300
16	4000	3466	5210
17	4000	4159	5160
18	4000	4936	0
19	4000	5652	0
20	4000	5652	0

APÊNDICE E – SIMULAÇÕES: AJUSTE DE MALHA

Os resultados para as simulações da velocidade de vento e intensidade de turbulência para as diversas malhas estão nas diversas figuras abaixo.

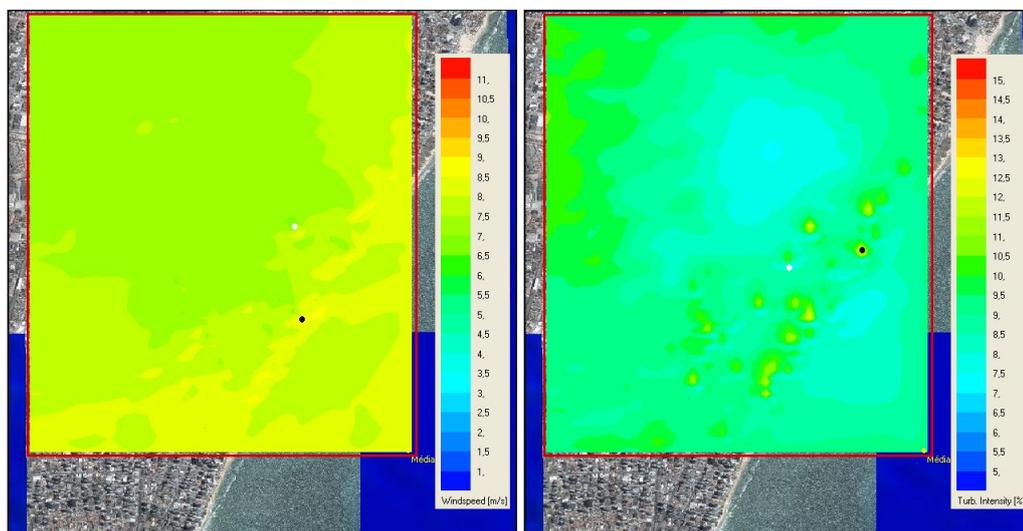


Figura 64 - Simulação da velocidade do vento (esquerda) e intensidade de turbulência (direita) com edifícios para a malha de 50x50.

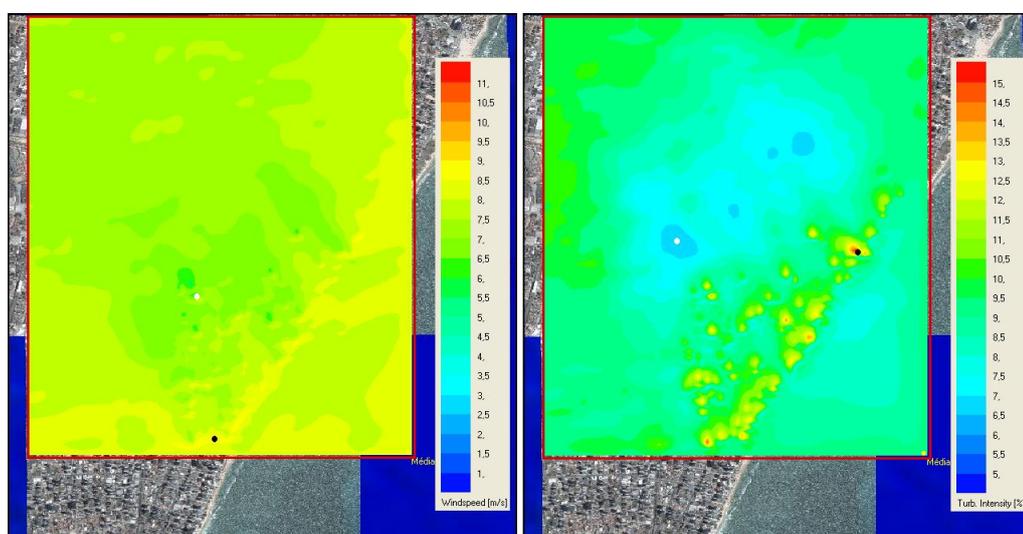


Figura 65 - Simulação da velocidade do vento (esquerda) e intensidade de turbulência (direita) com edifícios para a malha de 30x30.

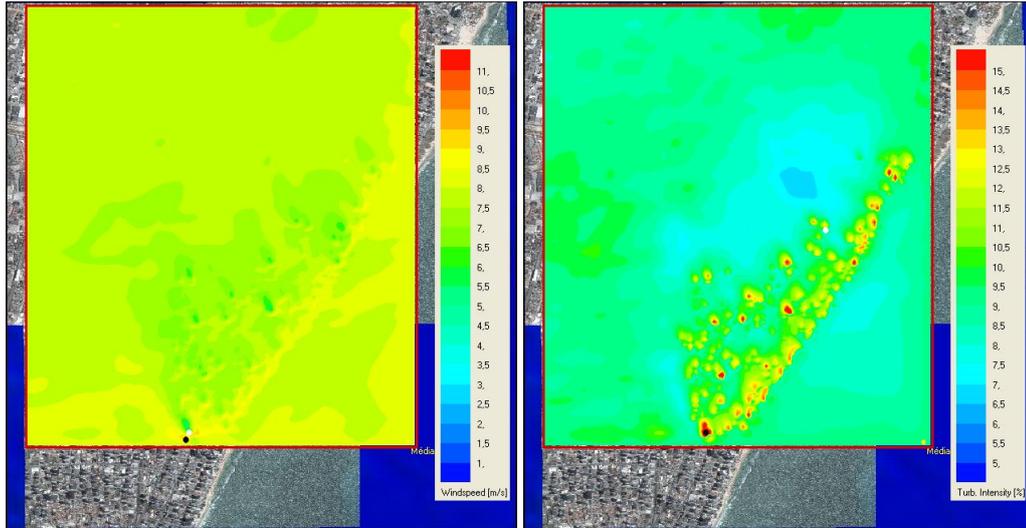


Figura 66 - Simulação da velocidade do vento (esquerda) e intensidade de turbulência (direita) com edifícios para a malha de 20x20.

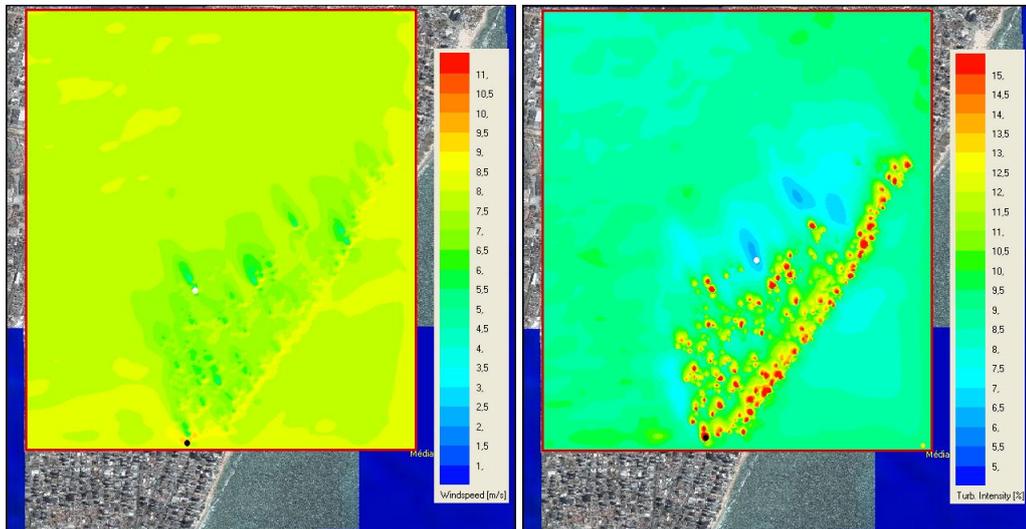


Figura 67 - Simulação da velocidade do vento (esquerda) e intensidade de turbulência (direita) com edifícios para a malha de 14x14.

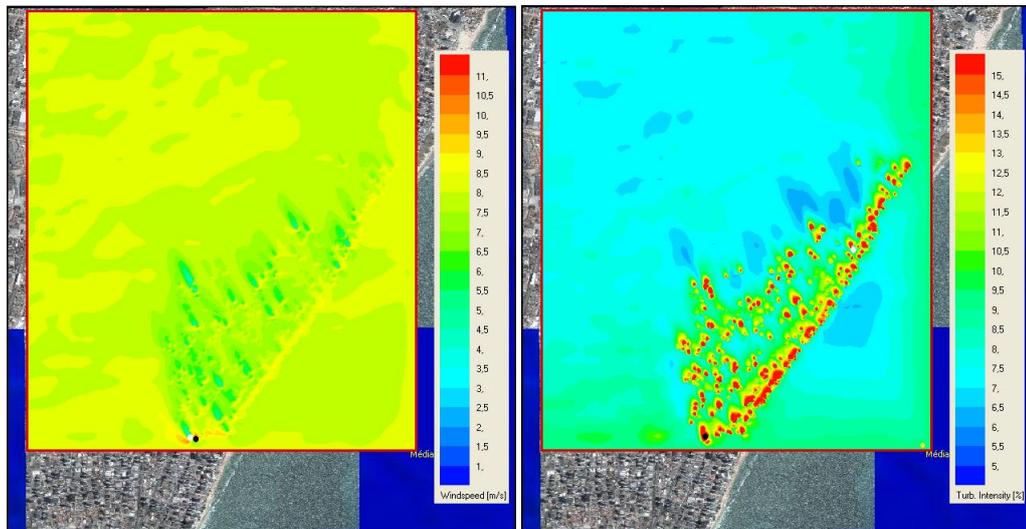


Figura 68 - Simulação da velocidade do vento (esquerda) e intensidade de turbulência (direita) com edifícios para a malha de 10x10.

APÊNDICE F – SIMULAÇÕES: DADOS DO NCEP/NCAR

Os resultados para as simulações da velocidade de vento e intensidade de turbulência para as diversas malhas estão nas diversas figuras abaixo.

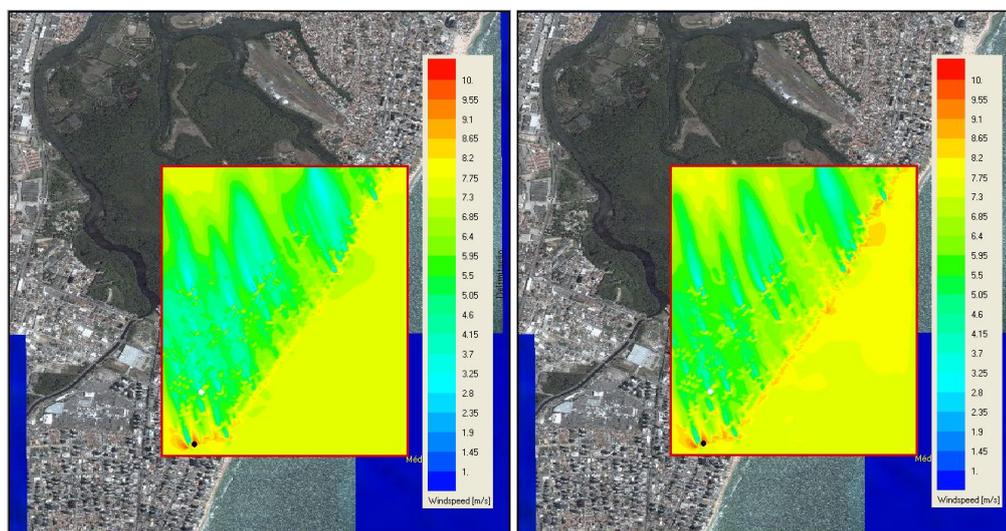


Figura 69 - Simulação NCEP/NCAR para Janeiro com condições atmosféricas neutra (esquerda) e instável (direita).

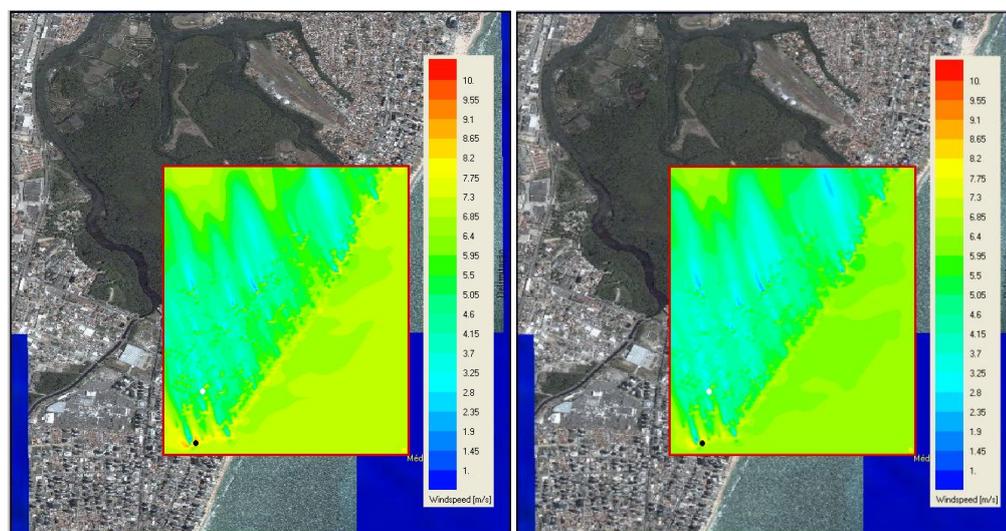


Figura 70 - Simulação NCEP/NCAR para Fevereiro (esquerda) e Março (direita) com condição atmosférica neutra.

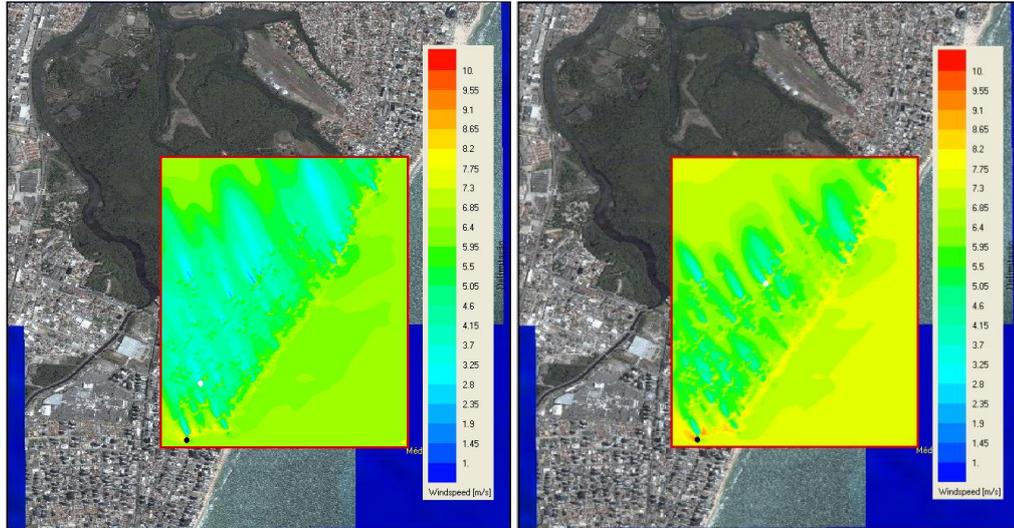


Figura 71 - Simulação NCEP/NCAR para Abril (esquerda) e Maio (direita) com condição atmosférica neutra.

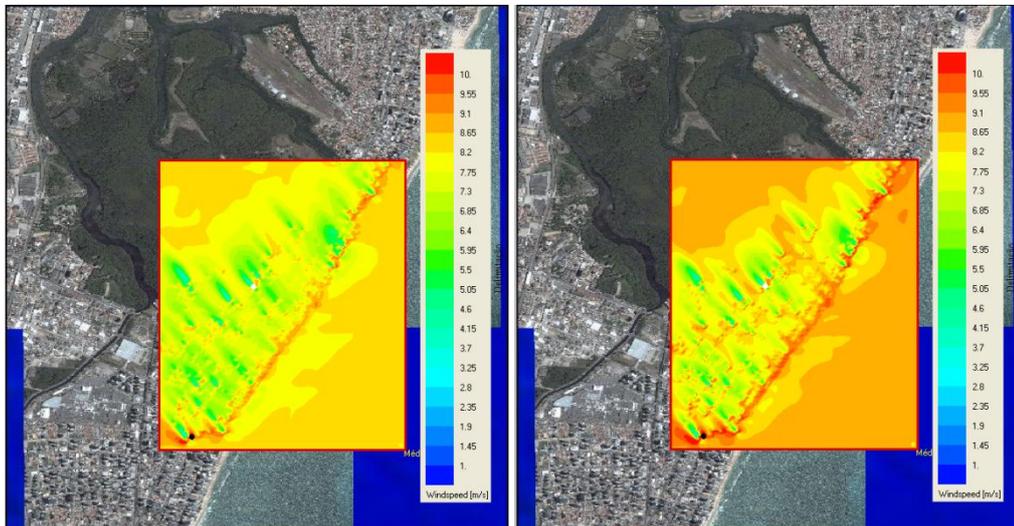


Figura 72 - Simulação NCEP/NCAR para Junho (esquerda) e Julho (direita) com condição atmosférica neutra.

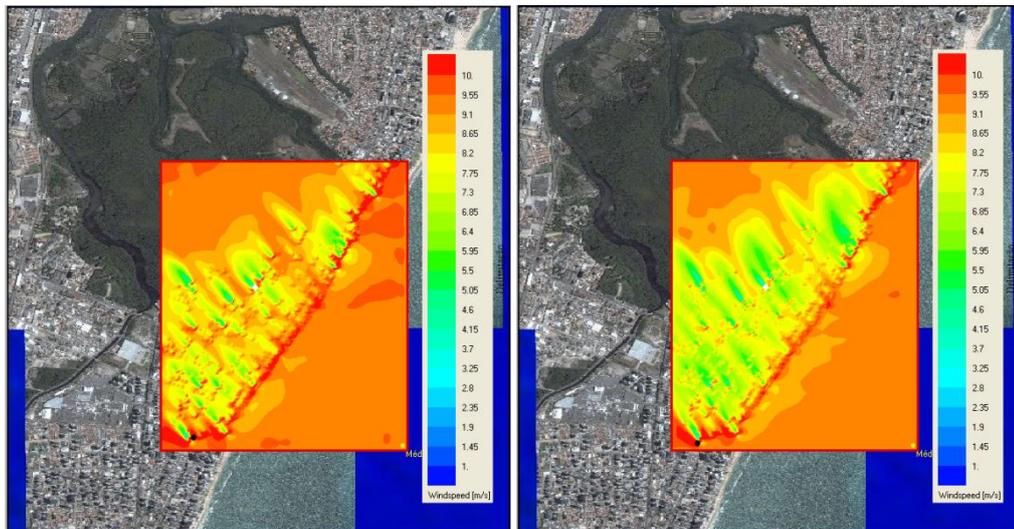


Figura 73 - Simulação NCEP/NCAR para Agosto (esquerda) e Setembro (direita) com condição atmosférica neutra.

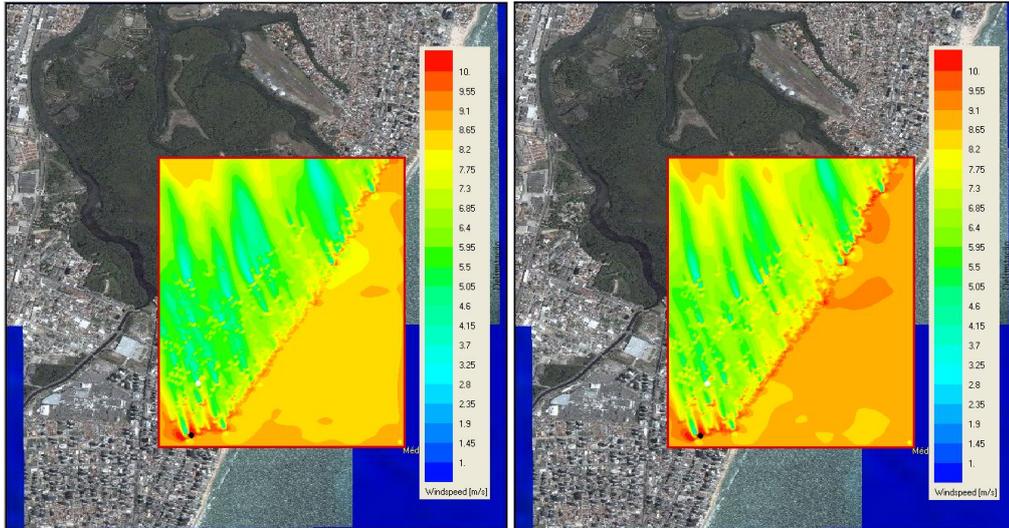


Figura 74 - Simulação NCEP/NCAR para Novembro com condições atmosféricas neutra (esquerda) e instável (direita).

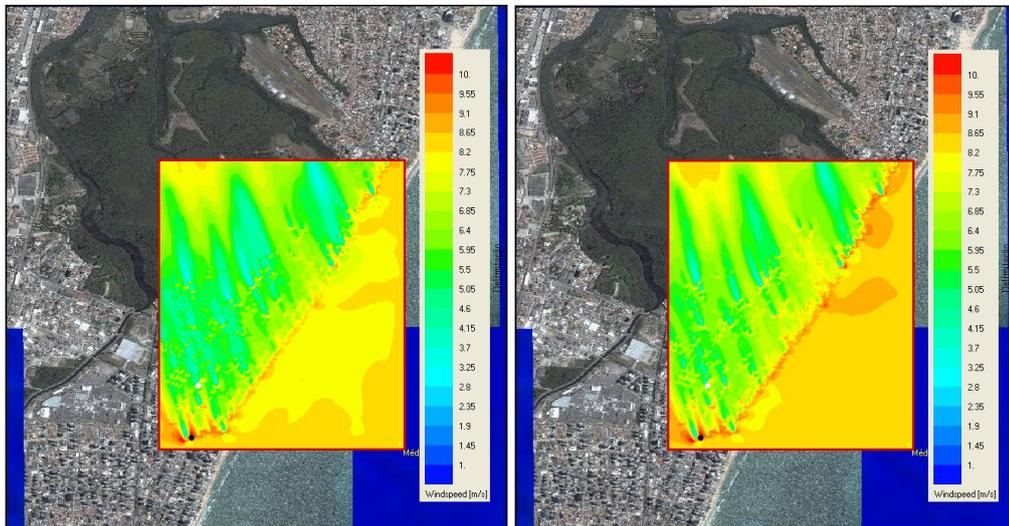


Figura 75 - Simulação NCEP/NCAR para Dezembro com condições atmosféricas neutra (esquerda) e instável (direita).

APÊNDICE G – CÁLCULO ALTERNATIVO DAS ALTURAS DOS EDIFÍCIOS DE LIN E NEVATIA

A altura dos edifícios pode também ser calculada através de vários parâmetros da imagem. É necessário saber a resolução R (pixels/metro) no local desejado, a altura da parede projetada c (em pixels), e o ângulo de inclinação β (LIN e NEVATIA, 1998). Com isso, conclui-se que a altura H (em metros) do edifício é:

$$H = \frac{c}{R \sin \beta} \quad (13)$$

Com a utilização da equação acima obtém-se os valores das alturas dos edifícios de Boa Viagem, conforme Tabela 49.

Tabela 49 - Altura real em metros e em pixels e a altura calculada e erro para os Edifícios de Boa Viagem pela equação (13).

Nome do edifício	Altura (m)	Altura (px)	Altura Calculada (m)	Erro (%)
Estação do Mar	120	130	163	36,16
Porto Seguro	117	105	132	12,84
Castelinho	104	113	142	36,80
Castelo del Mar	104	113	142	36,80
Rio dos Navegantes	92	91	114	24,29
JCPM Trade Center	84	86	107	27,88
Saint Thomas	78	82	103	31,79
Saint John	78	82	103	31,79
Empresarial Center III	64	62	77	20,75
Saint Honoré	43	43	54	24,67
Puerto Banus	40	40	50	25,56

O erro médio desse processo foi de $28,12 \pm 7,51\%$. Este erro é muito alto e pode comprometer o processo.

A fórmula apresentada por Lyn e Nevatia para a extração das alturas através do conhecimento do ângulo de inclinação do satélite não se confirmou válida para este estudo, apresentando erro médio de 28%.

ANEXO A – IMAGEM DA SRTM

A Missão Topográfica Radar Shuttle (acrónimo em inglês SRTM) é uma missão para obter uma base completa de cartas topográficas digitais terrestre de alta resolução.

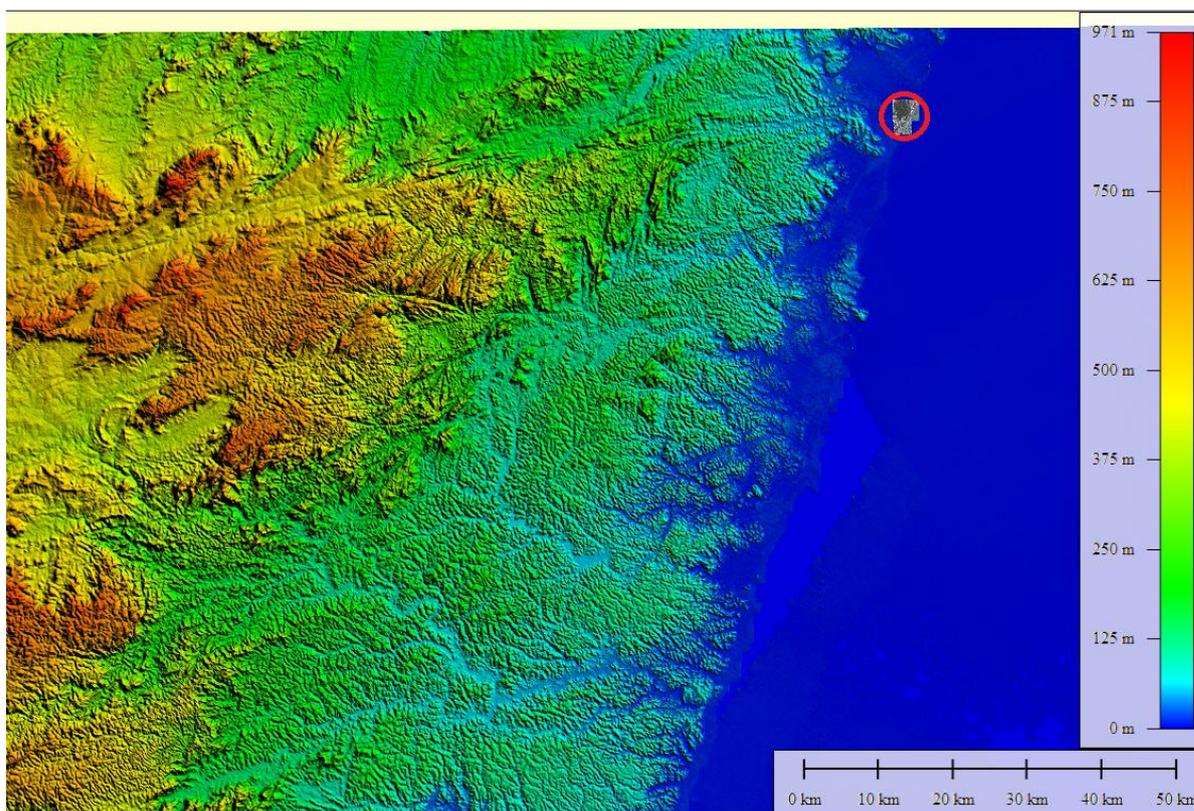


Figura 76 - Missão Topográfica Radar Shuttle da zona SC-25-V-A de Pernambuco com área de estudo destacada com círculo vermelho.

Fonte: (MIRANDA, 2005).

ANEXO B – NORMAIS CLIMATOLÓGICAS

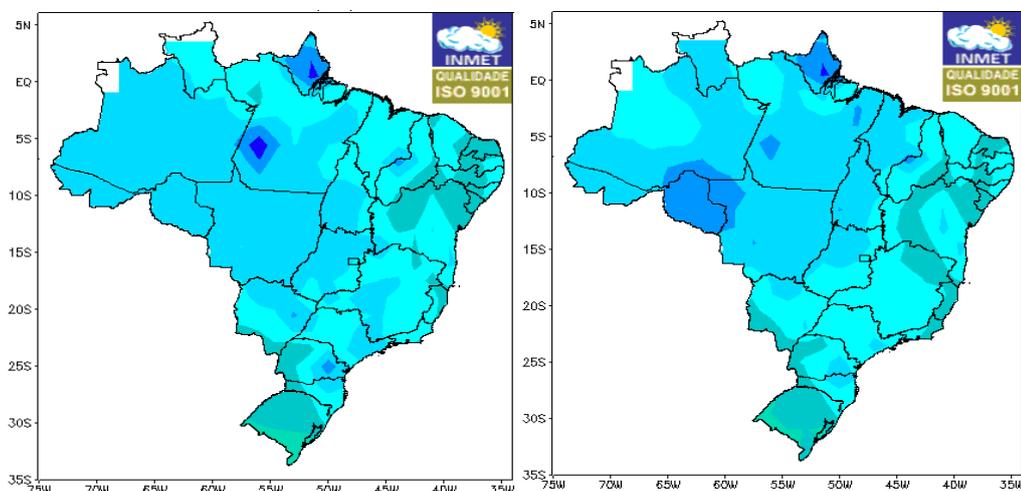


Figura 77 - Normais Climatológicas dos meses de Janeiro (esquerda) e Fevereiro (direita). Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)

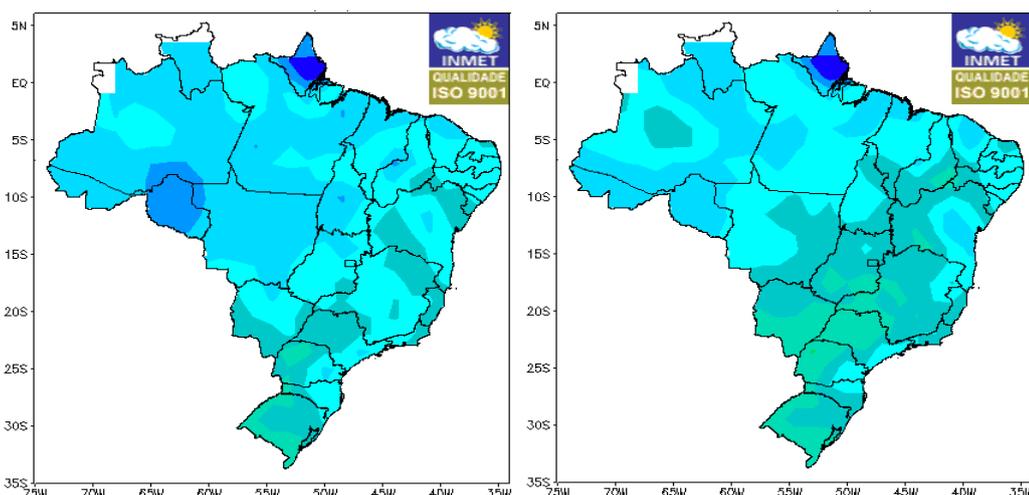


Figura 78 - Normais Climatológicas dos meses de Março (esquerda) e Abril (direita). Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)

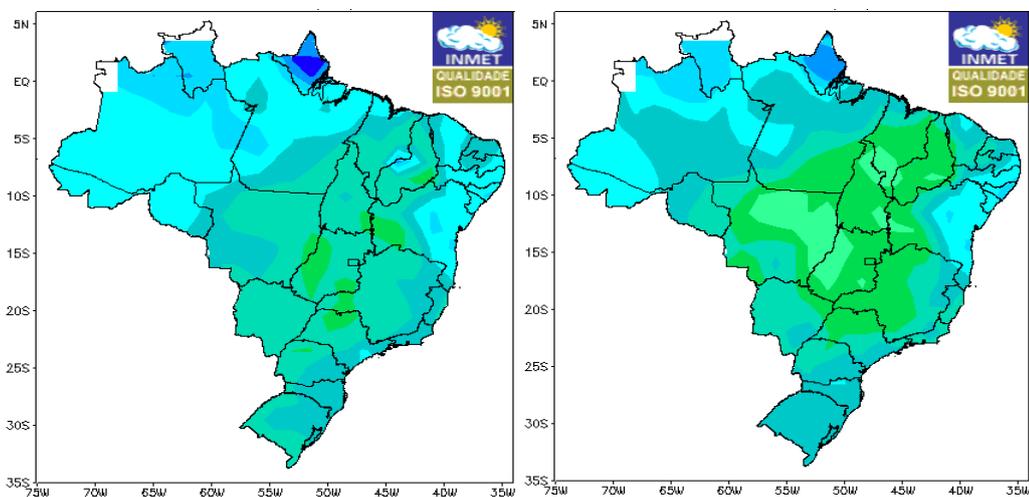


Figura 79 - Normais Climatológicas dos meses de Maio (esquerda) e Junho (direita). Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)

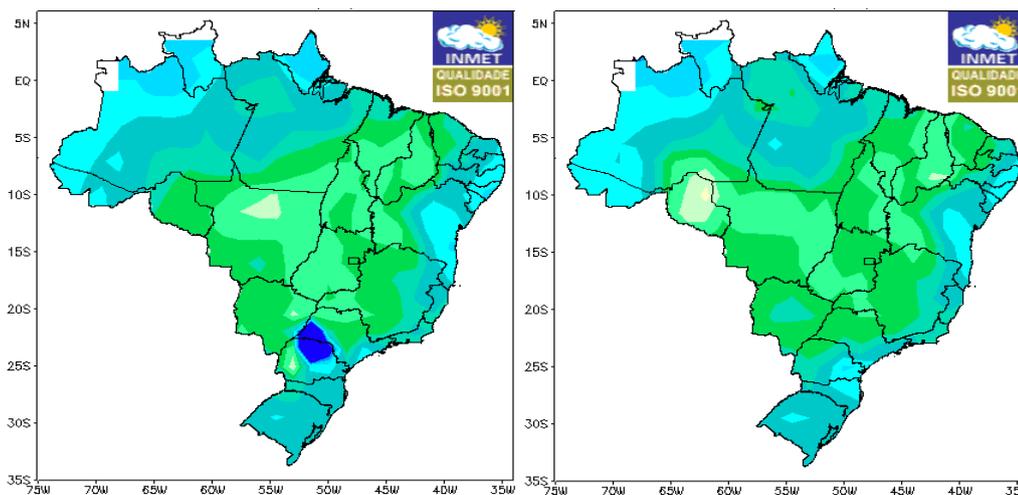


Figura 80 - Normais Climatológicas dos meses de Julho (esquerda) e Agosto (direita). Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)

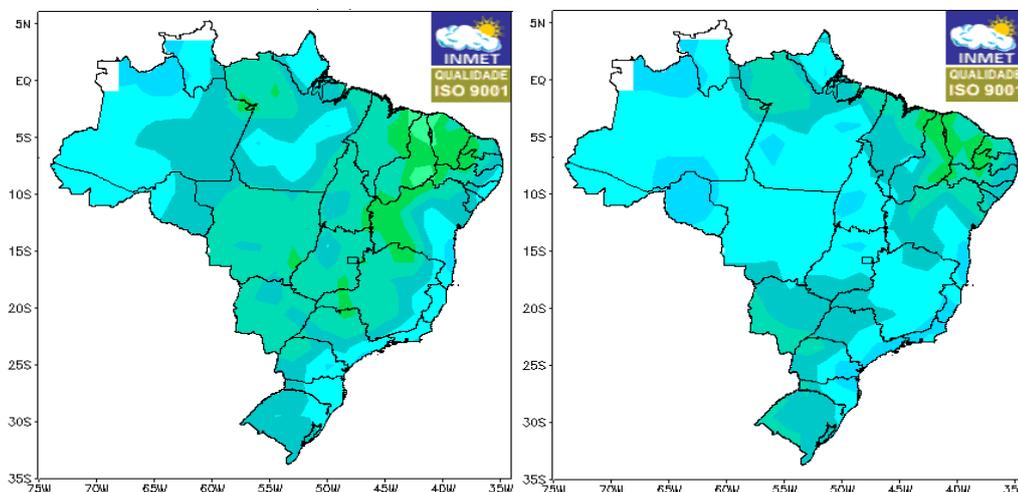


Figura 81 - Normais Climatológicas dos meses de Setembro (esquerda) e Outubro (direita). Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)

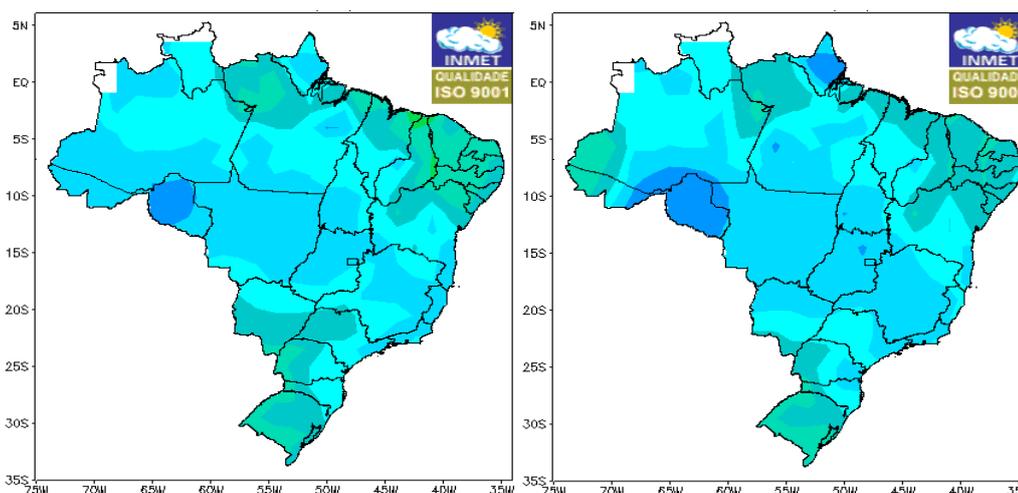


Figura 82 - Normais Climatológicas dos meses de Novembro (esquerda) e Dezembro (direita). Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)



Figura 83 - Legenda de cores das Normais Climatológicas. Fonte: (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2010)

ANEXO C – REPERCUSSÃO DA DISSERTAÇÃO

A MATÉRIA NA REVISTA CIÊNCIA HOJE

A matéria a seguir foi publicada em março de 2011 na Revista Ciência Hoje na página 60 da edição número 279 do volume 47.



Figura 84 - Matéria da revista Ciência Hoje de março de 2011. Fonte: (PEREIRA, 2011)

B MATÉRIA NO JORNAL DO COMMERCIO

A matéria a seguir foi publicada no caderno de Cidades na seção de Ciência e Meio Ambiente do Jornal do Commercio de 9 de janeiro de 2011.

Estudo revela o impacto de prédios altos na orla

Pesquisa da UFPE, feita na Zona Sul do Recife, mostra que os ventos diminuem a velocidade por causa dos espigões, chegando a ser praticamente inexistente nas áreas com edificações mais altas

Mariana Araújo
maraujo@ufpe.com.br

Um estudo da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) comprovou o que moradores de Boa Viagem, na Zona Sul do Recife, já sabiam: a velocidade dos ventos e a circulação do ar é prejudicada pelos altos prédios construídos na orla. A pesquisa, que foi a tese de mestrado do engenheiro mecânico Daniel Valença, estudou uma área 10 quilômetros quadrados do bairro, abrangendo o Parque dos Manguezais. Os ventos chegam à praia com a velocidade de 20 quilômetros por hora. Logo após os prédios, a velocidade é reduzida, em média, para 15 km/h. Somente na Imbiribeira, a velocidade é retomada para 18 km/h.

A situação é mais crítica entre as Avenidas Boa Viagem e Professor João Medeiros, próximo ao Shopping Recife, onde há maior concentração de prédios. Em

algumas vias, que possuem os prédios mais altos, o vento é praticamente inexistente. "Certamente, os altos prédios são a causa da redução da velocidade dos ventos. Apesar do estudo não ter avaliado os impactos ambientais no bairro, podemos avaliar que a diminuição da circulação de ar é uma das responsáveis pelo aumento da temperatura no bairro", afirma o engenheiro.

A velocidade dos ventos foi medida através das torres de energia eólica instaladas na praia Del Chifre, em Olinda. A intensidade dos ventos, segundo o engenheiro, é a mesma em Boa Viagem. Numa simulação feita no computador, as áreas que sofrem as maiores influências dos prédios aparecem em azul, enquanto as áreas onde o vento é

mais veloz, aparecem em vermelho. A área azul ocupa quase toda a faixa de terra entre a praia e o Parque dos Manguezais. "Em muitos pontos, o vento é quase inexistente, com velocidade próxima a zero. No bairro da Imbiribeira, o vento só volta a sua velocidade normal por causa do Parque dos Manguezais, onde não há construções. Caso não houvesse o parque, a temperatura seria ainda maior", explica Daniel Valença.

Mesmo com a redução da velocidade dos ventos, a circulação de ar ainda é suficiente para a geração de energia eólica. Segundo o engenheiro, as áreas secas já existentes no Parque dos Manguezais comportam a instalação de quatro torres de captação de energia, que seriam capazes de produzir até 500 kWh

por mês, o suficiente para abastecer até quatro mil casas com consumo médio de 127 kWh/mês.

A energia elétrica poderia atender, por exemplo, os conjuntos habitacionais que a Prefeitura do Recife está construindo no bairro do Pina, que terá 640 unidades habitacionais, cuja entrega é prevista para novembro deste ano. Ainda sobraria energia para o conjunto Via Mangue III, também da PCR, na Imbiribeira, que tem 352 apartamentos e foi inaugurado em maio do ano passado.

"Como projeto piloto, é possível instalar as torres, mas a viabilidade econômica depende de um estudo mais aprofundado. Um dos fatores positivos é que iria reduzir os custos com a transmissão da energia, já que ela seria produzida e enviada para locais próximos", avalia o engenheiro. A curta distância de transmissão iria reduzir as perdas, que são estimadas em apenas 5%.

» SAIBA MAIS

A foto abaixo mostra a área do bairro de Boa Viagem estudada pelo engenheiro Daniel Valença. Os pontos em azul representam os que sofreram mais com a construção de prédios e com menor velocidade de vento. As partes em vermelho correspondem às áreas onde os ventos são mais intensos

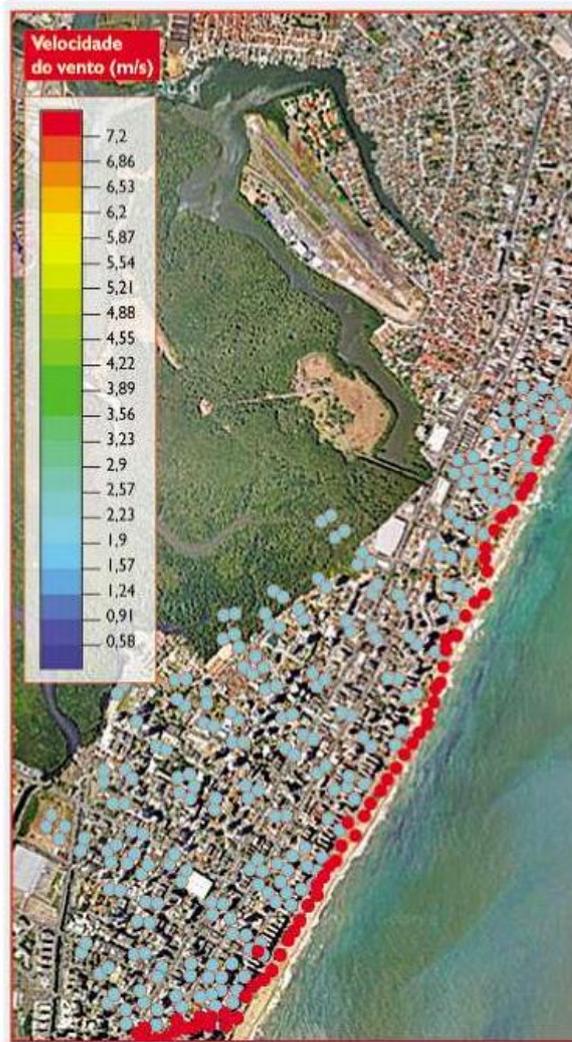


Figura 85 - Matéria do Jornal do Commercio de 09/01/2011. Fonte: (ARAÚJO, 2011)

C MATÉRIA DE ANDRÉ VALENÇA

A matéria a seguir foi confeccionada pelo aluno de Comunicação Social/Jornalismo da Universidade Federal de Pernambuco, André Valença, para a disciplina “Jornalismo Científico” ministrada pela Professora Doutora Isaltina Maria de Azevedo Mello Gomes e veiculada no blog “No Brasil Mesmo” no dia 19 de maio de 2011.

ENERGIA

Estudo avalia a possibilidade de se instalar turbinas eólicas em prédios de Boa Viagem

Mestrando da UFPE acredita que a área do Parque dos Manguezais é ideal para a implantação de turbinas eólicas no topo de prédios

André Valença

aaavalenca@gmail.com

Passeando pelas ruas do Recife, o mestrando em Engenharia Mecânica/Energia Eólica pela UFPE Daniel Valença observava a paisagem urbana. Ao contrário da maioria dos moradores, que direciona a sua concentração para o plano horizontal da cidade, Daniel observava o topo dos prédios, via as antenas de celular pendendo no alto e as imaginava turbinas eólicas girando. Após pesquisar sobre o assunto, descobriu que a instalação de turbinas no topo de prédios é um sistema adotado em diversos lugares do mundo, inclusive em algumas cidades do Brasil. Atualmente, ele pesquisa em seu mestrado a viabilidade da instalação de tais turbinas (também chamadas aerogeradores) nos prédios que se localizam ao redor do Parque dos Manguezais, situado entre o Pina e Boa Viagem.

A ideia é instalar os geradores em cima dos prédios para que eles produzam energia suficiente para suprir o consumo dos condomínios, tais quais bombear água e acender as luzes dos corredores, dos saguões, da portaria etc. No caso da cobertura pertencer a algum morador, a energia serviria, por exemplo, para cobrir o custo do aquecimento da água, entre outras funções. A primeira dúvida que a população pode ter é a respeito do tamanho das turbinas. Acostumadas a ver os grandes geradores, como aquele situado em Olinda, na frente

do Espaço Ciência, tamanho pode parecer uma preocupação. Mas, segundo Valença, “os aerogeradores são de pequeno porte, têm por volta de dois metros de diâmetro”.

Para calcular como pôr esses pequenos geradores nos prédios, o pesquisador usou o aplicativo de mapas da Google (Google Maps®) para criar um mapa tridimensional da área pretendida e, com os dados da velocidade dos ventos fornecidos pelo Instituto de Meteorologia (INMET), criou uma simulação em computador que o permitiu identificar os pontos de maior velocidade de vento, que são os mais propícios à extração de energia.

O passo seguinte foi analisar a qualidade dos edifícios como suporte. Pesquisas revelaram que eles são duplamente proveitosos para esse tipo de aplicação. Em primeiro lugar, elimina a necessidade de uma torre que elevaria os aerogeradores e que custa por volta de US\$ 7 mil. Em segundo, a estrutura dos edifícios ajuda ainda mais a acelerar o vento e projetá-lo para cima.

Contudo, as turbinas geralmente têm um problema. Como elas funcionam à vento, este chicoteia as hélices, gerando um alto ruído. Valença assegura que não há problema: “atualmente, existem aerogeradores projetados para o ambiente urbano, que geram muito menos barulho”. Outros mitos, como o de que as hélices matam pássaros também deixam a população alerta. Contudo, não passa disso, dados demonstram que prédios matam muito mais do que hélices de aerogeradores. A última inquietação que pode haver é acerca da poluição visual, mas o pesquisador rebate a acusação: “beleza é algo subjetivo. Em lugares como a Holanda, as turbinas são vistas como uma atração turística. E, além do mais, as turbinas das quais eu falo não causam um impacto maior do que as antenas de celular no topo dos prédios”.