

# ESTRATÉGIAS PARA IDENTIFICAÇÃO DE SÍTIOS EÓLICOS PROMISSORES USANDO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E ALGORITMOS EVOLUTIVOS

#### Bruno Eduardo Moreira Montezano

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Beatriz de Souza Leite Pires Lima

Rio de Janeiro Outubro de 2012

# ESTRATÉGIAS PARA IDENTIFICAÇÃO DE SÍTIOS EÓLICOS PROMISSORES USANDO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E ALGORITMOS EVOLUTIVOS

#### Bruno Eduardo Moreira Montezano

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Profa. Beatriz de Souza Leite Pires Lima, D.Sc.

P. de siuce

Prof. Nelson Francisco Favilla Ebecken, D.Sc.

Dr. Ricardo Marques Dutra, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL OUTUBRO DE 2012

#### Montezano, Bruno Eduardo Moreira

Estratégias para identificação de sítios eólicos promissores usando Sistema de Informação Geográfica e Algoritmos Evolutivos / Bruno Eduardo Moreira Montezano. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

xix, 196 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Beatriz de Souza Leite Pires Lima.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 176-188.

1. Localização de sítios eólicos. 2. Energia Eólica. 3. Apoio multicritério a decisão. 4. Algoritmos evolutivos. I. Lima, Beatriz de Souza Leite Pires. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus pais, Roberto e Rogéria, a minha noiva Tatiana e em memória da minha avó Joana Zanette Moreira (1925-2011).

## **Agradecimentos**

Agradeço ao meu pai, Roberto Montezano, por me inspirar a seguir o caminho do conhecimento e me incentivar nessa empreitada.

À minha noiva, Tatiana Pescadinha, pela paciência, por estar ao meu lado nos momentos difíceis e pelas palavras de incentivo que me deram forças para continuar quando o cansaço e o desamino dominavam e força de vontade esvaecia.

A todos os meus familiares e amigos, que me deram forças para continuar.

A todos os meus colegas do Cresesb e do Cepel, em particular aos pesquisadores Ricardo Dutra e Antônio Leite por compartilhar seu conhecimento e experiência na área de energia eólica e pelas contribuições dadas para este trabalho, e ao engenheiro Sérgio Melo pelo suporte técnico na área de geoprocessamento imprescindível para realização deste trabalho.

Aos professores da COPPE/UFRJ, em particular a minha orientadora, Beatriz de Souza Leite Pires, por acreditar em mim até quando eu havia desistido.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a

obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTRATÉGIAS PARA IDENTIFICAÇÃO DE SÍTIOS EÓLICOS PROMISSORES USANDO

SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E

**ALGORITMOS EVOLUTIVOS** 

Bruno Eduardo Moreira Montezano

Outubro/2012

Orientador: Beatriz de Souza Leite Pires Lima

Programa: Engenharia Civil

A energia eólica tem ganhado bastante destaque no cenário mundial por ser uma fonte de

energia renovável e limpa, sendo considerada como uma das alternativas energéticas mais

promissoras para ajudar a reverter o quadro atual de mudanças climáticas. Na perspectiva

econômica, a geração eólica tem apresentado custos competitivos com fontes convencionais de

energia baseadas em combustíveis fósseis. Entretanto, a energia eólica, como qualquer outra

atividade industrial, pode causar impactos no ambiente que devem ser analisados e mitigados. Essas

duas dimensões controversas da energia eólica tornam a questão da localização de parques eólicos

um problema bastante complexo, dado o número de impactos associados a parques eólicos e a

incompatibilidade entre esses impactos de caráter localizado e o grande benefício público associado

à energia eólica. Dentro desse contexto, este trabalho procura identificar e discutir os fatores que

influenciam a localização de parques eólicos e os critérios que orientam na determinação e escolha

de sítios eólicos promissores. Baseado na natureza e característica espacial de cada critério

identificado, estratégias adequadas de mensuração são discutidas e avaliadas através de uma revisão

da literatura e da experiência adquirida em atividades de campo pelo autor. Por fim, é proposta uma

metodologia para identificação de sítios eólicos promissores usando Sistemas de Informação

Geográfica, métodos de Apoio Multicritério a Decisão e Algoritmos Evolutivos.

vi

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for

the degree of Master of Science (M.Sc.)

ESTRATEGIES FOR IDENTIFICATION OF POTENCIAL WIND SITES USING

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM AND

**EVOLUTIONARY ALGORITHMS** 

Bruno Eduardo Moreira Montezano

October/2012

Advisor: Beatriz de Souza Leite Pires Lima

Department: Civil Engineering

Wind power is a clean and renewable energy source and has gained prominence worldwide

as it is considered as one of the most promising energy alternative source to tackle the current

climate change. In the economic perspective, wind generation has made cost-competitive with

conventional energy sources based on fossil fuels. However, like any other industrial activity, wind

power may cause environmental impacts that should be analyzed and mitigated. These two

controversial dimensions of wind energy make the issue of wind farm siting a very complex

problem, given the number of impacts associated with wind farms and incompatibility between

these impacts which are localized in specific domains and the great public benefits associated with

wind energy. Within this context, this work seeks to identify and discuss the factors that influence

the location of wind farms and the criteria that guide the determination and selection of promising

wind sites. Based on the nature and spatial characteristic of the criteria identified, appropriate

measurement strategies are discussed and evaluated through a literature review and the experience

gained in field activities by the author. Finally, a methodology to identify promising wind sites is

proposed using Geographic Information Systems, Multi-criteria Decision Methods and

Evolutionary Algorithms.

vii

# Sumário

1	Int	rodu	ção	1
	1.1	Pro	oblema de localização de parques eólicos	1
	1.2	Pla	nejamento local e estratégico	3
	1.3	Ene	ergia Eólica no Brasil	5
	1.4	Ob	jetivo do trabalho	. 15
2	Sel	leção	de Sítios Eólicos	. 19
	2.1	Or	recurso eólico	. 19
	2.1	.1	Efeitos locais de vento	. 24
	2.2	Imp	pactos ambientais	. 33
	2.2	.1	Impacto visual e sobre a paisagem	. 34
	2.2	2	Impacto de ruído acústico	. 38
	2.2	3	Ocupação e uso da terra	. 40
	2.2	.4	Impacto sobre aves	. 42
	2.2	5	Interferência eletromagnética	. 45
	2.3	Des	senvolvimento de projetos eólicos	. 46
	2.3	.1	Práticas do CEPEL	. 51
	2.4	Pro	jeto de um Parque Eólico	. 53
	2.4	.1	Otimização da produção de energia elétrica	. 55
	2.4	.2	Carregamento do aerogerador	. 56
	2.4	.3	Infraestrutura	. 58
	2.5	Cri	térios de Avaliação de Sítios Eólicos	. 60
	2.5	.1	Recurso eólico	. 62
	2.5	.2	Área disponível	. 66
	2.5	.3	Conexão à rede elétrica	. 67

2.5.4 Acessibilidade	70
2.5.5 Ocupação e uso da terra	70
2.6 Considerações finais	71
3 Metodologia	73
3.1 O problema de localização de sítios eólicos	73
3.2 Modelos de SIG-AMD para a localização de parques eólicos	s75
3.3 Abordagens e métodos de busca de sítio	95
3.3.1 Contiguidade em busca de sítio	95
3.3.2 Forma espacial em busca de sítio	99
3.4 Um algoritmo evolutivo para a busca de sítio	103
3.4.1 Formulação do problema	104
3.4.2 Algoritmos evolutivos	107
3.4.3 Desenho do AE para o problema de busca de sítio	108
3.4.4 Controle de forma do sítio no AE	114
3.5 Metodologia de localização de sítios eólicos	121
3.5.1 Definição da região de estudo	123
3.5.2 Levantamento e definição das restrições	127
3.5.3 Identificação de sítios eólicos	130
3.6 Considerações finais	
4 Estudo de caso e resultados	
4.1 Definição da região de estudo	146
4.2 Levantamento e definição das restrições	
4.3 Identificação de sítios eólicos	
4.3.1 Análise de adequação	
4.3.2 Busca de sítios eólicos	

5	Co	nclusões e propostas de trabalhos futuros	165
	5.1	Proposta de trabalhos futuros	.173
6	Re	ferência Bibliográfica	176
A	NEXC	) I	. 189

# Lista de Figuras

Figura 1 - Evolução dos Leilões de Fontes Alternativas (EPE, 2010) (EPE, 2011)
Figura 2 - Evolução dos preços teto e médio final de todos os leilões e energia eólica (EPE,
2011)
Figura 3 - Participação da energia eólica no planejamento de longo prazo do setor elétrico
(EPE, 2009) (EPE, 2010) (EPE, 2011)
Figura 4 - Mapa de velocidade média de vento e fluxo de potência eólica anual do Atlas do
Potencial Eólico Brasileiro (CEPEL, 2001).
Figura 5 - Comportamento do vento sob a influência das características do terreno (Fonte:
Atlas Eólico do Brasil, 1998)
Figura 6 - As classes de rugosidade e as paisagens adotadas pelo Atlas Eólico Europeu
(MORTENSEN, et al., 1993)
Figura 7 - Efeito do obstáculo sobre os ventos, em função da sua altura (MORTENSEN, et
al., 1993)
Figura 8 – Diferentes tipos de paisagem. Terrenos planos (superior esquerda) e morros
(superior direita) geralmente estão dentro dos limites de modelos de fluxo linearizado
(como o WAsP). À medida que o terreno fica mais íngreme (inferior esquerda) esses
modelos devem ser utilizados com cautela. Para terrenos montanhosos cortados por vales
profundos (inferior direita) modelos de fluxo mais avançados devem ser utilizado (baseados
em CFD) (PETERSEN, et al., 1998)
Figura 9 - Aceleração orográfica em um morro (LACTEC, 2007)32
Figura 10 - Aceleração orográfica em uma escarpa (LACTEC, 2007)
Figura 11 - Esteira aerodinâmica e afastamento entre turbinas eólicas (CEPEL, 2001) 57
Figura 12 - Divisão típica do custo de capital para parque eólico em terra (EWEA, 2009).59
Figura 13 - Uma classificação simples dos métodos computacionais existentes para busca
de sítios (COVA e CHURCH, 2000b).
Figura 14 - Representação espacial em formato raster (esquerda) e formato vetorial
(direita)
Figura 15 - Mapa de adequação para localização de Parques Eólicos (BABAN e PARRY,
2001)

Figura 16 - Diagrama do SIG Regional da região NE da Inglaterra com as categorias de
informação (modelos) destacadas pelos blocos em azul claro (DUNSFORD, et al., 2003).84
Figura 17 - Exemplo de cenário de modelagem usando o SIG Regional do NE da Inglaterra
(DUNSFORD, et al., 2003)87
Figura 18 - Diagrama do método regional de análise de adequação de parque eólicos
desenvolvido pelo Governo da Cidade do Cabo na África do Sul (DEADP, 2006)
Figura 19 - Modelos físico, ambiental e de impacto humano para avaliação do potencial de
implantação de parque eólico de grande porte (RODMAN e MEENTEMEYER, 2006)93
Figura 20 - Comparação do processo de modelagem da preferência da forma com o uso
tradicional de medidas quantitativas para descrever uma forma existente (COVA e
CHURCH, 2000b)
Figura 21- Algumas definições possíveis de vizinho utilizando modelos de dados raster
onde as células em azul são consideradas vizinhas da célula central em cinza102
Figura 22 - Representação do grafo de um problema de busca de sítio com um modelo
espacial raster. (a) Uma grade regular de 4 x 4 onde as quatro células cinzas são alocadas
(i.e., p=4); (b) o grafo da grade onde cada número identifica um vértice. Assim, $V =$
1, 2,, 16; $E = \{1, 2, 1, 5, 2, 3, \dots, 15, 16\}$ $V' = 6, 7, 9, 10$ ; $E' = 6, 7, 6, 10, 9, 10$ . A
cada vértice também é associado um valor de custo que forma o vetor de atributo A 105
Figura 23 - Procedimento geral de um algoritmo evolutivo
Figura 24 - Inicialização usando um procedimento de crescimento de sítios (XIAO, 2006).
Figura 25 - Processo de crescimento de sítio a partir de uma célula semente usado pelo
algoritmo ACCRETE-SITE, onde a célula semente é indicada em azul escuro. As células
em azul mais claro indicam o processo de crescimento do sítio a partir da célula semente.
Figura 26 - Algoritmo de busca local (XIAO, 2006)
Figura 27 - Exemplo da execução do algoritmo LOCAL-SITE. Em (1) as células em azul
compõe a solução, em (2) as células movíveis são marcadas em verde, (3) apresenta a
célula movível selecionada aletoriamente está em azul escuro e as células elegíveis para
fazer parte da solução estão em cinza, e (4) mostra a solução modificada destacando a
célula movida em azul escuro 112

Figura 28 - Operador de mutação para o problema de busca de sítio (XIAO, 2006). As
funções INIT-SITE e ACCRETE-SITE são listadas na Figura 24113
Figura 29 - O algoritmo evolutivo para problemas de busca de sítio (XIAO, 2006) 113
Figura 30 - Foto do complexo eólico de Osório (RS) composto por três parques eólicos.
Cada parque possui uma potência de 50 MW e 25 aerogeradores distribuídos em uma
fileira. (Fonte: CRESESB, 2006)
Figura 31 - Área ocupada por Parques eólicos de 20 MW e 50 MW com aerogeradores
distribuídos em uma única fileira e considerando a utilização de toda a área disponível 116
Figura 32 - Diagrama do processo de crescimento de sítio (CHURCH, et al., 2003)119
Figura 33 - Etapas e componentes da metodologia de localização de sítios eólicos proposta.
As caixas com linha tracejada indicam processos previstos não definidos no presente
trabalho123
Figura 34 - Área do estudo de caso definida pela linha vermelha que compreende a região
sul da Bahia e parte do Nordeste de Minas Gerais vista no Google Earth com o mapa de
velocidade média anual de vento do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro na resolução de 1
km x 1 km125
Figura 35 - Região aproximada da área de estudo de caso vista pelo aplicativo on-line do
SWERA com o mapa de velocidade média anual de vento do Atlas do Potencial Eólico
Brasileiro na resolução de 10 km x 10 km
Figura 36 - Tela do serviço web Wind Site Assessment Dashboard da AWS Truepower
apresentando o mapa de vento da área do estudo de caso (AWS TRUEPOWER, 2012)127
Figura 37 - Formas de avaliação das unidades espaciais de um modelo de dados raster. Na
avaliação estática (à esquerda) todos os critérios estáticos são pré-processados para gerar
um único mapa de adequação. Na avaliação dinâmica (à direita) não existem critérios
estáticos, os mapas de atributos são avaliados diretamente pelo AE de busca de sítio 131
Figura 38 - Métricas de avaliação do grau de complexidade do terreno que podem ser
usadas para avaliar a adequação do relevo do local para o aproveitamento da energia eólica.
Figura 39 - Princípio de avaliação do critério de sombreamento do relevo, onde a área
cinza indica os locais que sofrem influência do relevo a montante do vento

Figura 40 - Representação espacial de um Parque Eólico de 10 MW formado por 5
aerogeradores dispostos em uma única fileira em um modelo raster141
Figura 41 - Região de estudo delimitada pela linha preta vista no programa Google Earth
sobreposta com a camada do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. As cores que vão de
amarelo a roxo indicam os ventos superiores a 6,5 m/s e as linhas azuis indicam a direção
do vento na localidade. A área de análise é delimitada pelo quadrado de linha cinza 147
Figura 42 - Perfil de elevação do terreno visto pelo vento vindo da direção Leste
(considerando o sentido da esquerda para direita no gráfico), onde a Seta vermelha mostra o
local indicado pelo Atlas Eólico com o melhor vento
Figura 43 - Perfil de elevação do terreno visto pelo vento vindo da direção Sudeste
(considerando o sentido da esquerda para direita no gráfico), onde a Seta vermelha mostra o
local indicado pelo Atlas Eólico com o melhor vento
Figura 44 - Imagem de satélite da área de análise onde as linhas vermelhas indicam as
rodovias principais, em azul as linhas de transmissão de média e alta tensão, o ícone em
azul na forma de avião os aeroportos e os polígonos em amarelo são áreas urbanas 150
Figura 45 – Mapa de restrição da área de análise, onde as áreas em branco são inadequadas
para a implantação de parques eólicos
Figura 46 - Estrutura hierárquica de objetivos e atributos proposta para a análise de
custo/adequação do local. Os critérios com linhas tracejadas não foram usados na análise.
Figura 47 - Mapa de custo da área do estudo de caso onde as áreas em azul são mais
promissoras e em vermelho menos. As áreas em branco são consideradas inadequadas, com
gradientes de inclinação maiores que 10%
Figura 48 - Mapa de custo restrito da área do estudo de caso onde as áreas em azul são mais
promissoras, em vermelho as áreas menos promissoras, e as áreas em branco são
inadequada para implantação de um parque eólico
Figura 49 – Curva de evolução da função objetivo do problema. A linha azul indica o valor
do melhor indivíduo e a linha verde a média da população em cada geração158
Figura 50 - Mapa da população final da execução do algoritmo modSITE-EA usando a
configuração padrão apresentada na Tabela 21. Áreas em verde indicam os sítios mais

promissores, áreas em amarelo indicam os sítios intermediários e áreas em laranja e
vermelho os sítios menos promissores
Figura 51 – Mapas da população final resultantes da execução do algoritmo modSITE-EA
com o valor do parâmetro nlocal igual a 20, 50 e 100, respectivamente. Áreas em verde
indicam os sítios mais promissores, áreas em amarelo indicam os sítios intermediários e
áreas em laranja e vermelho os sítios menos promissores
Figura 52 - Mapas da população final resultantes da execução do algoritmo modSITE-EA
com o valor do parâmetro ntabu igual a 3, 10 e 20, respectivamente. Áreas em verde
indicam os sítios mais promissores, áreas em amarelo indicam os sítios intermediários e
áreas em laranja e vermelho os sítios menos promissores
Figura 53 - Mapas da população final resultantes da execução do algoritmo modSITE-EA
com o valor do parâmetro kneighbor igual a 0,01, 0,1 e 1, respectivamente. Áreas em verde
indicam os sítios mais promissores, áreas em amarelo indicam os sítios intermediários e
áreas em laranja e vermelho os sítios menos promissores
Figura 54 - Mapas da população final resultantes da execução do algoritmo modSITE-EA
com o valor dos parâmetros kshape e kneighbor iguais a 0,01, 0,1 e 1, respectivamente.
Áreas em verde indicam os sítios mais promissores, áreas em amarelo indicam os sítios
intermediários e áreas em laranja e vermelho os sítios menos promissores164

# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Sensibilidade da produção de energia de um parque eólico a velocidade média
anual (EWEA, 2009)
Tabela 2 - Comparativo de ruído com atividades cotidianas (Fonte: EWEA, 2009) 39
Tabela 3 - Distribuição da estimativa anual da mortalidade de pássaros por atividades
humanas (Fonte: ERICKSON, 2005).
Tabela 4 - Etapas e frentes de trabalho de um empreendimento eólico (LACTEC, 2007)49
Tabela 5 - Critérios de avaliação selecionados para a localização de sítios eólicos
promissores
Tabela 6 - Exigência de tensão mínima para certa potência (COPEL/Resolução nº 456/2000
da ANEEL) (LACTEC, 2007)
Tabela 7 - Critérios de restrição de localização de parques eólicos (BABAN e PARRY,
2001)80
Tabela 8 - Lista de dados compilados para o modelo de Restrições SIG (DUNSFORD, et
al., 2003)85
Tabela 9 – Modelo de adequação de impactos humanos para localização de aerogeradores
(RODMAN e MEENTEMEYER, 2006)91
Tabela 10 – Classes de modelo de adequação físico para velocidade do vento, obstáculos e
terreno (RODMAN e MEENTEMEYER, 2006)91
Tabela 11 - Modelo de adequação ambiental para localização de aerogeradores
(RODMAN e MEENTEMEYER, 2006)91
Tabela 12 - Resumo da revisão bibliográfica dos modelos de localização de parque eólicos.
94
Tabela 13 - Tamanhos de um parque eólico em função da potência considerando a
capacidade instalada de 6MW/km² e a resolução da grade espacial de 92 m x 92 m 115
Tabela 14 - Parâmetros usados no Algoritmo Evolutivo (AE) proposto para o problema de
busca de sítio
Tabela 15 – Conjunto de restrições consideradas para a simulação do estudo de caso 128
Tabela 16 - Conjunto de critérios considerados e estratégias de modelagem sugeridas para o
problema de localização de sítios eólicos promissores

Tabela 17 – Etapas do procedimento de cálculo do critério de exposição usando DEM	l em
paralelo com as operações executadas no programa ArcGIS.	134
Tabela 18 – Peso atribuído aos critérios de topografia utilizados.	154
Tabela 19 - Divisão típica dos custos de capital para um parque eólico em terra (EW	ΈA,
2009)	154
Tabela 20 - Pesos dos critérios principais que contribuem diretamente para a avaliação	o do
objetivo.	155
Tabela 21 – Configuração dos parâmetros para execução do algoritmo modSITE-AE	.157
Tabela 22 - Configurações dos experimentos sobre os parâmetros	160
Tabela 23 – Resultados dos experimentos sobre o parâmetro <i>nlocal</i>	161
Tabela 24 – Resultados dos experimentos sobre o parâmetro <i>ntabu</i>	162
Tabela 25 – Resultados dos experimentos sobre o parâmetro kneighbor	163
Tabela 26 – Resultados dos experimentos sobre os parâmetros kshape e kneighbor	164

#### Lista de Abreviaturas

AAE – Avaliação Ambiental Estratégica

ABEEÓLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica

AE – Algoritmo Evolutivo

AIA – Avaliação de Impacto Ambiental

AMD – Apoio Multicritério a Decisão

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BWEA – British Wind Energy Association

*CCEE* – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CFD – Computational fluid dynamics (dinâmica dos fluidos computacional)

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

*CRE* – Certificado de Redução de Emissões

*DEM* – Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevação)

*DTM* – Digital Terrain Model (Modelo Digital de Terreno)

*EPE* – Empresa de Planejamento Energético

EWEA – European Wind Energy Association

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

*HV/MV* – High Voltage and Medium Voltage

LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

*MDL* – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MDMC - Métodos de decisão multicritério

MMA – Ministério de Meio Ambiente

*MME* – Ministério de Minas e Energia

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia

PROINFA – Programa de Incentivo a Fontes Alternativas

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SIG-AMD - Sistema de Informação Geográfica e Apoio Multicritério a Decisão

SIN – Sistema Interligado Nacional

STRM – Shuttle Radar Topography Mission

*UC* – Unidade de Conservação

WLC - Weighted Linear Combination

WWEA – World Wind Energy Association

ZVT – Zona de visibilidade teórica

# 1 Introdução

## 1.1 Problema de localização de parques eólicos

No cenário atual o desenvolvimento da energia eólica tem sido motivado por duas grandes preocupações: a ameaça de mudanças climáticas e o efeito do aquecimento global, e a necessidade dos países de reduzirem a dependência externa de combustíveis fósseis e garantir o abastecimento energético nacional (SIMÃO, *et al.*, 2009) (EWEA, 2009) (DUTRA, 2007).

A matriz energética da maioria dos países é baseada predominantemente na queima de combustíveis fósseis (WWEA, 2012), e esse processo libera gases tóxicos e gases de efeitos estufa (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>) na atmosfera contribuindo para o aquecimento global. A segurança do abastecimento energético é outra questão fundamental no contexto nacional dos países em um setor estratégico, que em geral depende da importação de combustíveis fósseis com preços sujeitos a grande volatilidade no mercado internacional. Desse modo, governos estão sendo pressionados a buscar alternativas de geração de energia menos poluentes e endógenas e nesse contexto, entre as diversas fontes de energia capazes de suprir essas demandas, a energia eólica tem se apresentado como a mais viável economicamente, com custos bastante competitivos comparado a fontes convencionais de geração de energia(SIMÃO, *et al.*, 2009) (DUTRA, 2007).

A energia eólica é uma tecnologia limpa e ambientalmente correta que produz eletricidade. O seu caráter renovável e o fato de não poluir durante sua operação tornam a energia eólica uma das fontes mais promissoras para mitigação de problemas ambientais tanto a nível global como local. Entretanto, a energia eólica, como qualquer outra atividade industrial, pode causar impactos no ambiente que devem ser analisados e mitigados. (EWEA, 2009).

Alguns impactos ambientais desfavoráveis atribuídos a parques eólicos instalados em terra são: impacto visual e degradação da paisagem, ruído, cintilação de sombra (*shadow flicker*), ofuscamento, interferência eletromagnética e danos à fauna e flora. Em geral, esses impactos são específicos do local e, portanto, fortemente dependentes da

localização selecionada para a instalação do parque eólico. Essas características aparentemente negativas podem ser significativamente amenizadas, e até mesmo eliminadas, através de planejamento adequado e também da aplicação de novas tecnologias (EWEA, 2009) (DUTRA, 2007).

Apesar do reconhecimento dos benefícios globais associados e a forte aceitação pública favorável à energia eólica, impactos locais associados a parques eólicos podem causar a forte oposição da comunidade local e/ou de grupos específicos ao desenvolvimento de empreendimentos eólicos. Essas duas dimensões controversas da energia eólica, tornam a questão da localização de parques eólicos um problema bastante complexo, dado o número de impactos associados a parques eólicos e a incompatibilidade entre esses impactos, que são relativamente localizados e interferem em alguns domínios específicos, e o grande benefício público associado à energia eólica (SIMÃO, *et al.*, 2009).

A questão controversa da localização de parques eólicos ganhou notoriedade e passou a ser bastante discutida na Europa no início da década de 1990, em países onde a penetração da energia eólica crescia de forma expressiva. Desse ambiente de conflito nascia, em 1994, o guia "Best Practice Guidelines for Wind Energy Development" da Associação Britânica de Energia Eólica (BWEA) (GIPE, 2003) (BWEA, 1994). Esse guia orienta o empreendedor desde a etapa inicial de seleção do sítio até o eventual descomissionamento do parque eólico, com intuito de garantir que o projeto seja "adequadamente localizado e sensivelmente desenvolvido" (BWEA, 1994). A Associação de Energia Eólica Europeia (EWEA) seguiu o exemplo da BWEA e incorporou o guia de "boas práticas" em 1999 (EWEA, 2002). Outros países publicaram seus próprios guias de "boas práticas" adaptados às condições locais e ao contexto regulatório nacional (AUSWEA, 2006) (GIPE, 2003).

No Brasil, podemos citar o "Manual de Avaliação Técnico-Econômica de Empreendimentos Eólio-Elétricos"(LACTEC, 2007) que se baseia na estrutura de projeto proposta originalmente pelo guia da BWEA, mas tem uma abordagem mais técnica propondo uma metodologia de avaliação de projetos eólicos adaptada a realidade brasileira.

### 1.2 Planejamento local e estratégico

Em geral, o planejamento de parques eólicos em terra é dirigido pelo empreendedor que escolhe o local adequado para o projeto, desenvolve uma proposta e, finalmente, procura obter a licença de construção junto à autoridade de planejamento local. A fim de evitar uma provável resistência local ao projeto, o empreendedor é encorajado a envolverse no diálogo e consulta com as partes interessadas e a comunidade local (BWEA, 1994). Esse tipo de planejamento acontece no nível local (SIMÃO, *et al.*, 2009).

No Reino Unido, a abordagem regional do governo para o planejamento estratégico e as metas para energias renováveis só se aplica no nível político, pois, na prática, o planejamento para energias renováveis, em particular a energia eólica, acaba ocorrendo no nível local conforme descrito anteriormente. Países como Dinamarca e País de Gales tem uma abordagem diferente. O governo dinamarquês, por exemplo, exige que os governos locais determinem áreas para o desenvolvimento de empreendimentos eólicos. Os planos regionais definem o âmbito para os planos municipais. Assim, os municípios podem iniciar o planejamento da localização de parques eólicos somente naquelas áreas designadas para esse uso no planejamento regional e os empreendedores ainda necessitam de obter a licença para construção dos municípios nas áreas designadas (SIMÃO, *et al.*, 2009).

Simão et al. (2009) defende o estudo de impactos em níveis mais estratégicos dizendo que uma análise a nível regional, ou sub-regional, permite levantar questões sobre os impactos cumulativos e pode ajudar também a gerenciar expectativas: comunidades em áreas com grande potencial eólico estarão cientes disso antes que qualquer pedido de licença de construção no local seja apresentado. Defende também que o planejamento estratégico direciona o empreendedor e reduz incertezas sobre a avaliação do projeto de um parque. Outro argumento foca sobre a realização de avaliações ambientais para os planos que contêm infraestruturas de energia eólica. A avaliação estratégica de impactos pode ajudar também na identificação de problemas de propostas de parques eólicos em estágios iniciais, antes que quantias consideráveis tenham sido gastas.

Assim, a estratégia regional de designação de áreas adequadas ao desenvolvimento da energia eólica pode ser considera interessante por vários motivos, dentre eles:

- Permite antecipar a abordagem de questões espaciais e ambientais do processo de localização de parques eólicos reduzindo o risco objeções ao projeto, favorecendo a implantação efetiva de parques eólicos e reduzindo o risco do empreendedor;
- Pode ajudar a melhorar a integração com outros usos da terra, identificando, por exemplo, áreas com vocação para atividades de agricultura e pecuária compatíveis com energia eólica<sup>1</sup>, aumentando a produtividade da terra;
- Permite avaliar os impactos cumulativos do desenvolvimento de vários parques distintos em uma região;
- Auxilia no planejamento da infraestrutura da região, permitindo otimizar gastos e investimentos; e
- Ajuda na definição de metas factíveis no desenvolvimento de políticas específicas e/ou programas de incentivo para energia eólica, que ressaltem as vantagens regionais da integração da energia eólica no SIN.

No Brasil, a decisão da localização de um parque eólico em terra é orientada pelo empreendedor. O processo de licenciamento necessário à implantação de projetos de geração de energia em geral exige o licenciamento ambiental e a avaliação de impacto ambiental (AIA), que é realizado levando-se em conta a localização e os impactos ambientais e sociais prováveis do empreendimento (TCU, 2007). Os órgãos estaduais de meio ambiente são, normalmente, os responsáveis pela emissão e fiscalização das licenças ambientais necessárias, podendo em algumas situações passar pela anuência do IBAMA<sup>2</sup> (LACTEC, 2007). Em geral, esse processo de licenciamento costuma ser custoso e demorado, sendo a parte de licenciamento ambiental apontada pelos empreendedores do setor de energia como uma das principais causas de atraso na implantação de empreendimentos.

Uma avaliação ambiental estratégica (AAE) é o procedimento usado para avaliar os impactos adversos de qualquer plano ou programa sobre o meio ambiente. Nesse contexto,

4

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> A área construída ocupa efetivamente 1 a 3% da área destinada ao parque eólico. Durante a operação, atividades como agricultura e caminhada podem continuar existindo em torno dele. Além disso, animais como vacas e ovelhas não são incomodados (EWEA, 2012).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.

AAEs podem ser usadas para informar a seleção de locais estratégicos para geração de energias renováveis e identificar a informação necessária para AIAs individuais (EWEA, 2009). Portanto, a proposta de uma abordagem regional baseada na definição de áreas estratégicas é bastante favorável ao desenvolvimento das fontes renováveis alternativas (caracterizadas por projetos de menor porte com impactos ambientais reduzidos em relação às fontes convencionais), em particular a energia eólica, na medida em que (SIMÃO, *et al.*, 2004):

- Favorece a tomada de decisão mais consistente e uniforme, baseada na definição de critérios claros e objetivos, o que torna o processo de licenciamento ambiental mais transparente e legítimo;
- Favorece o licenciamento ambiental mais ágil e consistente, quando antecipa e trata questões espaciais e ambientais no contexto regional; e
- Traz mais confiança ao empreendedor quanto ao resultado do pedido de licenciamento submetido, reduzindo o risco do projeto.

## 1.3 Energia Eólica no Brasil

A energia eólica tem ganhado bastante destaque no cenário mundial por ser uma fonte de energia limpa e renovável que pode ajudar a reverter o quadro atual de mudanças climáticas e ser dentre as fontes alternativas de geração elétrica a que tem apresentado os custos mais competitivos com fontes convencionais de energia baseadas em combustíveis fósseis (EWEA, 2009). No final de 2011 a capacidade mundial instalada de energia eólica chegou a 237 GW (WWEA, 2012), quase o dobro da capacidade elétrica instalada atualmente no Brasil (ANEEL, 2012). A China lidera o ranking dos países com maior capacidade eólica instalada no mundo com 62,4 GW, seguido pelo EUA (46,9 GW), Alemanha (29 GW), Espanha (21,7 GW) e Índia (15,9 GW) (WWEA, 2012).

Apesar da eletricidade produzida a partir da energia eólica responder por somente 3% do consumo mundial, a sua taxa de crescimento é expressiva. Entre o período de 2001 a 2011 a capacidade eólica instalada no mundo praticamente dobrou a cada 3 anos (WWEA, 2012). Além disso, ela alcançou uma penetração relativamente alta na matriz elétrica de

países como Dinamarca (21,3% da produção de eletricidade), Espanha (11,8%), Portugal (9,3%), Irlanda (8,4%) e Alemanha (7%) (EWEA, 2009).

Toda essa evolução da energia eólica no mundo se deve a investimentos em pesquisa e a políticas de incentivo de longo prazo iniciados nas décadas de 1980 e 1990 por países como a Alemanha, Dinamarca, Estados Unidos e Inglaterra e depois outros como Espanha, China e Índia, o que permitiu um rápido avanço da tecnologia aliado à consolidação de uma indústria eólica internacional forte e, como consequência, a queda sucessiva do custo da energia elétrica gerada. Nos últimos 20 anos, os aerogeradores, além de ganharem eficiência, aumentaram seu tamanho em 100 vezes, partindo de 25 kW (década de oitenta) para 2500 kW e além (EWEA, 2009).

A tendência do crescimento do mercado mundial de energia eólica de permanecer forte e expressivo pode ser vista no seu desempenho no ano de 2011 onde teve uma taxa de crescimento de 20,3 % em relação a 2010, apresentando, desta forma, a menor taxa de crescimento nos últimos 10 anos. Recentemente, o tradicional mercado Europeu de energia eólica tem reduzido seu ritmo de expansão<sup>3</sup>, mas, em compensação, os mercados Chinês, Americano e Indiano continuam em franca expansão, tomando a liderança do mercado mundial de energia eólica (WWEA, 2012).

A América Latina, apesar de ter uma participação ainda pequena no mercado mundial (acumulando 3,2 GW em 2011), tem apresentado as maiores taxas de crescimento devido principalmente ao Brasil e o México (WWEA, 2012), o que vem atraindo à atenção dos grandes fabricantes internacionais de aerogeradores sendo considerada como um mercado bastante promissor.

O Brasil possui atualmente uma potência instalada de geração eólica de 1,82 GW, o que representa ainda uma participação pequena na matriz elétrica nacional de 1,46%

em terra enfrentada por vários países europeus, que tem visto como alternativa a expansão off-shore, um mercado relativamente novo onde a tecnologia ao encontra-se fase desenvolvimento e maturação.

6

 $<sup>^3</sup>$  O mercado eólico Europeu tem liderado a expansão da energia eólica nos últimas duas décadas. O fenômeno de desaceleração do ritmo de expansão desse mercado tradicional observado nos últimos anos pode ser justificado em parte pelos efeitos da crise financeira internacional que eclodiu em 2008 nos EUA e atingiu com forte intensidade a Europa, e restrições físicas e ambientais para a instalação de novos parques eólicos

(ANEEL, 2012). Entretanto, apresenta um potencial eólico em terra estimado de 143 GW<sup>4</sup>, com mais da metade do potencial localizado na região Nordeste (CEPEL, 2001). Além desse enorme potencial inexplorado, Dutra e Szklo (2008) destacam que a integração da energia eólica na matriz elétrica brasileira apresenta uma série de vantagens quando comparada com as fontes convencionais de geração:

- Contribui para diversificação da matriz elétrica, predominantemente hidráulica<sup>5</sup>
   (70% da capacidade instalada);
- Ajuda a reduzir o uso de usinas termoelétricas movidas a combustíveis fósseis, reduzindo também o risco geopolítico relacionado ao acesso do gás natural no Brasil<sup>6</sup>;
- Permite a otimização da operação das usinas hidrelétricas em função do fenômeno de complementaridade sazonal dos regimes hidrológico e eólico identificado em algumas regiões do país principalmente nos períodos de seca<sup>7</sup> (ROCHA, *et al.*, 1999).

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Esse potencial foi estimado com base nos resultados do estudo Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (CEPEL, 2001) baseado na tecnologia dos aerogeradores disponíveis na época a uma altura de 50m. Considerando o melhora na eficiência dos aerogeradores modernos e elevação da altura de instalação entre 80 a 120 m (a velocidade do vento tende a aumentar com altura em função do comportamento do perfil vertical do vento na camada limite atmosférica), esse potencial é considerado atualmente bastante conservador.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> A geração hidrelétrica representa 70% da capacidade instalada e responde por 85% da geração de eletricidade no Brasil. Ainda existe um potencial hidrelétrico não aproveitado considerável (estimado em 170 GW) (MME, 2007), mas concentrado principalmente na região Norte e longe dos grandes centros consumidores da região Sudeste, acarretando em custos mais elevados transmissão assim com restrições ambientais.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> O Brasil importa quase 50% da sua demanda de gás natural da Bolívia. Em 1º de Maio de 2006, o Presidente Evo Morales emitiu o decreto Supremo 28,701, que ordenava a nacionalização do setor de hidrocarbonetos do País, causando o temor de interrupções não planejado no abastecimento de gás natural do Brasil (DUTRA e SZKLO, 2008).

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Nesse contexto a complementariedade hídrico-eólica apresenta uma possibilidade de minimizar os riscos de déficit da capacidade de armazenamento nas barragens das usinas durante estações de estiagem com uma fonte de geração também renovável de energia. Essa complementaridade sazonal com o sistema hidrelétrico

Porrua *et al.* (2010) destaca que as novas fontes renováveis candidatas a complementar a expansão da geração elétrica baseada na construção de grandes hidrelétricas, são as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) (usinas hidrelétricas com capacidade instalada de até 30 MW e área de reservatório menor que 3 km²), parques eólicos e usinas termelétricas de biomassa (especialmente cogeração usando o bagaço de cana de açúcar). Essas fontes renováveis no Brasil possuem várias vantagens em relação a fontes convencionais de geração elétrica, como:

- Projetos de menor porte, o que diversifica (efeito de "portfólio") o risco de atrasos na construção normalmente observado em projetos de grandes hidrelétricas;
- Ampla gama de investidores (incluindo locais e estrangeiros), o que promove a competição por contratos (o oposto das grandes hidrelétricas e usinas termelétricas a combustível fóssil, onde o número de investidores é reduzido);
- Usa recursos locais, como mão de obra e equipamentos;
- Tempo de construção curto (12 a 24 meses), que é uma boa característica para lidar com incerteza do crescimento de carga. Isso é uma vantagem sobre hidrelétricas e usinas termelétricas de carvão, que levam 5 a 7 anos para ser construídas;
- Licenciamento ambiental mais fácil, em oposição a usinas termelétricas a combustível fóssil e grandes hidrelétricas localizadas na região ambientalmente sensível da Amazônia;
- Créditos de carbono: a geração renovável se qualifica para criação de créditos de Certificados de Redução de Emissões (CRE) sob o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) baseado no protocolo de Kyoto<sup>8</sup>, trazendo incentivos adicionais para investidores.

permitiria firmar a oferta de energia nos meses secos sem prejuízo aos níveis de segurança na estabilidade de fornecimento. Com o predomínio da geração hidrelétrica no Brasil, a estabilização sazonal da oferta de energia tem sido um desafio histórico ao planejamento da operação dos sistemas interligados (DUTRA, 2007).

8

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Como resultado da Conferência de Durban (África do Sul) realizada em 2011 o Protocolo de Kyoto foi prorrogado até 2017 (antes expirava em 2012), mas após esse período ainda não existe nenhum acordo. Porém, como os EUA não são signatários do Protocolo de Kyoto, não terão nada a cumprir, ou emissões a

A configuração da matriz elétrica brasileira, predominantemente hidráulica, com a presença de usinas hidrelétricas com grandes reservatórios hídricos com capacidade de regulação de armazenamento plurianual, pode facilmente absorver a flutuações de geração de fontes intermitentes de energia (como a energia eólica e solar) ou fontes de energia sazonais (biomassa e hídrica), permitindo assim a flexibilidade na operação do sistema. Esta característica facilita a integração técnica e econômica de fontes renováveis na matriz elétrica (BATLLE e BARROSO, 2011). Além disso, as dimensões geográficas do Sistema Interligado Nacional (SIN) e a operação de parques eólicos espalhados ao longo do sistema elétrico em regiões com características climatológicas distintas também favorece a operação do sistema elétrico<sup>9</sup> (CEPEL, 2001).

Porrua *et al.* (2010) observa também que localização regional do potencial eólico, concentrado principalmente no Nordeste, é bastante complementar a localização das outras fontes renováveis de energia disponíveis no país, já que a maior parte do potencial hidrelétrico ainda disponível está concentrada na região Norte enquanto a Biomassa (cogeração a partir do bagaço de cana de açúcar) tem seu maior potencial nas regiões Sudeste e Centro-oeste.

O Brasil, no contexto mundial do desenvolvimento da energia eólica, ampliou significativamente a participação da geração eólica na sua matriz elétrica como consequência de políticas específicas para o setor. Em 2004, existiam no Brasil 28,6 MW de projetos eólicos em operação, dos quais 26,5 em produção comercial. Eram projetos de pequeno porte e caráter experimental, em virtude do contexto político do setor elétrico brasileiro na época (DUTRA, 2007).

cortar. Como Kyoto também não estipula metas para os países em desenvolvimento, China e Índia também continuam sem metas de cortes de emissões até 2020, quando um novo acordo entrará em vigor (O GLOBO, 2012).

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> O aumento a distribuição geográfica dos parques eólicos ao longo do sistema elétrico, contribui para que as velocidades de vento vistas pelos diferentes parques eólicos se tornem menos correlacionadas, variando ao longo do tempo entre áreas com mais vento e outras menos. Desse modo o acúmulo das flutuações da produção de energia elétrica dos parques eólico permite reduzir a incerteza de geração e com isso permite a otimização do planejamento da operação (EWEA, 2009).

As várias políticas de incentivo para promoção do uso de fontes alternativas que foram implantadas na última década no Brasil convergiram para o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas (PROINFA) publicado em 26 de Abril de 2002 pela Lei Federal n° 10.438, que pode ser considerado como o marco da energia eólica no Brasil (DUTRA e SZKLO, 2008)(DUTRA, 2007). O PROINFA apresentou-se como o mais importante mecanismo de incentivo às fontes renováveis de energia, especificamente as fontes de energia eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas com os seguintes objetivos (MME, 2009):

- Diversificação da matriz energética brasileira, aumentando a segurança no abastecimento;
- Valorização das características e potencialidades regionais e locais, com criação de empregos, capacitação e formação de mão de obra;
- Redução de emissão de gases de efeito estufa.

O programa era dividido em duas fases. Na primeira fase do PROINFA previa a contratação de 3.300 MW em projetos divididos pelas três fontes até Dezembro de 2008 através de acordos de compra de energia de longo prazo (20 anos) entre o produtor de energia renovável e a Eletrobrás (holding estatal brasileira de empresas de energia). O custo desses contratos é dividido entre todos os consumidores através encargos na tarifa de energia proporcionais ao consumo. O processo da finalização da contratação dos projetos selecionados em outubro de 2004 possibilitou a contratação de 1422 MW em projetos eólicos com valores de venda de energia variando entre R\$ 320,00/MWh e R\$ 290,00/MWh<sup>10</sup> (EPE, 2010) dependendo do fator de capacidade de referência do parque eólico (DUTRA, 2007). A reforma no modelo do setor elétrico, ocorrida em 2004, alterou a segunda fase do PROINFA. Tal reforma instituía a modalidade de contratação energia elétrica por meio de leilões, a fim de controlar o aumento excessivo da tarifa de eletricidade, levando a indefinição da segunda fase do PROINFA (DUTRA e SZKLO, 2008).

Outra forma de incentivar o desenvolvimento de fontes renováveis no Brasil foi por meio de descontos nas tarifas de transmissão. Fontes renováveis de geração de energia

10

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Valores corrigidos até julho de 2012.

elétrica (PCH, energia eólica e biomassa) com potências de até 30 MW conectadas na rede elétrica de transmissão e distribuição tinham incentivos concedidos em contratos de energia com consumidores regulados não elegíveis para atuar no mercado livre 11. Esse tipo de contratação determina que consumidores regulados com demandas superiores a 500 kW irão receber um desconto de 50% sobre as tarifas de transmissão e distribuição caso a eletricidade contratada seja proveniente de fontes alternativas renováveis conforme já citado. Desde que essa dedução seja substancial, esses consumidores regulados podem oferecer preços de eletricidade atrativos para fontes alternativas em geral, acima do teto praticado em leilões de forma que a tarifa total resultante se torne economicamente interessante (PORRUA, *et al.*, 2010). Segundo *Porrua et al.* (2010), devido às características de intermitência e variabilidade da energia eólica, os riscos associados ao preço e à quantidade da energia gerada não tornaram essa opção de mercado atrativa ainda.

Após cinco anos desde a contratação dos projetos eólicos do PROINFA (2004) até o primeiro leilão de energia eólica (2009), a energia eólica passou por profundas transformações no mercado brasileiro. Com a suspensão da segunda fase do PROINFA dando lugar as regras do então novo modelo do setor elétrico, não houve nenhuma nova contração de projetos eólicos em um período de cinco anos. Neste período notou-se que, aparentemente, o mercado tinha se estagnado e que o novo modelo baseado em modicidade tarifária não seria capaz de alavancar novos projetos e que o setor, inevitavelmente iria sofrer forte recessão.

Não foi o que ocorreu. Mesmo com várias chamadas públicas para leilões de fontes renováveis, a energia eólica, ao longo de quatro anos, não participou dos leilões (Figura 1) principalmente pelos valores teto apresentados. Uma vez que as fontes biomassa e PCH apresentavam valores mais comparativos e inferiores aos da fonte eólica, estas se sagraram vencedoras em todas as chamadas até então. Com a chamada pública para o primeiro leilão exclusivo de energia eólica (2009) a perspectiva da fonte eólica começou a tomar rumos mais positivos. A partir de então foram realizados vários leilões para fonte eólica e tal foi seu desenvolvimento no Brasil que o mesmo chegou a apresentar valores mais competitivos do que aqueles apresentados por fontes tradicionais (Figura 2).

\_

 $<sup>^{11}</sup>$  Consumidores livre no Brasil são aqueles com demanda superior a 3 MW e conectados a níveis de tensão superiores a 69 kV.

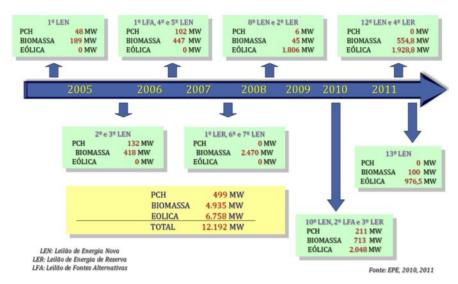


Figura 1 - Evolução dos Leilões de Fontes Alternativas (EPE, 2010) (EPE, 2011).

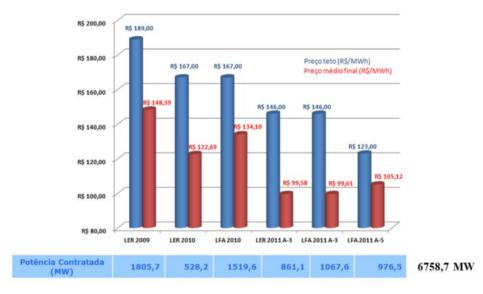


Figura 2 - Evolução dos preços teto e médio final de todos os leilões e energia eólica (EPE, 2011).

O fenômeno de queda nos preços de energia elétrica gerada a partir dos ventos está associado em grande parte com a evolução da tecnologia, escala de produção da indústria eólica mundial e o amadurecimento do mercado eólico brasileiro em função da experiência e conhecimento adquiridos com o PROINFA e outras políticas de incentivo a renováveis. É claro que outros fatores externos podem ter favorecido a grande variação de 2009 para 2012 como a valorização do real frente ao câmbio do dólar favorecendo a importação de

aerogeradores mais baratos, a desaceleração de mercados eólicos tradicionais Europeus, entre outros. Mas a expectativa é de que os preços da energia eólica praticados nos últimos leilões se mantenham competitivos, em função do contínuo aperfeiçoamento da tecnologia, o estabelecimento de um mercado eólico brasileiro competitivo<sup>12</sup>, o enorme potencial eólico disponível e inexplorado no Brasil e a perspectiva de aumento dos preços de combustíveis fósseis como o gás natural e derivados do petróleo no mercado internacional.

A perspectiva de crescimento da energia eólica no Brasil também pode ser observada nas publicações periódicas do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) (Figura 3). Esta publicação mostra as perspectivas de crescimento do abastecimento de energia em todas as formas disponíveis no setor energético brasileiro. Ao focar na geração eólica, é possível notar que os resultados dos leilões influenciaram os estudos da participação desta fonte em longo prazo. Até então, os valores apresentados no PDE 2017 apresentaram somente a participação do Proinfa (1.436 MW) no horizonte de 2017 (EPE, 2009). Um ano depois, o PDE 2019 apresentava valores importantes para o desenvolvimento da energia eólica com a expectativa de crescimento de 6 GW até 2019 representando 3,6% da potência de geração elétrica instalada no país (EPE, 2010). Finalmente, com o último estudo de expansão publicado até então (PDE 2020) a expansão da energia eólica chegaria a uma participação de 6,75% da matriz de geração de energia elétrica, representando 11,5 GW de potência instalada (EPE, 2011).

\_

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> A perspectiva crescimento econômico do Brasil com realização de anual de leilões de energia nova e enorme potencial eólico inexplorado que tem atraído o interesse de grandes fabricantes internacionais de aerogeradores. Até metade da década passada só existia um grande fabricante instalado no Brasil, a Wobben, hoje já temos um total de nove empresas já instaladas (Wobben, Suzlon, GE, IMPSA, Vestas, Siemens, Acciona, Alston e Gamesa), e mais duas com indicativos de inauguração até o final de 2012 (ABEEOLICA, 2012).

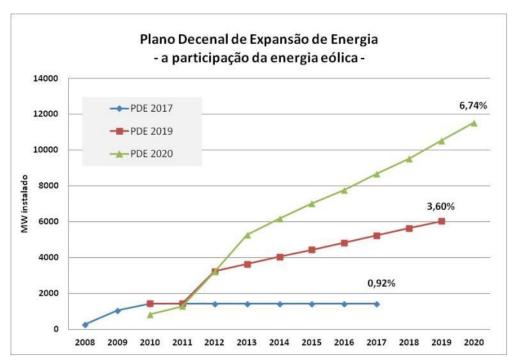


Figura 3 - Participação da energia eólica no planejamento de longo prazo do setor elétrico (EPE, 2009) (EPE, 2010) (EPE, 2011).

Em recente entrevista realizada durante o evento *Brazil Wind Power 2012*, o Sr. Maurício Tolmasquim, presidente da Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), responsável pelos estudos de expansão do setor energético brasileiro declarou que, diante dos valores apresentados nos leilões e toda a conjuntura financeira internacional e os excelentes ventos no Brasil, é possível chegar em 2020 com 14 GW de eólica instalado – o equivalente a uma Usina Hidrelétrica de Itaipu (ABEEOLICA, 2012).

Diante do crescimento da utilização da energia eólica, sua franca expansão para os próximos oito anos e de todo o contexto de contratação de alta competitividade, a caracterização da localização dos empreendimentos eólicos devem ser realizadas com um número cada vez maior de confiabilidade de forma a minimizar os riscos do investimento diante de um mercado cada vez mais competitivo. Ao contrário de outros modelos de incentivos que por muito tempo financiou projetos ineficientes (como por exemplo, o sistema *Feed-in*), o modelo do setor elétrico baseado em modicidade tarifária exige que projetos eólicos sejam eficientes em todos os aspectos (DUTRA, 2007). É neste sentido que a preocupação na otimização da escolha de sítios no momento de pré-prospecção trará

maior eficiência na análise da localização dos empreendimentos eólicos e, consequentemente, na redução dos seus custos.

### 1.4 Objetivo do trabalho

A perspectiva de expansão da geração eólica no Brasil deverá ser inevitavelmente acompanhada por restrições de planejamento, restrições ambientais e conflitos, que serão consequência principalmente do processo de localização de sítio adequados à implantação de parques eólicos, dada à experiência internacional observada por EWEA (2009) e BABAN e PARRY (2001). Esses parques, além de serem economicamente viáveis, devem ter um impacto insignificante no ambiente local em termos de intrusão visual e acústica, interferência eletromagnética e habitat selvagem (BABAN e PARRY, 2001).

A fim de conciliar os interesses nacionais de expansão da energia eólica com a integração regional e local de parques eólicos e evitar possíveis conflitos, todos os fatores relevantes devem ser levados em consideração e um método para a localização objetiva de parques eólicos de ser desenvolvido (BABAN e PARRY, 2001). Nesse contexto, Sistemas de Informação Geográfica (SIG) possuem a capacidade de manipular e simular as restrições físicas, econômicas a ambientais. Consequentemente, SIGs podem desempenhar um papel fundamental como uma ferramenta de suporte a decisão para localização ótima de parques eólicos, na medida em que permite reunir e analisar dados de diferentes fontes (BABAN e PARRY, 2001). Através do uso do SIG, a informação disponível se torna mais acessível, e a informação antiga é colocada em um novo contexto (TIBA, *et al.*, 2010).

A localização de parques eólicos é um problema de decisão espacial bastante complexo, pois envolve vários agentes com objetivos distintos, e muitas vezes conflitantes, e está sujeito a diversas restrições de caráter técnico e ambiental. A solução desse problema, para ser considerada aceitável, deve ser capaz de conciliar esses objetivos conflitantes atendendo as restrições impostas.

Problemas de decisão espacial são problemas que envolvem dados espaciais e informações. Esse tipo de problema frequentemente exige que um grande número de

alternativas viáveis seja avaliado baseado em múltiplos critérios, portanto, decisões espaciais são multicritério em sua natureza (EASTMAN, JIN, *et al.*, 1995).

Apesar do SIG possuir um grande poder de visualização e análise espacial de dados, esse sistema possui uma capacidade analítica limitada em lidar com problemas complexos de decisão espacial. Nesse contexto, métodos de Apoio Multicritério a Decisão (AMD) combinados com SIG podem ser usados para auxiliar a tomada de decisão (EASTMAN, JIN, *et al.*, 1995). A combinação desses dois sistemas será referenciada nesse trabalho como SIG-AMD.

O SIG-AMD envolve a utilização de dados geográficos multidimensionais, definição das preferências do decisor e a combinação dos dados e preferências de acordo com uma regra de decisão específica, gerando como resultado um único mapa de síntese (JANKOWSKI, 1995). Os métodos de análise multicritério usando SIG normalmente produzem *mapas raster*<sup>13</sup> de adequação que indicam áreas adequadas para algum propósito. Na literatura, diferentes SIG-AMD têm sido usados como ferramentas efetivas no tratamento de problemas espaciais complexos como, no caso, a identificação e escolha de locais adequados para o desenvolvimento de parques eólicos (BABAN e PARRY, 2001).

Mapas *raster* de adequação podem ser gerados dentro do SIG usando técnicas de avaliação multicritério (JANKOWSKI, 1995), mas o seu uso para identificação de um local é problemática quando os locais são maiores que o tamanho da célula da grade. Nesse caso um sítio candidato é um grupo de células contíguas que atende ambos os critérios espaciais e não espaciais. Quando o tamanho do sítio é muito maior do que a célula, a forma passa a se tornar um critério significativo. O espaço de busca para esse problema é grande e complexo, existem muitas alternativas de agrupamento de células e pequenas mudanças no tamanho, localização, ou configuração de agrupamento pode afetar bastante a utilidade do sítio (BROOKES, 1997). Esse tipo problema costuma ser conhecido na literatura como *site search problem* (problema de *busca de sítio*).

1 /

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> O formato Raster representa o espaço na forma de uma grade regular, composta por células quadradas que cobrem todo o espaço sem sobreposições ou lacunas.

O termo *sítio eólico*, que será usado ao longo do trabalho, denomina um local com regime de ventos favorável para implantação de um parque eólico. Nesse contexto, a questão da localização de sítios eólicos se torna um problema de otimização combinatória complexo do tipo NP-completo, no qual o esforço computacional para encontrar a solução cresce rapidamente com o tamanho do problema. Dependendo da dimensão deste, torna-se inviável computacionalmente encontrar a solução. Esse tipo de problema insolúvel pode ser resolvido aproximadamente por métodos heurísticos, que não garantem encontrar a solução ótima, mas são capazes de fornecer uma solução "boa". Para tratar esse problema, esse trabalho propõe o uso de um método heurístico de otimização baseado em Algoritmos Evolutivos (AE).

Esse trabalho, portanto, procura identificar e discutir os fatores que influenciam a localização de parques eólicos e os critérios que orientam na determinação e escolha de sítios eólicos promissores. Baseado na natureza e característica espacial de cada critério identificado, estratégias adequadas de mensuração serão discutidas e avaliadas através de uma revisão da literatura e da experiência adquirida em campo pelo autor, e será proposta uma metodologia para identificação dos sítios eólicos mais promissores adequados ao desenvolvimento de parques eólicos usando SIG, métodos de AMD e AE. Essa metodologia será dividida em 4 etapas:

- Definição da região de estudo
- Análise multicritério de adequação
- Identificação de sítios eólicos
- Seleção de sítios eólicos

O trabalho é dividido em 6 capítulos. No próximo capítulo será apresentada estrutura do projeto de um parque eólico apresentando as principais etapas e frentes. A etapa inicial de seleção do local é o escopo desse trabalho, portanto essa fase será descrita em detalhes, apresentando as atividades envolvidas e os principais fatores que influenciam o processo de escolha do local serão abordados.

O Capítulo 3 apresenta primeiro uma revisão bibliográfica dos modelos GIS-AMD usados para localização de parques eólicos e de métodos e técnicas de otimização usados

para tratar problemas de *busca de sítio*. Ao final do capítulo, a metodologia utilizada no trabalho.

O Capítulo 4 aplica a metodologia a um estudo de caso no interior da região Nordeste do Brasil.

O Capítulo 5 traz uma discussão geral a respeito do trabalho, com ênfase no resultado e na contribuição desta dissertação, e apresenta propostas de trabalhos futuros.

# 2 Seleção de Sítios Eólicos

## 2.1 O recurso eólico

A viabilidade de um projeto de aproveitamento da energia eólica está diretamente associada à energia disponível que pode ser extraída do vento e de como esse recurso varia com a localização. Entretanto, as características do vento variam tanto geograficamente como temporalmente. A importância disso é amplificada pela relação cúbica com a velocidade do vento (BURTON, *et al.*, 2001). A potência gerada por um aerogerador é dada pela expressão padrão:

$$P = \frac{1}{2}C_p \rho A V^3 \tag{1}$$

Onde:

 $\rho$  é a massa específica do ar (1,225 kg/m<sup>3</sup>);

 $C_p$  é o coeficiente de potência;

A é a área varrida pelas pás do rotor; e

V é a velocidade do vento.

A potência produzida por um aerogerador está diretamente associada à velocidade do vento disponível no local, conforme descreve Equação (1). A variabilidade espacial do vento depende da topografia, da complexidade do clima na região, da estação do ano, e da hora do dia, podendo variar significativamente em curtas distâncias, por exemplo, algumas centenas de metros. Devido à complexidade do comportamento do vento, o desempenho de um aerogerador não pode ser estimado acuradamente sem medidas de vento adequadas realizadas no local de instalação. Assim, a melhor e mais precisa indicação do recurso disponível no local e obtida através de campanhas de medição no sítio, usando anemômetros e sensores de direção em alturas compatíveis com a altura do eixo do rotor do aerogerador que se deseja instalar (EWEA, 2009) (BURTON, *et al.*, 2001) (HIESTER e PENNELL, 1981).

Entretanto, esse processo é bastante oneroso e demorado, em função da altura da torre dos aerogeradores modernos, que para aplicações de grande porte varia entre 80 e 120 metros, e a necessidade de campanhas de medição de vento por um período mínimo de 1 ano, podendo chegar a 3 ou mais anos dependendo da rigidez do projeto e requisitos impostos pelas autoridades permissionárias locais (EWEA, 2009). No Brasil até 2011, um período contínuo de medição de 1 ano era um requisito necessário para habilitação de projetos eólicos para leilões de compra de energia elétrica realizados pela ANEEL e CCEE, mas esse período foi estendido para 2 anos para os leilões seguintes. Essa decisão provavelmente foi influenciada pelo o fato de alguns parques eólicos do PROINFA terem apresentado uma geração anual de energia abaixo do projetado em 2009 e 2010 consecutivamente (COSTA, 2012).

O combustível da energia eólica é o vento e, portanto, a viabilidade econômica do projeto eólico depende fundamentalmente do recurso eólico disponível no local. Nas etapas de início de desenvolvimento do projeto a velocidade média do vento anual no sítio é desconhecida. A importância de possuir uma estimativa o mais precisa possível do recurso eólico disponível para a análise da viabilidade econômica é ilustrada em EWEA (2009) com a simulação da produção anual de energia de um parque de 10 MW. O aumento da velocidade média anual de 6 para 10 m/s, em torno de 67%, resulta em um aumento de 136% da energia produzida no ano (ilustrado na Tabela 1). Como o custo do capital não depende fortemente da velocidade do vento, a sensibilidade da economia do projeto a velocidade do vento é clara (EWEA, 2009).

Tabela 1 - Sensibilidade da produção de energia de um parque eólico a velocidade média anual (EWEA, 2009).

Velocidade do normalizada para 6 m/s (%)	Produção de energia de um parque eólico de 10 MW (MWh/ano)*	Produção de energia normalizada para sítio de 6 m/s (%)	Custo de capital normalizado para sítio de 6 m/s (%)
83	11.150	63	100
100	17.714	100	100
117	24.534	138	102
133	30.972	175	105
150	36.656	207	110
167	41.386	234	120
	83 100 117 133 150	Velocidade do normalizada para 6 m/s (%)         energia de um parque eólico de 10 MW (MWh/ano)*           83         11.150           100         17.714           117         24.534           133         30.972           150         36.656	Velocidade do normalizada para 6 m/s (%)         energia de um parque eólico de 10 MW (MWh/ano)*         energia normalizada para sítio de 6 m/s (%)           83         11.150         63           100         17.714         100           117         24.534         138           133         30.972         175           150         36.656         207

**Nota:** \*Assume o desempenho de um aerogerador típico, densidade do ar de 1,225 kg/m³, perda total de 12% e distribuição de Rayleigh da velocidade do vento. (Fonte: Garrad Hassan)

Assim, o valor comercial do desenvolvimento de parque eólico depende essencialmente da produção de energia, que é altamente sensível à velocidade do vento. Portanto a característica mais importante de um sítio eólico é a velocidade do vento. Desse modo, todos os esforços devem ser realizados com o intuito de maximizar o tamanho, qualidade e cobertura geográfica dos dados de vento coletados no sítio (EWEA, 2009) (BURTON, *et al.*, 2001) (HIESTER e PENNELL, 1981).

Em virtude dos gastos e esforços necessários para realização de uma coleta de dados de vento com precisão adequada, que permita uma avaliação confiável do potencial eólico em um sítio, modelos computacionais tem sido usados para estimar aproximadamente a recurso eólico disponível em uma região. Em uma escala mais ampla, velocidades de vento podem ser modeladas usando programas computacionais que simulam os efeitos provocados no vento por parâmetros como elevação, topografia e cobertura da superfície do solo. Esses modelos recebem como entrada dados de uma localização conhecida, como dados gravados por estações meteorológicas ou outros registros climatológicos, ou dados extraídos de modelos de previsão do clima. A partir desses modelos são desenvolvidos atlas eólicos ou mapas de vento que mapeiam o recurso eólico em uma região e são valiosos instrumentos para encontrar sítios propícios, mas não são precisos o suficiente para justificar o financiamento do projeto (EWEA, 2009). Deve-se deixar bem claro, que essas ferramentas não substituem as medições de vento no local, ao invés disso servem para focar as investigações e indicar quais locais merecem uma avaliação mais detalhada para realização de campanhas caras de medição.

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro 14 (CEPEL, 2001) ilustra o potencial eólico brasileiro identificando localidades de grande potencial para o uso de energia eólica (Figura 4). O mapeamento do atlas foi realizado na resolução de 1 km x 1 km a 50 metros de altura utilizando modelagem de mesoescala e foi validado por medições de vento em várias regiões do Brasil. O atlas cobre todo o território brasileiro e pode ser utilizado na prédentificação das melhores áreas para projetos de aproveitamentos eólio-elétricos. Entretanto, como o vento é bastante sensível às características locais de relevo, rugosidade,

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Disponível gratuitamente em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/index.php?task=livro&cid=1.

obstáculos e condições térmicas da atmosfera, os valores apresentados pelo atlas podem variar significativamente dependendo das condições locais, sendo sempre necessária a realização de medições anemométrica específicas no local (LACTEC, 2007) (CEPEL, 2001).

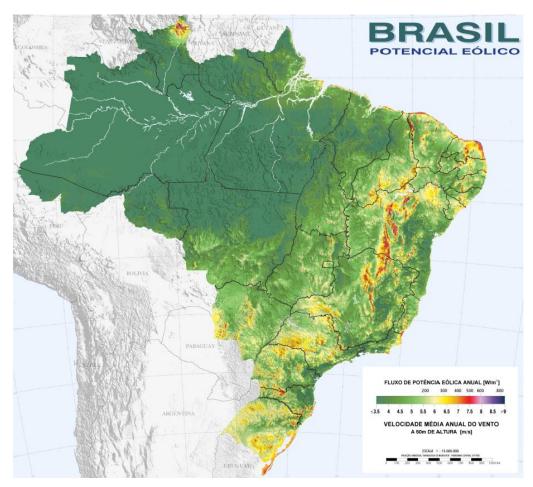


Figura 4 - Mapa de velocidade média de vento e fluxo de potência eólica anual do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (CEPEL, 2001).

O modelo mesoescala utilizado tem algumas limitações que podem afetar a exatidão da estimativa do potencial eólico, das quais se destacam: erros na base de dados de entrada, efeitos de sub-resolução, e limitação do modelo. O modelo de mesoescala usa principalmente dados de reanálise, construídos a partir de uma base de dados em malha geográfica global, com uma modelagem dos fenômenos físicos atmosféricos bastante robusta capaz de tratar as inconsistências dos dados atmosféricos de entrada. As simulações do modelo são realizadas para sub-regiões do Brasil na escala de 3,6 km, o que garante para essa escala dados de ventos atmosféricos bastante confiáveis. A projeção desses ventos para

superfície terrestre para escala de 1 km é bastante afetada pela exatidão dos modelos de relevo e rugosidade (CEPEL, 2001).

A validação do modelo computacional de mesoescala utilizado a partir da comparação dos valores medidos em estações selecionadas ajustadas para 50 metros de altura e valores calculados pelo modelo apresentou um desvio-padrão das diferenças cálculo-medição de 7,5%. Portanto a resolução de 1 km x 1 km pode ser insuficiente para a localização exata das turbinas eólicas. A análise revelou também à possibilidade de ocorrência, eventual e localizada, de discrepâncias nos modelos de relevo e rugosidade utilizados (CEPEL, 2001). É importante destacar que nem sempre o *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* é um bom estimador do recurso eólico no local e deve ser usado com parcimônia.

Em atividades de prospecção de sítios eólicos acompanhadas pelo autor foram observadas e constatadas incompatibilidades entre os locais indicados pelo atlas com os melhores ventos e o relevo da região, como por exemplo, na região do interior da Bahia onde os melhores ventos eram indicados pelo atlas eólico em uma área mais baixa abrigada por um platô mais elevado do vento predominante na região. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato do modelo de relevo utilizado não representar bem a região e pela falta de medições de vento de qualidade disponíveis na região na feitura do Atlas em 2001. Na época o modelo de elevação utilizado possuía uma resolução de 1 km x 1 km e atualmente já existem modelos digitais de elevação elaborados a partir de dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (STRM) disponíveis publicamente na resolução aproximada de 92 m x 92 m (SCHORER e SPENGEMANN, 2007). O problema de representatividade do *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* é mais acentuado em regiões no interior do país.

A escala do *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* e a sensibilidade do vento às características locais da topografia tornam seu uso inadequado para a atividade de identificação de sítios eólicos dentro da escala do estudo proposto, que utiliza a resolução do modelo digital de elevação do STRM. Portanto, o atlas eólico não será ser usado para indicar a velocidade do vento no local. Entretanto, a nível regional, onde problema de representatividade pode ser considerado insignificante, o *Atlas do Potencial Eólico* 

Brasileiro continua sendo uma poderosa ferramenta para a determinação da região de estudo e pré-identificação de áreas promissoras.

No Brasil existem grandes regiões, como o litoral nordestino, que apresentam velocidades de vento estimadas superiores a 7 m/s a 50 metros de altura, o que possibilita que projetos eólicos se tornem tecnicamente viáveis e economicamente mais atrativos para o aproveitamento em larga escala, principalmente em aplicações conectadas a rede (DUTRA, 2007) (SÁ, 2001). De acordo com estudo do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro o Brasil possui um potencial energético bruto de 143 GW estimado a altura de 50 metros (CEPEL, 2001). Esse potencial tende a aumentar consideravelmente considerando que os aerogeradores modernos operam em alturas de 80 a 100 metros e o aumento da velocidade do vento com a altura em função do comportamento do perfil vertical do vento na camada limite atmosférica, que é amplificado pela característica da geração eólica que varia com o cubo da velocidade do vento.

Além do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, existem outros inventários do potencial eólico de alguns estados do Brasil<sup>15</sup> que podem ser consultados adicionalmente.

### 2.1.1 Efeitos locais de vento

O vento próximo à superfície da Terra é fortemente influenciado pela natureza da superfície do terreno, cuja descrição detalhada é denominada topografia. A interação entre o vento e a superfície acontece em uma ampla faixa de escalas de comprimento, e muito esforço da meteorologia da camada limite tem sido empreendido na separação dessa faixa de escalas em um número de domínios característicos capazes de serem descritos sistematicamente, modelados e/ou parametrizados. A meteorologia da energia eólica, que tem interesse na faixa atmosférica de 10 a 200 m acima do solo, divide os efeitos da topografia em três categorias típicas (PETERSEN, et al., 1998):

Rugosidade: o efeito coletivo da superfície do terreno e seus elementos irregulares, levando a uma desaceleração do vento próximo a superfície, é referido como

Uma lista de mapas eólicos estaduais encontra-se disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/index.php?task=livro&cid=1

rugosidade do terreno. A área de interesse deve ser localizada o mais distante dos elementos individuais de rugosidade e a altura da torre de instalação do aerogerador normalmente muito maior que a altura desses.

- Obstáculos: próximo a um obstáculo como uma construção ou faixa de abrigo o
  vento é fortemente influenciado pela presença do obstáculo, que reduz
  consideravelmente a velocidade do vento. Em nenhuma circunstância o ponto de
  interesse deve estar próximo do obstáculo individual e a uma altura comparável com
  a altura do obstáculo.
- Orografia: quando a escala típica das feições do terreno se torna muito maior do
  que a altura do ponto de interesse, eles agem como elementos orográficos do vento.
   Próximo dos ápices ou cumes dos morros, falésias, cordilheiras e escarpas o vento
  irá acelerar, enquanto perto do sopé e em vales ele irá desacelerar.

Essa divisão da topografia, apesar de parecer simples, tem provado ser extremamente útil na meteorologia da energia eólica e é usada constantemente para descrever a complexidade do mundo real (PETERSEN, *et al.*, 1998). A Figura 5 ilustra a influencia das características do relevo no comportamento do vento. Essas características e conceitos usados para analisar a topografia serão discutidos a seguir.

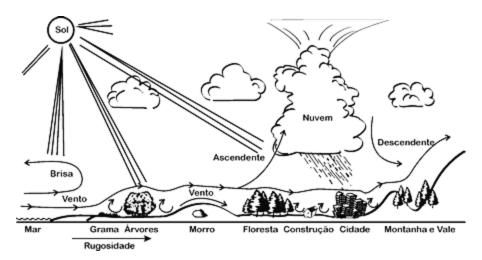


Figura 5 - Comportamento do vento sob a influência das características do terreno (Fonte: Atlas Eólico do Brasil, 1998).

## 2.1.1.1 Rugosidade da superfície

A rugosidade da superfície do terreno pode ser parametrizada por uma simples escala de comprimento (comprimento de rugosidade  $z_0$ ) que tem uma influência no perfil vertical da velocidade do vento na camada limite aproximado pela *Lei Logarítmica* e *Lei de Arrasto Geotrópico* de acordo com:

$$V(z) = \frac{1}{k_0} V_* ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \tag{2}$$

onde:

V(z) é a velocidade do vento na altura z;

 $k_0$  é a constante de Von Kármán ( $\approx 0,4$ );

*V*<sub>∗</sub> é a chamada velocidade de fricção (tipicamente variando entre 0,2 e 0,4 m/s) relacionada com a tensão de superfície e a densidade do ar (HAGEMANN, 2008); e

 $z_0$  é o comprimento de rugosidade do local.

Essa equação é válida somente para regimes térmicos de estabilidade neutra, despreza o deslocamento do plano zero e, portanto é o método mais básico de extrapolação vertical (HAGEMANN, 2008). Escrevendo-se (2) para representar a velocidade do vento em duas alturas  $h_1$  e  $h_2$ , e dividindo uma expressão pela outra, pode-se relacionar as velocidades do vento em duas alturas:

$$V(h_2) = V(h_1) \times \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}$$
(3)

Outro modelo utilizado para representar a distribuição vertical da velocidade do vento com a altura é a *Lei da Potência* expressa por (DUTRA, 2007):

$$V(h_2) = V(h_1) \times \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\alpha} \tag{4}$$

onde:

V(h) é a velocidade do vento na altura h; e

 $\alpha$  é o expoente de camada-limite e está diretamente associado à rugosidade da superfície no local.

A *Lei da Potência* é o modelo mais simples, resultado de estudos da camada limite sobre uma placa plana. Esse modelo apresenta uma vantagem pela sua fácil utilização, entretanto, os resultados obtidos não possuem precisão adequada (DUTRA, 2007).

Além disso, a rugosidade deve ser considerada como uma variável climática, pelo fato de compreender elementos distintos e variáveis como vegetação, cobertura de neve, condições do mar, tipos de agricultura, e etc. Esse aspecto deve ser levado em consideração em qualquer análise climatológica (PETERSEN, *et al.*, 1998). A Figura 6 ilustra os comprimentos de rugosidade associados aos tipos de superfícies usados como referência para o *Atlas Eólico Europeu* (TROEN e E. L. PETERSEN, 1989).

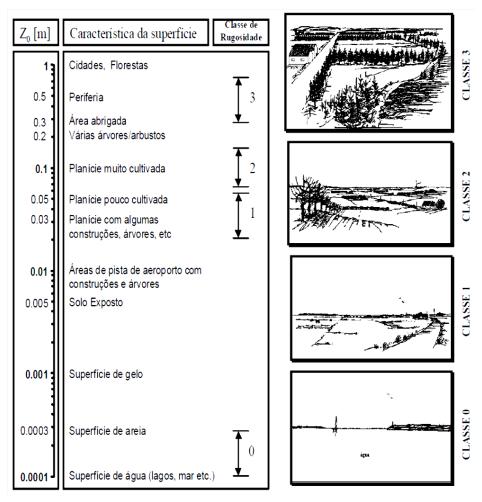


Figura 6 - As classes de rugosidade e as paisagens adotadas pelo Atlas Eólico Europeu (MORTENSEN, et al., 1993).

A rugosidade da superfície pode ser derivada de informações do uso da terra usando mapas topográficos, fotografias aéreas, imagens de satélite, base de dados sobre cobertura do solo, ou por inspeção visual dos locais de interesse. Em todo caso, essa informação é somente uma foto instantânea do uso da terra na medida em esse uso pode variar bastante com o tempo. Mapas de rugosidade podem ser prontamente derivados de base de dados de uso da terra, o que facilita enormemente a avaliação do recurso sobre grandes áreas (PETERSEN, et al., 1998). No desenvolvimento do Atlas Eólico do Egito foram usadas imagens de satélite (Google Earth<sup>16</sup>) para mapear o uso da terra e as condições de rugosidade da superfície (MORTENSEN, et al., 2006). Na metodologia utilizada para o mapeamento do recurso eólico do estado do Paraná apresentada por Benelli et al. (2009) o modelo de rugosidade digital foi gerado a partir da interpretação de imagens de satélite LANDSAT adquirido junto a EMBRAPA, modelos de uso do solo da Secretaria de Meio Ambiente (SEMA/Liserp), imagens de satélite em alta resolução (Google Earth), e amostragens em campo.

A região costeira geralmente apresenta recursos eólicos bastante promissores e é caracterizada por grandes mudanças na rugosidade na linha da costa. Essa situação se complica ainda mais com a variação da rugosidade do mar em função das ondas, a influência do relevo na costa e gradientes de temperatura entre a terra e o mar que sobrepõe o fluxo de ventos secundários no padrão sinótico dos ventos (PETERSEN, *et al.*, 1998).

### 2.1.1.2 Obstáculos

Obstáculos como construções ou agrupamento de árvores pode influenciar bastante o comportamento do vento local causando a redução da velocidade do vento e aumento da turbulência. Esse fenômeno é conhecido como *efeito de sombreamento*. Elementos, como pedras e rochas com grande volume, morros, construções civis, torres não porosas e agrupamento denso de árvores de grande altura, podem ser considerados obstáculos caso sua distância em relação ao ponto de observação seja pequena (DUTRA, 2007).

\_

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Google Earth é um programa de computador desenvolvido e distribuído pela empresa americana Google que apresenta um modelo tridimensional do globo terrestre, construído a partir de mosaico de imagens de satélite obtidas de fontes diversas, imagens aéreas e SIG 3D.

Os obstáculos podem ser extraídos de mapas detalhados, mas normalmente é recomendada a visita ao local para aferição. A visita ao local, ou análise de fotografia aérea, é necessária para determinação da porosidade do obstáculo. As informações que devem ser consideradas para uma análise de sombreamento são basicamente a posição relativa em relação ao ponto de interesse, suas dimensões e sua porosidade (PETERSEN, *et al.*, 1998).

A Figura 7 mostra a influência do obstáculo na redução da velocidade do vento. As curvas no seu interior mostram o percentual de redução na velocidade do vento dentro da "área abrigada" em relação a um ponto de observação. A presença de obstáculos como grandes construções podem influenciar verticalmente a velocidade e direção do vento até três vezes acima da altura do obstáculo e até 40 vezes essa altura na direção à jusante do vento (HAGEMANN, 2008).

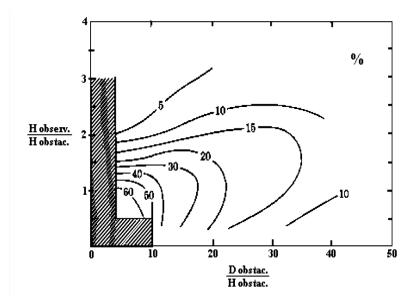


Figura 7 - Efeito do obstáculo sobre os ventos, em função da sua altura (MORTENSEN, et al., 1993).

## 2.1.1.3 Orografia do terreno

O termo orografia se refere à descrição das variações de altura do terreno, referenciado a um *datum* comum como a altura média do nível do mar. Os mapas topográficos normalmente representam a orografia na forma de curvas de nível da superfície de terreno podendo ser representado digitalmente no formato vetorial a partir de linhas com valores de altura associados. Uma forma de representação do relevo que tem se tornado bastante comum é a o formato cartesiano de grade conhecido com modelo digital

de terreno (DTM) ou modelo digital de elevação (DEM) (*mapas de dados raster*). Mapas *raster* precisos podem ser prontamente derivados de mapas vetoriais detalhados, enquanto a conversão de mapas *raster* para mapas vetoriais resulta em certa perda de informação, dependendo do tamanho da célula da grade do DTM (PETERSEN, *et al.*, 1998).

As diferentes paisagens podem ser agrupadas em três classes gerais: planos, morros e montanhas (Figura 8). Em terrenos planos e regiões baixas longe de montanhas o efeito orográfico é desprezível e a rugosidade da superfície do terreno se torna a característica mais importante (PETERSEN, *et al.*, 1998).

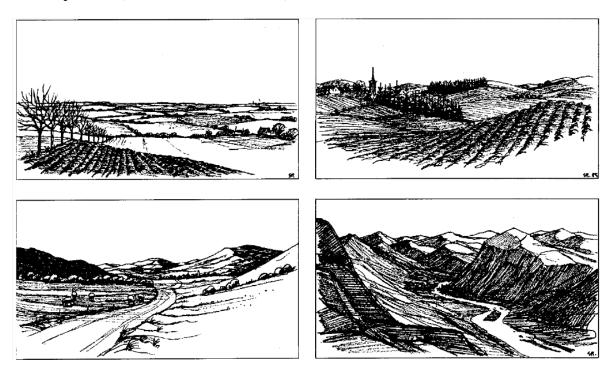


Figura 8 – Diferentes tipos de paisagem. Terrenos planos (superior esquerda) e morros (superior direita) geralmente estão dentro dos limites de modelos de fluxo linearizado (como o WAsP). À medida que o terreno fica mais íngreme (inferior esquerda) esses modelos devem ser utilizados com cautela. Para terrenos montanhosos cortados por vales profundos (inferior direita) modelos de fluxo mais avançados devem ser utilizado (baseados em CFD) (PETERSEN, et al., 1998).

O terreno ondulado ou morro é aquele considerado suave o suficiente para garantir que a maioria do fluxo esteja aderente a superfície, correspondendo à paisagem onde a inclinação seja menos íngreme com uma gradiente de inclinação de aproximadamente 30% (corresponde a um ângulo de aprox. 17°). As dimensões horizontais típicas de morros são da ordem de alguns quilômetros ou menos (PETERSEN, *et al.*, 1998). Esse tipo de terreno está dentro dos limites operacionais de modelo de fluxo linearizado permitindo a aplicação

de programas o WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application program*) para análise do regime de ventos.

Na medida em que o terreno se torna mais íngreme e complexo e as dimensões horizontais típicas aumentam para muitos quilômetros, os aspectos orográficos podem induzir fortes modificações em toda a camada limite atmosférica. Modelos linearizados ainda podem dar um resultado preciso localmente, mas horizontalmente a extrapolação do regime climático do vento se torna cada vez mais difícil. Em terrenos montanhosos uma fração significante das inclinações é mais íngreme do que 17° e a separação do fluxo ocorre (BOWEN e MORTENSEN, 2004). Além disso, toda a camada limite atmosférica e fortemente influenciada pelo terreno. Nesses casos modelo computacionais baseados em Dinâmica de Fluídos (CFD<sup>17</sup>) são mais adequados ou medições no local devem ser realizadas para a previsão do regime de vento (PETERSEN, *et al.*, 1998).

Uma medida objetiva da declividade ou irregularidade do relevo do terreno ao redor do sítio é o índice de complexidade do relevo ou RIX (*Ruggedness Index*), definido como uma percentagem do terreno mais íngreme do que uma inclinação crítica (uma gradiente de 30% ou um ângulo de 17°) (BOWEN e MORTENSEN, 2004). Esse índice é uma medida aproximada da extensão da separação do escoamento e, portanto a extensão na qual o terreno viola a exigência dos modelos de fluxo linearizados. As paisagens da Figura 8 podem ser classificadas com os seguintes valores de RIX: plano e ondulado, 0% (painéis superiores); mais complexo (inferior esquerdo), em torno de 10% ou menos: montanhoso (inferior direito), em torno de 10% a 50% ou mais (PETERSEN, *et al.*, 1998).

O fenômeno de aceleração orográfica pode ser observado em relevos mais elevados em regiões mais baixas. Quando a inclinação do morro é maior do que 17°, ocorre redução do vento no sopé, e separações no escoamento logo após o morro, com turbulência na esteira (Figura 9). Nenhum desses locais é apropriado para a instalação de um aerogerador. No ponto mais alto do morro seria o local mais adequado para instalação de uma torre

contorno considerando as três dimensões espaciais.

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Abreviação do termo em inglês *Computer Fluid Dynamics* (Dinâmica de fluído computacional). São métodos numéricos e algoritmos utilizados para solucionar e analisar problemas que envolvem o fluxo de fluídos. Esses modelos simulam a interação de gases e fluídos em superfícies definidos por condições de

anemométrica, pois devido à redução de área de passagem o vento é acelerado (LACTEC, 2007).

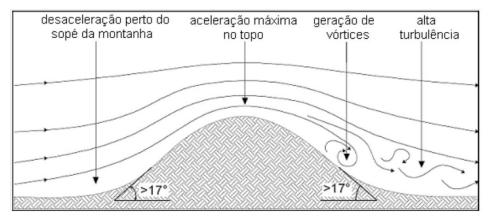


Figura 9 - Aceleração orográfica em um morro (LACTEC, 2007).

Entretanto, caso a área disponível no topo não ser suficiente para comportar a dimensão do parque, o mais adequado é instalar a torre de medição em um local mais representativo das características do vento na área do parque, pois o efeito de aceleração iria superestimar o vento disponível para toda área (LACTEC, 2007).

No caso de uma escarpa, podem ocorrer separações do escoamento e geração de vórtices, que vão reduzir significativamente a velocidade do vento e aumentar a turbulência. Para inclinações abaixo de 17°, o comportamento é semelhante ao do morro, mas para inclinações de 17° a 50° é altamente desaconselhável a instalação de torres de medição ou parques eólicos a menos e 200 m da beira da escarpa (Figura 10). Essa distância é considerada a mínima para que a camada limite seja capaz de recuperar o seu estado original (LACTEC, 2007).

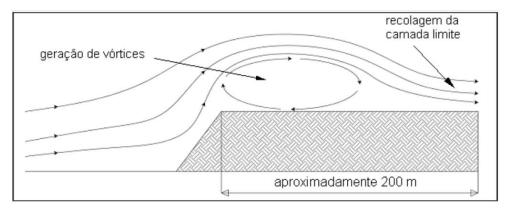


Figura 10 - Aceleração orográfica em uma escarpa (LACTEC, 2007).

## 2.2 Impactos ambientais

A energia eólica é uma tecnologia limpa, gratuita, endógena e ambientalmente correta. O seu caráter renovável e o fato de não poluir durante sua operação tornam a energia eólica uma das fontes mais promissoras para mitigação de problemas ambientais tanto a nível global como local. Ela contribui para redução das emissões de gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>) e outros gases poluentes e não produz resíduos tóxicos, e também evita custos externos significativos da geração convencional baseada em combustíveis fósseis, que, entretanto, não são considerados atualmente nos mercados de energia (EWEA, 2009) (REFOCUS, 2002).

Ao mesmo tempo, a construção e operação de parques eólicos tanto em terra como no mar pode resultar em impactos ambientais negativos locais sobre pássaros e cetáceos, paisagens, uso sustentável da terra, e no ambiente marinho. A etapa de construção é fase mais crítica em termos de impactos ambientais produzidos pela energia eólica. Entretanto, esses impactos negativos durante a instalação são relativamente pequenos quando comparado com aqueles produzidos por fontes convencionais de energia, mas mesmo assim ainda devem ser avaliados e mitigados quando possível (EWEA, 2009). Essas características aparentemente negativas podem ser significativamente amenizadas, e até mesmo eliminadas, através de planejamento adequado e também da aplicação de novas tecnologias (DUTRA, 2007) (EWEA, 2009).

Os impactos ambientais associados à energia eólica possuem um caráter bastante localizado sendo frequentemente específicos do sítio e, portanto fortemente dependentes da localização selecionada para a instalação do parque eólico. Os impactos associados à energia eólica que podem afetar bastante a localização de parques eólicos em terra são: impacto visual e degradação da paisagem, ruído, ocupação e uso da terra, impacto sobre pássaros, interferência eletromagnética e restrições em áreas de proteção ambiental. Dentre esses impactos, são considerados mais críticos o impacto visual (estético), ruído acústico e os impactos sobre a fauna aviária (BURTON, *et al.*, 2001) (EWEA, 2009) (REFOCUS, 2002).

## 2.2.1 Impacto visual e sobre a paisagem

Não existe um consenso sobre a definição do conceito de passagem. De acordo com a Convenção de Paisagem Europeia, paisagem significa "uma área, como percebida por pessoas, da qual as características são o resultado da ação e interação de fatores naturais e/ou humanos". As paisagens possuem uma característica dinâmica, mudando ao longo do tempo de acordo com o desenvolvimento humano e ecológico (EWEA, 2009).

A percepção da paisagem e o impacto visual são considerados questões chave na localização de parques eólicos pelas suas características subjetivas e variáveis ao longo do tempo e da localização. O impacto visual tem sido considerado como a principal influência sobre a atitude pública em relação a parques eólicos, com o "a percepção estética, tanto positiva como negativa, tendo a maior influência sobre a atitude pública" (WOLSINK, 2000) (EWEA, 2009).

Os aerogeradores modernos são estruturas grandes, chegando a 150 metros de altura da base da torre a ponta da pá, e devem ser colocadas em locais expostos com velocidades médias de vento altas para operarem efetivamente. Os aerogeradores individuais devem ser espaçados de pelo menos 3 a 5 diâmetros de rotor (D), o que faz com que parques eólicos de grande porte ocupem áreas extensas. Portanto, geralmente existe uma relação de troca entre a produção de energia e a visibilidade dos aerogeradores (BURTON, *et al.*, 2001). Muitos países exigem que seja realizada a avaliação do impacto visual e sobre a paisagem no estudo de impacto ambiental (EWEA, 2009) (BURTON, *et al.*, 2001).

O tamanho dos aerogeradores somado ao movimento giratório das pás tem o potencial de atrair atenção das pessoas. Desse modo, parques eólicos com vários aerogeradores espalhados sobre o território podem se tornar pontos dominantes na paisagem. As características dos empreendimentos eólicos que podem causar efeitos na paisagem incluem: o aerogerador (tamanho, altura, número, material e cor), pista de acesso e ligação do sítio, edificações da subestação, conexão a rede, torres anemométricas e linhas de transmissão. Uma característica bastante favorável do parque eólico e que ele não é permanente, de modo que a área utilizada pode ser restaurada a condição original após a fase de descomissionamento e reintegração (EWEA, 2009)(BWEA, 1994).

A avaliação do efeito visual e na paisagem de um parque eólico é normalmente executada por um profissional especializado nesse trabalho que ira tentar quantificar os impactos, mas geralmente é reconhecido que um grau de interpretação subjetiva é exigido. O processo de avaliação é iterativo e irá influenciar o projeto e a disposição do parque eólico. Entretanto, ele pode ser dividido de maneira simplificada em algumas áreas (BURTON, *et al.*, 2001):

- Avaliação do caráter da paisagem (incluindo a política de paisagem e de designação de áreas),
- Projeto e mitigação,
- Avaliação de impacto (incluindo a análise de visibilidade e de pontos de vista),
- Efeito de cintilação de Sombra (shadow flicker).

Um passo fundamental para minimizar o impacto visual de um parque eólico é identificar um local apropriado e garantir que o empreendimento proposto esteja em harmonia com a localização. Muitas áreas exposta possuem alta probabilidade de serem consideradas paisagens de valor significante ou áreas de grande beleza cênica, sendo em alguns casos consideradas como Parque Nacionais. Os efeitos cumulativos também são considerados importantes e o impacto de mais de um parque eólico visível em uma área é uma questão de consideração fundamental (BURTON, *et al.*, 2001).

A avaliação da sensibilidade da paisagem em relação a empreendimentos eólicos e a capacidade de parques eólicos que ela pode suportar sem que isso altere fundamentalmente suas características originais, envolve a combinação de uma variedade de fatores associados a aspectos físicos e subjetivos que possuem uma interação complexa que precisa ser pesada e avaliada (BENSON, *et al.*, 2003). Benson *et al.* (2003) apresentam os métodos e as descobertas de um estudo realizado para avaliar a sensibilidade da paisagem a empreendimento de energia eólica em terra na região Nordeste da Inglaterra.

Algumas das técnicas comumente usadas para avaliar o impacto visual e na paisagem são (EWEA, 2009):

- Mapas de zonas de visibilidade teórica (ZVT) definem áreas das quais o parque eólico pode ser visto totalmente ou parcialmente; essas áreas representam os limites de visibilidade do parque;
- Fotografias para registrar o patamar do recurso visual;
- Diagramas para fornecer uma indicação técnica da escala, forma e posicionamento do desenvolvimento proposto; e
- Fotomontagens e vídeo-montagens para mostrar a imagem futura do parque instalado.

O impacto visual decresce com a distância. As zonas ZVT podem ser definidas como:

- Zona I Visualmente dominante: os aerogeradores são percebidos em grande escala e o movimento das pás é obvio. A paisagem imediata é alterada. Distâncias até 2 km.
- Zona II Visualmente intrusiva: os aerogeradores são elementos importantes na paisagem e são claramente percebidos. O movimento das pás é claramente visível e pode atrair a vista. Distâncias entre 1 e 4,5 km em boas condições de visibilidade.
- Zona III Perceptível: os aerogeradores são claramente visíveis, mas não intrusivos. O parque eólico é perceptível como um elemento na paisagem. O movimento das pás é visível em boas condições de visibilidade, mas os aerogeradores parecem pequenos na visão do todo. Distâncias entre 2 e 8 km dependendo das condições do tempo.
- Zona IV Elemento na paisagem distante: o tamanho aparente dos aerogeradores é
  pequeno. Aerogeradores são como qualquer outro elemento na paisagem. O
  movimento das pás é geralmente indiscernível. Distâncias acima de 7 km.

Brusa e Lanfranconi (2006) resumem algumas medidas para evitar e/ou minimizar o impacto visual de parques eólicos na paisagem:

- Projeto do parque eólico de acordo com as particularidades do sítio e com a sensibilidade da paisagem no em torno;
- Localizar o parque eólico a pelo menos certa distância de habitações;

- Seleção do modelo de aerogerador (torre, cor) de acordo com as características da paisagem;
- Seleção de cores neutras e tintas anti-reflexivas para torre e pás;
- Cabeamento subterrâneo; e
- Luzes para voos de baixa altitude somente para torres mais expostas.

É essencial considerar também os aspectos sociológicos do desenvolvimento. A percepção visual do indivíduo em relação ao desenvolvimento do parque eólico será determinada não só pelos parâmetros físicos (por exemplo, tamanho do aerogerador, número, cor, etc.), mas também pela sua opinião da energia eólica como fonte de energia (BURTON, et al., 2001).

Entretanto os efeitos do impacto visual e sobre a paisagem não podem ser medidos ou calculados e medidas de mitigação são limitadas. Entretanto, experiência ganhada recentemente sugere que a oposição a parques eólicos é encontrada principalmente durante a fase de planejamento. Após o comissionamento a aceitabilidade é alta (EWEA, 2009). No Brasil o impacto do efeito visual e sobre a paisagem na aceitação de projetos eólicos não é conhecido, não tendo sido encontrado pelo autor nenhum estudo ou trabalho específico sobre o tema.

Alguns órgãos ambientais solicitam do empreendedor estudos de impacto visual da sombra intermitente causada pela rotação das pás (*shadow flicker*), mas ainda não existe no Brasil nenhuma regulamentação sobre o tema (LACTEC, 2007). A sombra pode gerar incômodo para pessoas dentro de edificações expostas a tal luz passando através de uma janela estreita. Apesar de ser considerada uma questão importante na Europa, e reconhecida na operação dos tradicionais moinhos de vento, o *shadow flicker* não é geralmente considerado significante nos EUA (GIPE, 1995). Esse tipo de impacto visual específico depende somente de fatores físicos (como relevo do terreno, latitude, horário do dia e estação do ano) e, portanto pode ser facilmente avaliado e mitigado. Existem vários softwares comerciais disponíveis para fazer essa análise.

Um espaçamento mínimo de 10 diâmetros de rotor do aerogerador mais próximo para um habitação é recomendado para reduzir a duração do incômodo causado pela sombra intermitente. Entretanto, um espaçamento dessa magnitude é provável de ser

exigido em qualquer situação por restrição de ruído acústico e para evitar dominância visual (BURTON, *et al.*, 2001).

## 2.2.2 Impacto de ruído acústico

Ao contrário do impacto visual e sobre a paisagem, o ruído acústico pode ser medido e facilmente previsto. O ruído gerado por aerogeradores tem sido um dos impactos ambientais mais estudos da tecnologia (EWEA, 2009).

Isso advém do fato do ruído acústico provocado por aerogeradores ter sido frequentemente percebido como um dos impactos ambientais mais significativos. Durante o início do desenvolvimento da energia eólica, na década de 1980, alguns aerogeradores eram bastante barulhentos e isso levou a reclamações justificadas daqueles que viviam próximos a eles. Entretanto, desde então tem havido um desenvolvimento considerável tanto em técnicas para redução do ruído proveniente dos aerogeradores como na previsão do incômodo acústico que um parque eólico poderia criar (BURTON, *et al.*, 2001).

O ruído acústico produzido por aerogeradores pode ser dividido em dois tipos: ruído mecânico proveniente das caixas de engrenagens e gerador, e ruído aerodinâmico proveniente das pás. Os aerogeradores modernos tem praticamente eliminado o ruído acústico através de bom isolamento acústico da *nacelle*<sup>18</sup>, portanto o ruído aerodinâmico é o maior contribuidor. O ruído aerodinâmico é produzido pela rotação das pás em atrito com o ar gerando um ruído de som de assovio de amplo espectro e é função da velocidade de ponta de pá. Os aerogeradores modernos têm sido otimizados para reduzir o ruído aerodinâmico reduzindo a velocidade de rotação e usando controles de passo (*pitch*) da potência gerada (EWEA, 2009).

A emissão acústica do aerogerador aumenta com o aumento da velocidade do vento. Entretanto, o ruído de fundo normalmente aumenta mais rápido do que o som do aerogerador, tendendo a mascarar o ruído em ventos mais altos. Os níveis de ruído sonoro decrescem com o aumento da distância em relação ao aerogerador. De fato situações mais

38

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Pode ser definida como a casa de máquinas do aerogerador que fica no topo da torre e abriga a caixa multiplicadora (quando existente), mancais, gerador elétrico, equipamentos de controle e outros componentes.

críticas podem acontecer em condições de velocidade de vento mais baixas onde o ruído acústico pode se tornar mais evidente com a redução do ruído de fundo (EWEA, 2009).

Os níveis de ruído podem ser medidos e previstos, mas a atitude pública em relação ao ruído depende fortemente da percepção. Um parque eólico apresenta um nível de ruído típico na faixa de 35 a 45 dB(A)<sup>19</sup> a uma distância de 350m, dependendo do posicionamento dos aerogeradores, o que corresponde a um quarto silencioso e está próximo da faixa do ruído de fundo do ambiente rural a noite conforme apresentado na (EWEA, 2009).

Tabela 2 - Comparativo de ruído com atividades cotidianas (Fonte: EWEA, 2009).

Fonte/Atividade	Indicativo de nível de ruído (dB(A))
Limiar de audição	0
Ruído de fundo rural à noite	20-40
Quarto silencioso	35
Parque eólico a 350 m	35-45
Estrada movimentada a 5 km	35-45
Carro a 65 km/h a 100 m	55
Escritório padrão movimentado	60
Conversação	60
Caminhão a 50 km/h a 100m	65
Tráfico urbano	90
Broca pneumática a 7m	95
Avião a jato a 250 m	105
Limiar da dor	140

Quando existem pessoas morando próximo de um parque eólico cuidados devem ser tomados para garantir que o som proveniente dos aerogeradores esteja a níveis razoáveis em relação ao nível de som ambiente na região. Em geral os parques eólicos são localizados em áreas rurais onde existem áreas mais expostas com menos obstáculos e rugosidade mais baixa. As áreas rurais são mais silenciosas, mas os parques eólicos ficam localizados em áreas com intensidade de vento elevadas, onde o ruído de fundo é maior e tende a mascarar o ruído produzido pelas turbinas (EWEA, 2009).

 $<sup>^{19}\ \</sup>mathrm{DB(A)}$  representa o nível de pressão sonora, em escala aplicada ao ouvido humano.

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 1, de 8 de março de 1990 dispõe sobre critérios e padrões de emissão de ruídos das atividades industriais. A norma vigente na resolução é a NBR 10.151 – Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas visando o conforto da comunidade, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (LACTEC, 2007).

A questão particular do ruído de baixa frequência (RBF), também conhecido como infrassom (abaixo de 200 Hz), que pode causar aflição e incômodo em pessoas sensíveis, tem sido amplamente analisada. Uma pesquisa de todos os resultados de medições publicados constatou que os aerogeradores modernos com o rotor localizado contra o vento (*upwind*) produzem níveis baixos de infrassom, tipicamente abaixo do limiar de percepção, e podem ser negligenciados na avaliação de efeitos ambientais (EWEA, 2009).

Portanto, a experiência adquirida no desenvolvimento de parques eólicos relatada por outros países sugere que o ruído proveniente dos aerogeradores é geralmente bastante reduzido. Isso associado à capacidade de mensuração do ruído acústico possibilita que o impacto do ruído acústico possa ser satisfatoriamente mitigado durante o processo de localização de parques eólicos. Em geral, a distância necessária para atenuar o ruído dos aerogeradores é bem menor do que à distância usada para evitar dominância visual que varia até 2 km.

### 2.2.3 Ocupação e uso da terra

Decisões sobre a localização de parques eólicos deviam ser realizadas levando em consideração outros usos da terra. Esse tipo de planejamento deveria ser alinhado com as perspectivas e políticas de expansão da energia eólica no país com a definição de um zoneamento ecológico-econômico para energia eólica, o que poderia trazer uma série de benefícios conforme discutido na Seção 1.2.

Os procedimentos administrativos necessários para aprovar parques eólicos para cada sítio devem ser levados em consideração desde a etapa inicial do processo de planejamento do projeto (BWEA, 1994). Planejadores locais e regionais devem decidir se um projeto é compatível com usos adjacentes existentes e planejados, se irá modificar negativamente a característica da área ao redor, se vai atrapalhar comunidades estabelecidas, e se será integrada dentro da paisagem existente(EWEA, 2009). Desde o estágio inicial do planejamento, os empreendedores devem entrar em contato com os

agentes envolvidos na área: Ministério da Defesa, autoridades da aviação civil, provedores de comunicação de rádio e radar, concessionária de eletricidade local, autoridades de proteção ambiental, a população local e associações não governamentais relevantes, entre outras<sup>20</sup>.

Atenção especial deve ser dada as reservas naturais, as áreas vizinhas e habitat de alto valor para conservação natural (EWEA, 2009)(EWEA, 2002). O Brasil possui áreas protegidas consideradas ricas em biodiversidade e beleza cênica, criadas por Decreto presidencial ou Lei, denominada de Unidades de Conservação (UC). Essas unidades estão divididas em dois grandes grupos – o de Proteção Integral e o de Uso Sustentável - e ao todo em 12 categorias. Ao todo existem 310 UCs federais<sup>21</sup> que são geridas pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), uma autarquia em regime especial. Criado dia 28 de agosto de 2007, pela Lei 11.516, o ICMBio é vinculado ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) e integra o Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) (ICMBIO, 2012). Em UCs de Proteção Integral não é possível o desenvolvimento de empreendimentos eólicos, mas no caso das UCs de Uso Sustentável, para algumas categorias, essa possibilidade pode ser levantada junto ao ICMBio considerando que o aproveitamento eólico seja compatível com a natureza e características da UC em particular.

Outra questão é a interação entre o turismo e empreendimentos eólicos. Muitas áreas turísticas são localizadas em paisagens de beleza cênica e/ou de tranquilidade e a presença de parques eólicos poderia reduzir a atratividade do cenário natural. EWEA (2009) resume as conclusões levantadas por um estudo recente, realizado pelo governo escocês, que analisou os impactos de parques eólicos sobre a indústria do turismo e revisou 40 estudos da Europa, EUA e Austrália:

• A oposição mais forte ocorre no estágio de planejamento.

 $^{20}\,\mathrm{O}$  processo de desenvolvimento de um parque eólico é descrito com mais detalhes na Seção 2.3.

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> A descrição das categorias de UCs e localização delas no território brasileiro podem ser consultadas em: http://www.icmbio.gov.br/.

- Um número significante de pessoas acha que existe uma perda de valor cênico quando parques eólicos são instalados; entretanto, para outras pessoas parques eólicos realçam a beleza da área.
- Com o tempo, os parques eólicos tem melhor aceitação.
- Em termos gerais, n\u00e3o existe evid\u00e9ncia para sugerir um impacto negativo s\u00e9rio no turismo.
- Um estudo de impacto é sugerido como parte do procedimento de planejamento para reduzir os impactos sobre o turismo, incluindo a análise do fluxo de turistas em estradas e o número de camas localizadas em habitações dentro da zona visual do parque eólico.

### 2.2.4 Impacto sobre aves

A estrutura vertical da torre e a movimentação das pás do aerogerador podem representar riscos para aves residentes e migratórias. Entretanto, é difícil chegar a uma conclusão clara sobre os impactos da energia eólica sobre pássaros por diversas razões (EWEA, 2009):

- Impactos são bastante específicos do sítio (dependendo da topografia da paisagem, esquema do parque eólico, estação, tipos de aves migratórias e residentes, entre outros).
- Impactos variam entre as diferentes espécies de pássaros.

Os tipos de risco que podem afetar aves são:

- Colisão com aerogeradores (pás e torre) causando morte ou ferimento;
- Perturbação do habitat: a presença de aerogeradores e trabalhos de manutenção podem deslocar pássaros de seu habitat preferidos e a taxa de sucesso de reprodução pode ser reduzida;
- Interferência nos movimentos do pássaro entre alimentação, abrigo no inverno, habitat de reprodução e muda, que poderiam resultar em voos adicionais consumindo mais energia; e
- Redução ou perda de habitat disponível.

Os principais fatores que determinam a mortalidade de aves pela colisão com o parque eólico são a paisagem topográfica, direção e força dos ventos locais, características de projeto do aerogerador, e a distribuição espacial específica das turbinas sobre a localização(EWEA, 2009). Estudos de impactos ambientais conduzidos durante a fase de planejamento podem mitigar ou evitar o impacto sobre a fauna aviária residente ou migratória, orientando a escolha do local e a disposição dos aerogeradores.

O caso particular de maior mortalidade de espécies de aves de rapina se deve principalmente devido a sua dependência de correntes térmicas para ganhar altitude para se mover entre localidades e para alimentação. Algumas delas são espécies com baixas taxas de reprodução e, portanto mais vulneráveis a perda de indivíduos por colisão. Resultados de estudos de impacto de parques eólicos localizados em Altamont Pass nos EUA e Tarifa na Espanha sobre aves de rapina apresentaram alguns dos níveis mais altos de mortalidade; entretanto, o número médio de fatalidades por aerogerador foi baixo em ambos os locais, variando entre 0,02 a 0,15 colisões por aerogerador. Em Altamont Pass a taxa total de colisões foi alta devido ao grande número de pequenos aerogeradores com velocidades de rotação da pá altas (EWEA, 2009). Esse parque foi instalado na década de 1980, no início do desenvolvimento da energia eólica, e o mercado era dominado por aerogeradores de eixo horizontal de pequeno porte da ordem 100 kW (com torres treliçadas de 20 metros de altura e velocidade de rotação elevada) bem diferentes dos aerogeradores modernos com torres na faixa de 80 a 120 m de altura com velocidades de rotação de 30 a 35 rpm (BURTON, *et al.*, 2001).

Pode ser aceito que muitos parques eólicos apresentam em geral taxas de mortalidade por colisão baixas. Entretanto, mesmo essa baixa taxa de mortalidade por colisão pode ser significativa para espécies ameaçadas ou vulneráveis e tornar difícil para uma espécie em particular sobreviver (EWEA, 2009). Erickson et al. (2005) apresenta um estudo comparativo da mortalidade de pássaros por causas antropogênicas resumido na Tabela 3.

Tabela 3 - Distribuição da estimativa anual da mortalidade de pássaros por atividades humanas (Fonte: ERICKSON, 2005).

Causas	Estimativa de mortalidade anual		
Edificações/Janelas	550 milhões		
Gatos	100 milhões		
Linhas de alta tensão	130 milhões		
Veículos	80 milhões		
Pesticidas	67 milhões		
Torres de comunicação	4,5 milhões		
Aviões	25 mil		
Aerogeradores	28,5 mil		

Medidas de mitigação para minimizar o impacto variam de local e de espécie, mas descobertas comuns na literatura são as seguintes (EWEA, 2009):

- Importantes zonas de conservação e áreas de sensibilidade devem ser evitadas;
- Habitats sensíveis devem ser protegidos pela implementação de práticas de trabalho apropriadas;
- Um programa de monitoramento ambiental antes, durante e depois da construção vai fornecer a informação necessária para avaliar o impacto sobre pássaros;
- Projeto adequado de parques eólicos: situando aerogeradores próximos e agrupando aerogeradores para evitar um alinhamento perpendicular aos caminhos de voo principais;
- Fornecer corredores entre grupos de aerogeradores quando necessário;
- Aumentar a visibilidade das pás do rotor;
- Instalação de cabos de transmissão subterrâneos, especialmente em áreas sensíveis, onde possível;
- Tornar linhas aéreas mais visíveis usando defletores e evitando o uso em áreas de alta concentração de pássaros, especialmente de espécies vulneráveis a colisão;
- Implementar melhoria do habitat para as espécies que usam o sítio;
- Treinamento ambiental adequada para o pessoal do sítio;
- Presença de biólogos ou ecologista durante a construção em localidades sensíveis;
- Relocação de aerogeradores conflitantes;
- Interrupção da operação durante os períodos de migração; e

Redução da velocidade rotor durante períodos críticos.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística<sup>22</sup> (IBGE) disponibiliza dados de espécies de aves ameaçadas em formato de mapas ou dados georreferenciados. Outros órgãos que podem ser consultados são o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Ministério de Meio Ambiente (MMA).

## 2.2.5 Interferência eletromagnética

Aerogeradores podem interferir com sinais eletromagnéticos dos quais fazem parte de uma ampla faixa de sistemas comunicação modernos e, portanto a sua localização exige que uma avaliação cuidadosa seja realizada em relação à interferência eletromagnética (IEM). Em particular, os empreendimentos eólicos frequentemente competem com sistema de rádio por topos de morros e outros locais abertos que oferecem uma alta produção de energia para parques eólicos e bons caminhos de propagação para sinais de comunicação. Os tipos de sistemas que podem ser afetados por IEM e sua frequência de operação incluem sistemas de radio VHF (30-300 MHz), transmissões de televisão UHF (300 MHz-3 GHz) e conexões de micro-ondas (1-30 GHz). A interação de aerogeradores com radares civis e de defesa usados para controle de tráfego aéreo também tem sido assunto de investigação (BURTON, *et al.*, 2001).

A interferência dos aerogeradores nos sinais eletromagnéticos usados por telecomunicações, serviços de radar e navegação podem variar em grau e a natureza dependendo de (EWEA, 2009):

- A localização do aerogerador entre o receptor e transmissor;
- Características das pás do aerogerador;
- Características do receptor;
- Frequência do sinal; e
- A propagação de ondas de rádio na atmosfera local.

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Mapas de aves ameaçada do Brasil, dados demográficos, e outras informações espaciais estão disponíveis em: http://www.ibge.gov.br/home/mapa\_site/mapa\_site.php#geociencias

A EIM pode ser produzida por três elementos do aerogerador: a torre, as pás do rotor girando e o gerador. As torres podem obstruir, refletir ou refratar as ondas eletromagnéticas. Entretanto, a pás modernas são feitas tipicamente de materiais sintéticos que possuem um impacto mínimo na transmissão de radiação eletromagnética. A possível interferência do sistema elétrico pode ser facilmente eliminada com o isolamento apropriado da *nacelle* e boa manutenção (EWEA, 2009).

A interferência com serviços de radiocomunicação móvel é normalmente desprezível e com sinais de TV tem sido minimizada com a substituição das pás de metal por material sintético. Entretanto, quando os aerogeradores são instalados muito próximos de habitações, a interferência tem se mostrado mais difícil de eliminar (EWEA, 2009).

A área de interferência pode ser facilmente calculada usando a *Zona de Fresnel* e, desse modo, medidas técnicas de mitigação para IEM em TV podem ser aplicadas durante a fase de planejamento, localizando o aerogerador longe da linha de visão do transmissor de radiodifusão. Além disso, uma vez que o parque eólico já esteja em operação existe um conjunto de medidas técnicas que podem mitigar a interferência (EWEA, 2009) (BURTON, *et al.*, 2001).

Desse modo, é de senso comum que o projeto e a localização adequados podem evitar ou corrigir qualquer possível problema interferência a custos relativamente baixos usando medidas simples como a instalação de transmissores adicionais (EWEA, 2009) (REFOCUS, 2002). A interferência sobre sistemas de comunicação pode ser considerada desprezível na medida em que pode ser evitada com o projeto cuidadoso do parque eólico (EWEA, 2009).

## 2.3 Desenvolvimento de projetos eólicos

Além da indicação do recurso eólico outros critérios devem ser levados em consideração durante o desenvolvimento do projeto eólico. São considerações técnicas, de planejamento, ambientais e sociais que influenciam fortemente na escolha do sítio e tendem a reduzir a área disponível. A experiência e o conhecimento adquiridos com o desenvolvimento de parques eólicos no mundo mostra como é importante e às vezes crítico

para o sucesso do projeto levar em consideração os aspectos sociais e ambientais (EWEA, 2009) (BURTON, *et al.*, 2001)(BWEA, 1994). O guia de "boas práticas" para o desenvolvimento de projetos eólicos da BWEA, assim como outras publicações do gênero produzidas por outros países, foi elaborado com base nessas premissas e tem como objetivo "estabelecer o processo e abordagem para identificação, desenvolvimento e implementação apropriada" de propostas de empreendimentos eólicos (BWEA, 1994). Segundo o guia de "boas práticas" da EWEA (2002), baseado no guia da BWEA (1994), o processo de desenvolvimento de um projeto eólico seque uma sequencia cronológica que pode ser dividido em 7 etapas, que se subdividem em 3 frentes de trabalho que ocorrem paralelamente. As sete etapas são:

- Escolha do local: identificação de locais mais adequadas e suas restrições técnicas, comerciais, legais e ambientais existentes; a análise só continua com os melhores candidatos.
- 2) Estudo de viabilidade: avaliação técnica mais detalhada, incluindo medição de vento no local e esquemas (layouts) preliminares dos aerogeradores; avaliação econômica preliminar; levantamento de restrições e oportunidades socioambientais para preparar o pedido de licença ambiental; avaliação das restrições do planejamento.
- 3) Avaliação detalhada do projeto (Projeto Básico): estudo detalhado dos aspectos técnico, econômico-financeiro, ambiental e legal do empreendimento. Envolve a escolha da área definitiva; contínua medição de vento no local; definição do layout final; escolha dos aerogeradores; estudos de interligação elétrica; elaboração do plano de construção, operação e desativação da usina eólica; negociação do contrato de arrendamento ou aquisição do(s) terreno(s) envolvido(s); obtenção das licenças governamentais (ANEEL, meio ambiente, conexão à rede elétrica); estudo de viabilidade econômico-financeira; obtenção do contrato de compra e venda de energia; tratativas com investidores ou agentes financiadores e; finalmente, a negociação da compra de equipamentos e serviços junto aos fornecedores (LACTEC, 2007).
- 4) Apresentação do planejamento: submeter o planejamento da etapa anterior às autoridades responsáveis, incluindo os estudos ambientais, e à comunidade local.

- 5) *Implantação*: execução das obras de construção de acordo com o plano aprovado; interligação elétrica; testes de comissionamento; entrega do controle da usina à empresa encarregada de sua operação e manutenção.
- 6) *Operação e Manutenção*: operar e manter a usina, realizando as revisões periódicas, e mantendo a comunidade informada sobre o desempenho da usina.
- 7) Descomissionamento e reintegração da terra: desativar a usina; retirar todos os equipamentos; restaurar a área o mais próximo possível de seu estado anterior ou ao que for acertado com as autoridades e comunidades locais.

## As três Frentes de Ação são:

- a) *Técnico-Econômica:* considera os aspectos técnicos, como o projeto da usina, a campanha de medições de vento, acessibilidade, infraestrutura, questões de construção e, também, a análise de viabilidade econômica do empreendimento.
- b) Ambiental: está relacionado à análise do efeito do empreendimento eólico sobre os interesses socioambientais das comunidades envolvidas, sendo fundamental na seleção e no desenvolvimento de áreas apropriadas.
- c) Diálogo e Consulta: envolve o diálogo aberto que deve existir entre o empreendedor e as demais partes envolvidas no projeto, como autoridades governamentais de planejamento, comunidade e grupos locais, que possam ter interesse e/ou serem afetados pelo empreendimento eólico.

Apesar de serem discutidas separadamente, as três frentes de ação são interrelacionadas e devem ser consideradas como tendo uma importante influência sobre as outras. A Tabela 4 apresenta um resumo das frentes de trabalho que se desenvolvem em cada etapa do projeto.

Tabela 4 - Etapas e frentes de trabalho de um empreendimento eólico (LACTEC, 2007).

	Frentes de Ação			
Etapas	a) Técnico-Comercial	b) Ambiental	c) Diálogo e Consulta	
1) Escolha do Local	Análise Técnica Inicial	Análise Ambiental Inicial	Consulta Inicial a Entidades Governamentais	
2) Estudo de Viabilidade	Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica	Definição Detalhada de Escopo da Análise Ambiental	Consulta às Comunidades Locais	
3) Projeto Básico	Coleta de dados de vento; escolha da turbina e do layout de turbinas; revisão da viabilidade econômica.	Avaliação de impactos socioeconômicos e ambientais e sobre o sistema elétrico.	Rever e alterar o projeto juntamente com autoridades e comunidades locais.	
4) Apresentação do Planejamento	Tornar públicos o Relatório de Impactos e os Planejamentos de Construção, Operação e Desativação do empreendimento eólico junto às autoridades e às comunidades envolvidas (o mais amplamente possível). Deixar claras as condições necessárias para a implantação e obrigações assumidas pelos empreendedores.			
5) Implantação	Estabelecer um responsável, junto às autoridades locais, pelo gerenciamento da área e de todas as empresas contratadas. Garantir que estas obedeçam às condições e obrigações.	Acertar com empresas e autoridades locais o uso do solo durante a construção para evitar impactos desnecessários.	Manter diálogo com a comunidade local para garantir que os trabalhos estejam respeitando as obrigações.	
6) Operação e Manutenção	Operar e fazer as manutenções rotineiras nas turbinas eólicas. Gerenciamento administrativo de pessoal e equipamentos.	Estudos de acompanhamento de impactos; correção de rumo se necessário. Sistema formal de atendimento à comunidade em questões socioambientais.	Manter relação ativa de parceria e esclarecimento junto à comunidade local.	
7) Descomissionamento	Notificar as autoridades locais, com antecedência, sobre a desativação. Retirar todas as turbinas e retornar a área, tanto quanto possível, ao seu estado original. Normalmente o valor residual das turbinas é suficiente para cobrir os custos de desativação.			

LACTEC (2007) propõe um metodologia de avaliação técnica e econômica de empreendimentos eólicos organizada em seis fases:

• Fase 01 - Seleção do Local de Projeto: começa com pesquisas em escritório, onde se observam dados existentes de vento ou inventários de potencial eólico, cartas topográficas e imagens de satélite. Após isso, procede-se ao trabalho em campo, onde são visitados os locais previamente definidos, observando a rugosidade, relevo, presença de construções e obstáculos, escolhendo-se assim, o sítio de

- projeto. Já nesta fase, é importante saber se o proprietário do terreno tem interesse no desenvolvimento de projetos de geração de energia eólica.
- Fase 02 Medição de Vento: começa após a conclusão da primeira fase. O trabalho conta com a escolha do sistema de medição (anemômetros, sensores de direção e data logger), torre e instalação. Segue-se a campanha de medição de vento, por um período mínimo de 2 anos (considerando o requisito atual para habilitação do projeto para participação dos leilões públicos de compra de energia).
- Fase 03 Micrositing e Estimativa de Geração de Energia: nesta fase escolhem-se os modelos de aerogeradores a serem utilizadas e os layouts do parque eólico planejado (micrositing). São realizadas assim, as estimativas de geração de energia. Ao final dessa fase, o empreendedor terá em mãos os cenários de produção de energia do projeto.
- Fase 04 Análise Econômico-Financeira de Usinas Eólio-Elétricas: apresenta os custos de implantação de um parque eólico, custos de operação e manutenção, e a análise de viabilidade do empreendimento eólio-elétrico, indicando a taxa de rentabilidade para cada modelo de aerogerador selecionado na Fase 03.
- Fase 05 Apresentação do Projeto: o projeto será apresentado à comunidade eólica, investidores, autoridades políticas e ambientais, e demais interessados. Inclui os principais números do projeto e também uma apresentação visual do parque planejado.
- Fase 06 Implantação, Operação, Manutenção e Desativação de Usinas Eólicas.

O escopo desse trabalho se restringe a fase inicial de seleção de locais para o desenvolvimento do parque eólico, cujo objetivo principal é auxiliar na localização e seleção dos locais adequados mais promissores a fim de:

- Promover o uso eficiente de recursos logísticos; direcionando as atividades de inspeção em campo aos locais mais favoráveis e com mais chances de realização;
- Contribuir para redução do risco de desenvolvimento do projeto nas etapas seguintes; identificando objeções ao projeto em estágios iniciais que poderiam ter sido previstas anteriormente, antes que tempo e quantias consideráveis tenham sido gastos, como a iniciação de uma campanha de medição em um local inadequado.

O ANEXO I apresenta as orientações e práticas recomendadas para a etapa inicial de seleção de sítios eólicos pelo *Guia de "boas práticas" para o desenvolvimento de projetos eólicos* da EWEA (2002) e pelo *Manual de Avaliação Técnico-Econômica de Empreendimentos Eólio-Elétricos*(LACTEC, 2007). A seguir são apresentadas as práticas empregadas para identificação de sítios eólicos promissores pelos pesquisadores do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).

### 2.3.1 Práticas do CEPEL

O CEPEL do grupo Eletrobrás atua na área de energia eólica de desde 1995. Os pesquisadores do centro têm atuado principalmente na área de mapeamento do recurso eólico brasileiro e atividades de prospecção de sítios eólicos. O desenvolvimento do *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* foi coordenado pelo pesquisador do CEPEL Antonio Leite de Sá, elaborado com o objetivo de fornecer informações sobre o recurso eólico disponível para capacitar tomadores de decisão na identificação de áreas para aproveitamentos eólio-elétricos e fomentar o desenvolvimento da energia eólica no Brasil (CEPEL, 2001).

A atividade de prospecção de sítios eólicos procura identificar locais promissores com características favoráveis à implantação de parques eólicos, tais como (SÁ e DUTRA, 2011):

- Indicativos de vento;
- Área suficiente para o desenvolvimento do parque;
- Baixa rugosidade;
- Rede compatível; e
- Desimpedimento para uso.

O trabalho pode ser divido em duas etapas: pesquisa em escritório e inspeção em campo. O planejamento da prospecção realizado em escritório procura favorecer a inspeção do maior número possível de áreas promissoras e obter o máximo de informações possíveis de cada localidade a fim de subsidiar a escolha das áreas que serão estudadas.

A pesquisa em escritório se inicia com o estudo do potencial eólico da região escolhida. O *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* é a principal ferramenta utilizada para escolha da região de estudo e identificação as áreas mais promissoras, com os melhores

ventos, para serem inspecionadas em campo. Em geral essas áreas são identificadas a partir da definição de um valor de corte para velocidade média de vento considerado adequado para uma geração de energia elétrica economicamente atrativa. No caso de parques eólicos de grande porte conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), o projeto é considerado economicamente atrativo para velocidades médias anuais de vento superiores a 7 m/s a 50 metros de altura (SÁ, 2001). Para aplicações de energia eólica de médio e pequeno porte o limite considerado em geral é menor.

A programação da viagem de inspeção em campo é realizada com base no levantamento do potencial eólico a partir do atlas e na observação de imagens de satélite das áreas de interesse, procurando identificar a ocupação, atividade econômica, o relevo e as vias de acesso para alcançar os locais planejados (SÁ e DUTRA, 2011).

Durante a prospecção em campo procura-se obter o máximo de informações sobre o local. As informações que costumam ser coletadas são:

- Coordenadas geográficas do local observado;
- Atividade econômica e uso da terra;
- Filmagem 360° do local;
- Fotografias para a composição de um cenário de 360°;
- Demonstração de evidências objetivas de vento na região;
- Identificação do proprietário ou proprietários do sítio, sempre que possível;
- Identificação de linhas de transmissão e subestações nas redondezas;
- Estimativa de área útil;
- Cobertura de telefonia celular:
- Dificuldade de acesso.

Os locais visitados são então classificados como promissores de acordo com sua adequação ao desenvolvimento de projetos eólicos com base no julgamento das informações coletadas diante dos seguintes critérios:

- 1. Evidências de vento
- 2. Relevo favorável
- 3. Rugosidade adequada

- 4. Ocupação e uso da terra
- 5. Acessibilidade

Como resultado da prospecção em campo, são identificados polígonos para indicação do potencial energético provável dos locais. Os polígonos são levantados a partir dos locais observados classificados como promissores são identificados polígonos considerando as áreas vizinhas que possuem características semelhantes de altitude, relevo, rugosidade e acessibilidade baseado nas observações em campo, análise de modelos digitais de relevo e imagens de satélite da região. São considerados promissores os polígonos com as seguintes características (SÁ e DUTRA, 2011):

- Os que se localizam em áreas nas quais o *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* indica a existência de ventos com média anual igual ou superior a 7m/s;
- Os que apresentam solo plano ou levemente ondulado;
- Os que n\u00e3o apresentam relevo importante na dire\u00e7\u00e3o predominante dos ventos e baixa rugosidade;
- Os que apresentam fácil acesso e alguma atividade econômica que não influencie demasiadamente no comportamento dos ventos, pois estas facilitam a obtenção de licença ambiental uma vez que já estão sendo exploradas comercialmente; e
- Os que apresentam alguma subestação próxima.

## 2.4 Projeto de um Parque Eólico

Uma vez que um sítio tinha sido escolhido e a decisão de investir tenha sido tomada o projeto do parque se inicia. O principal objetivo é maximizar a produção de energia, minimizar o custo do capital e custos operacionais, e atender as restrições impostas pelo sítio. Como as restrições e custos são sujeitos a certo nível de incerteza, a otimização do processo procura minimizar o risco (EWEA, 2009). Segundo EWEA (2009) as restrições para o desenvolvimento são:

 Máxima capacidade instalada (devido a conexão a rede ou termos do acordo de compra de energia);

- Limites do sítio:
- "Recuos" (set back) Distâncias de rodovias, habitações, linhas aéreas, limites de propriedade e outros;
- Restrições ambientais;
- Localização de residências sensíveis ao ruído (se houver) e critério de avaliação;
- Localização de pontos de observação visualmente sensíveis (se houver) e critério de avaliação;
- Localização de habitações que pode ser afetadas pela sombra intermitente (*shadow flicker*) projetada pelas pás do aerogerador em movimento quando o sol está em uma direção particular, e critério de avaliação;
- Espaçamento mínimo do aerogerador, como definido pelo fornecedor do equipamento (esse espaçamento é particularmente afetado pela turbulência); e
- Restrições associadas com sinais de comunicação, por exemplo, corredores de micro-ondas ou radares.

As restrições podem mudar à medida que as discussões e negociações com as partes interessadas avançam, sendo, portanto um processo iterativo.

Após a definição das restrições prováveis, um esquema preliminar do parque eólico pode ser produzido o que permite estabelecer qual a dimensão do empreendimento. Como um guia aproximado, a capacidade instalada de um parque eólico é da ordem de 12 MW/km<sup>2 23</sup>, a não ser que existam maiores restrições que afetem o uso da terra disponível (EWEA, 2009). Em geral nos trabalhos desenvolvidos pelo CEPEL o valor usado é mais conservador sendo considerada uma capacidade instalada de 6 MW/km<sup>2</sup> (SÁ e DUTRA, 2011).

No desenvolvimento do esquema preliminar do parque, devem ser definidos os tamanhos de aerogerador que serão levados em consideração no empreendimento, pois a capacidade instalada que pode ser alcançada com diferentes tamanhos pode variar

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> Uma estimativa da capacidade instalada em função da área pode calculada considerando um espaçamento de padrão 4 x 8 diâmetros de rotor entre os aerogeradores, o que resulta em uma potência instalada por área de 12 MW/km2. O modelo de aerogerador utilizado para esse cálculo é o Enercon E-70 fabricado no Brasil pela empresa *Wobben*.

significativamente. A seleção de um modelo específico de aerogerador é deixada para a fase de detalhamento do projeto, onde os termos comerciais dos potenciais fabricantes são conhecidos e, além disso, mais dados de medição de vento vão sendo obtidos nesse tempo e o conhecimento mais adequado das restrições do sítio adquirido. Portanto nesse estágio um aerogerador genérico é considerado, definido em termos de um faixa de diâmetros de rotor e de altura de torre, ou dois ou três esquemas preliminares são construídos baseados em modelos específicos.

Esse esquema preliminar do parque eólico pode então ser usado para orientar debates com autoridades relevantes e partes afetadas. Esse processo é iterativo, sendo comum a alteração do esquema nesse estágio. Os fatores mais prováveis de afetar a localização do aerogeradores são (EWEA, 2009):

- Otimização da produção de energia elétrica;
- Influência visual;
- Ruído acústico; e
- Carregamento do aerogerador.

As questões de impacto visual e de ruído acústico já foram abordadas na Seção 2.2.

#### 2.4.1 Otimização da produção de energia elétrica

Com a definição das restrições do parque eólico, o esquema do parque eólico já pode ser otimizado. Esse processo é conhecido como *micrositing* do parque eólico. Como foi observado anteriormente, o objetivo desse processo é maximizar a produção de energia elétrica do parque eólico enquanto procura minimizar os custos de infraestrutura e operação. Para maioria dos projetos, a viabilidade econômica é significativamente mais sensível a mudanças na produção de energia do que os custos de infraestrutura. É, portanto mais apropriado usar a produção de energia como o parâmetro dominante no desenho do esquema (EWEA, 2009) (SCHLEZ e TINDAL, 2012).

Existem várias ferramentas comerciais de projeto de parque eólicos que auxiliam no projeto detalhado do parque eólico. Com a execução de uma análise apropriada do regime de vento no local, um modelo pode ser definido que será utilizado para desenhar o esquema, prever a produção de energia do parque eólico assim como pode ser usado para

abordar as questões econômicas e de planejamento relacionadas (EWEA, 2009). O processo de otimização computacional de um parque eólico realizado por esses softwares realiza uma série de iterações variando parâmetros de projeto como altura da torre, posição dos aerogeradores, tamanho do parque e tipo de aerogerador, conseguindo ganhos de produção que podem ser bastante significativos dependendo do porte do parque.

#### 2.4.2 Carregamento do aerogerador

É necessária a instalação de muitos aerogeradores para a produção de uma quantidade significativa de energia elétrica. O agrupamento desses aerogeradores é interessante, pois a disponibilidade da terra, o tamanho das áreas com recurso eólico, o custo da instalação e manutenção favorecem a disposição em grupos compactos. A localização de muitos aerogeradores em uma área limitada requer o conhecimento da distância mínima entre os aerogeradores e como a configuração geométrica das máquinas afeta o desempenho geral do parque(HIESTER e PENNELL, 1981).

O espaçamento entre os aerogeradores adequado depende fortemente da natureza do terreno e da rosa de ventos do local. Para espaçamentos menores do que 5 diâmetros de rotor na direção predominante do vento é provável que perdas inaceitáveis aconteçam pelo efeito da esteira aerodinâmica (EWEA, 2009). O espaçamento mínimo entre os aerogeradores é um elemento fundamental no desenho do *layout* do parque. A fim de garantir que os aerogeradores não estejam operando fora das suas condições de projeto, o espaçamento mínimo aceitável deve ser obtido do fornecedor e atendido.

O efeito esteira é resultado do processo de conversão da energia cinética dos ventos em eletricidade pelo aerogerador que absorve parte dessa energia reduzindo a velocidade do vento e produzindo um escoamento turbulento à jusante do disco do rotor (CEPEL, 2001). O efeito esteira afeta o desempenho de aerogeradores localizados a jusante do fluxo do vento pela (HIESTER e PENNELL, 1981):

- Redução da produção de energia porque a energia cinética disponível na esteira aerodinâmica é menor do que em um escoamento não perturbado;
- Redução da produção de energia porque a turbulência da esteira pode afetar negativamente o desempenho aerodinâmico do aerogerador afetado; e

 Redução da vida útil porque a turbulência da esteira pode afetar a integridade estrutural.

A velocidade do vento na esteira aerodinâmica se recupera gradualmente ao misturar-se com as massas de ar predominantes no escoamento livre e a turbulência produzida pelo aerogerador também se dissipa. Após certa distância a jusante do aerogerador, o escoamento do vento praticamente recupera as condições de velocidade originais e turbinas adicionais podem ser instaladas, minimizando as perdas de desempenho causadas pela interferência da turbina anterior. Na prática, essa distância varia com a velocidade do vento, as condições de operação da turbina, a rugosidade do terreno e a condição de estabilidade térmica vertical da atmosfera. De modo geral, uma distância considerada segura para a instalação de novas turbinas é da ordem de 10 diâmetros de rotor (D), se instalada a jusante, e 5 D, se instalada ao lado, em relação ao vento predominante (Figura 11) (CEPEL, 2001).

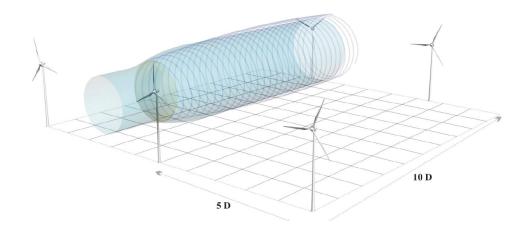


Figura 11 - Esteira aerodinâmica e afastamento entre turbinas eólicas (CEPEL, 2001).

Em área com rosas de vento predominantemente unidirecionais, como em San Gorgonio Pass na Califórnia, ou rosas dos ventos bidirecionais, com em Galícia na Espanha, distâncias maiores entre os aerogeradores na direção predominante e espaçamentos menores na direção perpendicular a direção predominante se mostram mais produtivos. Espaçamentos menores significa que os aerogeradores são mais afetados pela turbulência das esteiras dos aerogeradores montante. Isso criará cargas mecânicas e exigirá

a aprovação pelo fornecedor do aerogerador para caso exista algum acordo de garantia e esse não seja afetado (EWEA, 2009).

Outras questões que afetam o carregamento do aerogerador específicos do local são (EWEA, 2009):

- Turbulência natural causada por obstruções, topografia, rugosidade da superfície e efeitos térmicos; e
- Ventos extremos.

#### 2.4.3 Infraestrutura

A infraestrutura de um parque eólico consiste de (EWEA, 2009):

#### • Obras civis:

- Drenagem e estradas;
- Fundações do aerogerador;
- o Fundações da torre anemométrica; e
- Edificações abrigando quadros de comando elétrico, equipamento central
   SCADA, e possivelmente peças sobressalente e instalações de manutenção.

#### Obras elétricas:

- Equipamentos no ponto de conexão (point of connecton POC) a rede básica;
- Redes de cabeamento subterrâneo e/ou linhas aéreas, formando circuitos de alimentação radial para cadeias de aerogeradores;
- Componentes elétricos para proteção e desligamento dos circuitos alimentadores;
- Transformador e componentes elétricos associados à aerogeradores individuais (apesar de isso ser normalmente localizado dentro do aerogerador e fornecido pelo próprio fabricante do aerogerador);
- o Equipamento de compensação de reativo, se necessário; e

- o Sistema de aterramento.
- Sistema supervisório de controle e aquisição de dados (SCADA)
  - Computador central
  - o Cabos de sinal para cada aerogerador e torre de medição;
  - Transdutores de velocidade do vento e de outras grandezas meteorológicas nas torres de medição; e
  - Transdutores elétricos no ou próximo do POC.

A Conforme discutido anteriormente, a viabilidade econômica do projeto é influenciada principalmente pela produção de energia do parque eólico que está associada à velocidade média do vento, direção predominante, modelo do aerogerador, número de aerogeradores, e o espaçamento do aerogeradores. Entretanto, a influência da infraestrutura do parque eólico na viabilidade do projeto também é significativa, pelas seguintes razões (EWEA, 2009):

 A infraestrutura constitui uma parte significante do custo total do projeto. Uma divisão típica dos custos é dada na Figura 12.

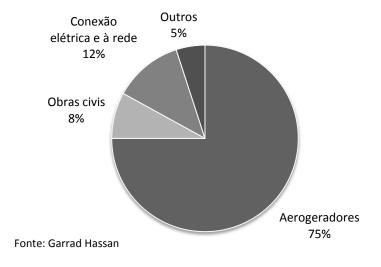


Figura 12 - Divisão típica do custo de capital para parque eólico em terra (EWEA, 2009).

As obras civis apresentam riscos significantes ao cronograma e custos do projeto.
 Não é desconhecido que grandes atrasos e custos adicionais podem ser causados

pela falta de conhecimento adequado das condições do solo, ou de dificuldades de trabalho no local que, naturalmente, são expostos ao tempo e podem ter um difícil acesso.

- Os itens elétricos maiores (transformadores, quadro de comando) têm tempos de espera longos. Em relação ao instante de elaboração do projeto, um grande transformado de potência HV/MV<sup>24</sup> pode possuir um tempo de espera de alguns anos.
- As obras de conexão a rede podem representa um risco significativo ao cronograma de projeto. É provável que trabalhos devam ser executados por operadores da rede elétrica, e a programação para esses trabalhos está efetivamente fora do controle do empreendedor do parque eólico. É bastante incomum o operador de rede elétrica aceitar a responsabilidade por qualquer atraso.

# 2.5 Critérios de Avaliação de Sítios Eólicos

A localização de parques eólicos é um problema de decisão espacial bastante complexo, pois envolve vários agentes com objetivos distintos, e muitas vezes conflitantes, e está sujeito a diversas restrições de caráter técnico e ambiental. A solução desse problema, para ser considerada aceitável, deve ser capaz de conciliar esses objetivos conflitantes atendendo as restrições impostas.

A seleção do sítio corresponde à etapa inicial de seleção do local mais adequado para o desenvolvimento de qualquer projeto de energia eólica. O propósito dessa fase é identificar locais promissores e definir restrições técnicas, comerciais e ambientais a fim de que somente os locais mais apropriados sejam selecionados para o desenvolvimento das etapas seguintes. A pesquisa para localização de um sítio eólico pode ser orientada pelas seguintes questões (SÁ, 2011):

- Onde estão os melhores locais?
- Como é o relevo e qual é a rugosidade?

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Abreviação do termo em inglês *High Voltage and Medium Voltage*.

- Estão disponíveis?
- Existe rede elétrica de distribuição?
- Existem subestações com capacidade adequadas próximas?
- Existem rodovias de acesso?

Um estudo desse tipo normalmente se inicia com a escolha de uma região onde são identificas áreas menores, em geral, considerando um valor de corte para velocidade média de vento considerado adequado para uma geração de energia elétrica economicamente atrativa. Em seguida nas áreas candidatas são identificados sítios adequados levando em consideração critérios como velocidade e direção do vento, relevo e rugosidade, acesso ao local, proximidade a rede elétrica, ocupação e uso da terra e o atendimento das restrições físicas, econômicas e ambientais.

Esse estudo deve levar em consideração todos os dados técnicos e ambientais publicados disponíveis com o apoio de ferramentas como base dados e mapas de vento, imagens de satélite e modelos topográficos, e uma base cartográfica georreferenciada com vias de acesso, sistema elétrico, limites de áreas de preservação ambiental, e etc.

Essa fase inicial procura abordar as questões que influenciam o desenvolvimento de modo superficial que deverão ser examinadas com mais detalhes nas etapas subsequentes. A elaboração da avaliação de impacto ambiental só é iniciada no estágio seguinte com a escolha do local ou dos locais.

A proposta do presente estudo se limita a identificar locais promissores a fim de orientar trabalho de inspeção de campo. Nesse sentido, um conjunto de critérios de avaliação para a localização de sítios eólicos promissores foi selecionado com base na literatura e práticas empregadas, e levando em consideração as informações disponíveis (Tabela 5). Esses critérios são divididos em dois tipos: *restrições* e *fatores*.

Tabela 5 - Critérios de avaliação selecionados para a localização de sítios eólicos promissores.

Tipo	Critério	Consideração	
	Proximidade de rodovias e ferrovias (Modal viário)	Física	
	Proximidade de Aeroportos		
Dastriaña	Proximidade de Corpos d'água	_	
Restrição	Proximidade da Costa litorânea	Ambiental	
	Unidades de conservação		
	Proximidade de áreas urbanas	Social	
	Recurso eólico	-	
	Área disponível		
Fator	Conexão à rede elétrica Técnica e Econôm		
	Acessibilidade	_	
	Ocupação e uso do solo		

O termo *restrição* usado aqui define um critério que impõe uma restrição absoluta sobre a localização, e desse modo limita a número de alternativas a serem consideradas, enquanto o termo *fator* é um critério que impõe uma restrição relativa de acordo com uma escala de preferência que melhora ou piora a adequação de uma alternativa específica em relação à atividade sob consideração (EASTMAN, *et al.*, 1995).

Os fatores aqui considerados tem caráter técnico e comercial, estando diretamente associados à viabilidade econômica do empreendimento eólico. A seguir cada um desses fatores é abordado levando em consideração a sua influência no projeto de um parque eólico e as estratégias para sua mensuração.

#### 2.5.1 Recurso eólico

Conforme já discutido na Seção 2.1, a viabilidade econômica de um parque eólico está fortemente associada à produção de energia, que por sua vez é altamente sensível à velocidade do vento. O *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* é uma ótima ferramenta para a determinação da região de estudo e identificação de áreas promissoras a nível regional. Entretanto, o atlas eólico não é considerado adequado à escala do problema de busca de sítio, que corresponde à resolução do modelo de elevação digital STRM utilizado (cerca de 92 m x 92 m), em função da sua resolução (1 km x 1 km) e de problemas de representatividade do modelo de dados de vento, mais acentuado em regiões no interior do país. Portanto, a incerteza associada à localização exata das áreas mais promissoras

indicadas pelo atlas eólico torna o seu uso inadequado ao problema de busca de sítios eólicos considerado nesse trabalho.

O atlas eólico não será usado para estimar a velocidade do vento no local, mas será considerado como um indicativo de que na área existem ventos promissores e usado para delimitar uma região de busca. Apesar disso, as informações de rosa dos ventos do atlas, que apresentam uma pequena variação no espaço geográfico em relação à escala geográfica considerada, serão utilizadas para avaliar o nível de exposição dos sítios ao vento predominante. Na falta de informações adequadas sobre o recurso eólico, indicadores topográficos podem ser utilizados para avaliar a predisposição do local ao aproveitamento da energia eólica. Algumas regras gerais para as quais existem notáveis exceções são listadas abaixo (SCHLEZ e TINDAL, 2012):

- Boa exposição, não apresentando relevos importantes particularmente na direção predominante do vento, irá melhorar substancialmente o recurso eólico disponível;
- Relevo plano ou levemente ondulado. Um morro ideal deve ter inclinações de aproximadamente 17°. Inclinações maiores não trazem grandes melhorias ao fluxo do vento e podem causar a separação do escoamento o que complica as condições de vento no local;
- Baixa vegetação no local e ao redor reduz menos o fluxo do vento do que locais com vegetações de maior estatura. Entretanto, um local com boa exposição e árvores menores é provável de se mostrar melhor do que um local com baixa exposição e sem árvores;
- O local deve apresentar áreas com inclinações baixas (abaixo de uma gradiente de 10% ou um ângulo de 6°) para reduzir custos com obras civis e permitir a instalação do parque eólico. Os aerogeradores são normalmente montados no solo, sendo difícil realizar a montagem em uma área inclinada (LACTEC, 2007).

Modelos de avaliação de recurso eólico e localização frequentemente integram ferramentas de análise geográfica como modelos digitais de elevação ou de terreno (digital elevation model - DEM ou digital terrain model - DTM). Domínguez e Amador (2007) relatam que DEMs foram uma das primeiras ferramentas usadas para localização de

parques eólicos devido a fatores geográficos considerados importantes no aproveitamento da energia eólica, como por exemplo, elevação, declividade e morfologia.

O DEM derivado de dados do *Shuttle Radar Topography Mission* disponível publicamente na resolução de cerca de 92 m x 92 m permite a caracterização de vários aspectos do terreno que podem ser considerados na avaliação do local de acordo com a sua adequação ao aproveitamento da energia eólica na fase inicial de seleção de sítios. Entretanto, esse modelo apresenta uma superelevação média de 9 m e em alguns lugares chegam a picos de 20 m de diferença, e, portanto deve ser verificado quanto para o uso em estudos mais sensíveis (análise de visibilidade, avaliação energética e previsão de ruído) nas etapas seguintes de análise de viabilidade e detalhamento do projeto (SCHORER e SPENGEMANN, 2007).

A aplicação de técnicas de *análise espacial* e de *modelagem de superfície* permite extrair medidas derivadas do DEM que são úteis ao contexto de tomada de decisão. A partir de medidas objetivas do relevo é possível avaliar o quanto o terreno atende aos critérios espaciais desejados para a energia eólica como nível de exposição e complexidade. Muitos sistemas SIG comerciais e abertos fornecem ferramentas de análise espacial de DEM em formato *grid* (grade regular) que podem ser usadas na avaliação espacial e modelagem de superfície.

Algumas medidas que podem ser extraídas para a caracterização do terreno são (BERRY, 2007):

- Desvio da tendência, Mapas de diferença e Superfícies de desvio para identificação de feições convexas e côncavas;
- Superfícies de coeficiente de variação sumariza estatisticamente a disparidade entre
  os valores de elevação dos vizinhos, pode ser usada para caracterizar a
  irregularidade do relevo (complexidade);
- *Mapas de declividade e aspecto* para caracterização a magnitude e a direção da inclinação da superfície;
- Declividade de um mapa de declividade (2ª derivada) sumariza a frequência das mudanças da inclinação, pode ser usada para caracterizar a irregularidade do relevo (complexidade);

• *Mapas de confluência* para caracterização do número de locais morro acima conectadas a cada localidade da superfície.

A nova informação gerada a partir dessas análises pode ser usada como atributo para avaliar o relevo em relação aos critérios espaciais considerados. Nesse trabalho, serão utilizados os seguintes critérios para classificação do relevo:

- Exposição: caracteriza o nível de exposição do local em relação a relevo vizinho a
  partir da medida de proximidade com as áreas mais expostas (nos topos dos
  morros);
- Sombreamento de relevo: avalia o nível de influência no local do relevo a montante na direção predominante do vento na região baseado nos conceitos de obstáculo e do ângulo crítico de inclinação do terreno que causaria o descolamento do fluxo de ventos (vide Seção 2.1.1);
- Complexidade: caracteriza a irregularidade da área vizinha ao local em função da disparidade de alturas ou frequência de mudança da inclinação; e
- Declividade: caracteriza a adequação do terreno para realização de obras civis e montagem do parque.

A rugosidade da superfície pode ser derivada de informações do uso da terra usando mapas topográficos, fotografias aéreas, imagens de satélite, base de dados de cobertura do solo, ou por inspeção visual dos locais de interesse. Entretanto, informações de rugosidade de superfície em resolução adequada para a identificação de sítios para parques eólicos dificilmente encontram-se disponíveis e atualizadas. O levantamento desse tipo de informação na qualidade, extensão e resolução adequadas para esse trabalho exigiria bastante tempo e não cabe dentro do escopo desse trabalho. Benelli *et al.* (2009) descreve a metodologia usada na modelagem de rugosidade para o mapeamento do recurso eólico do estado do Paraná.

Um mapa de rugosidade simples pode ser desenvolvido a partir da reclassificação de mapas existentes de cobertura e uso da terra. Uma alternativa para reduzir o esforço seria mapear a rugosidade para uma área menor definida a partir dos melhores sítios

identificados usando imagens de satélite em alta resolução do Google Earth e realizar o processo de busca novamente nessa área reduzida considerando essa nova informação.

Cabe destacar que a análise proposta no presente estudo antecede a atividade de inspeção em campo, e, portanto normalmente existe pouca informação e/ou conhecimento da característica da cobertura de vegetação típica e das atividades econômicas desenvolvidas na região.

#### 2.5.2 Área disponível

A capacidade instalada suportada por um sítio varia em função das características do solo, disposição do terreno, direção e velocidade dos ventos predominantes, espaçamento mínimo entre os aerogeradores, layout do parque e restrições de caráter socioambiental. O agrupamento dos aerogeradores em um parque eólico é interessante, pois a disponibilidade da terra, o tamanho das áreas com recurso eólico, o custo da instalação e manutenção favorecem a disposição em grupos compactos. Entretanto, um espaçamento mínimo aceitável entre os aerogeradores definido pelo fornecedor deve ser atendido, a fim de garantir que os aerogeradores não estejam operando fora das suas condições de projeto.

As informações necessárias para permitir o *layout* adequado de um parque eólico só podem ser obtidas com a qualidade e exatidão exigidas a partir da medição do vento e inspeção detalhada do local considerando que o sítio já tenha sido escolhido, o que foge ao escopo desse estudo.

Uma estimativa da capacidade instalada em função da área pode ser calculada considerando um espaçamento padrão de 4 x 8 diâmetros de rotor entre os aerogeradores e um modelo de aerogerador padrão 25 de 2 MW com 70 metros de diâmetro de rotor, o que resulta em uma potência aproximada de 12 MW/km². Entretanto, considerando um cenário mais pessimista em função de restrições construtivas não identificadas inerentes ao local (como condições específicas do solo, infraestrutura existente, fontes de água entre outros) será considerada uma capacidade instalada de 6 MW/km² (valor normalmente utilizado nos trabalhos realizados pelo CEPEL (SÁ e DUTRA, 2011)).

\_

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> O modelo de aerogerador padrão utilizado é baseado no modelo de aerogerador Enercon E-70 que fabricado no Brasil pela empresa *Wobben*, que é uma subsidiária da fabricante alemã *Enercon*.

A área disponível do sítio define então o tamanho do parque eólico que poderia ser construído.

#### 2.5.3 Conexão à rede elétrica

O vento é uma fonte de energia geograficamente distribuída com parques eólicos frequentemente espalhados sobre grandes áreas geográficas, e assim as redes de distribuição de energia elétrica, que originalmente foram construídas para suprir os centros de cargas energia, passam a coletar energia elétrica. Desse modo, a energia eólica pode ser dita como inserida (*embedded*) na rede de distribuição ou a geração é descrita como sendo distribuída (*dispersed*) (BURTON, *et al.*, 2001).

A conexão a rede, além de ser uma exigência técnica para permitir o despacho e a comercialização da eletricidade gerada, é o segundo item de maior custo na implantação de um parque eólico. O custo de construção da linha de interligação é o que apresenta maior variação entre os custos de conexão a rede, sendo diretamente proporcional ao seu comprimento. Portanto, a distância ao ponto de conexão à rede pode ser considerada um parâmetro importante no problema de localização de parques eólicos.

Na busca por um sítio, a proximidade a rede de transmissão de média tensão (MV) é um bom indicativo de que uma conexão apropriada é possível, mas a presença de somente linhas de transmissão de alta tensão (*high voltage* - HV) pode tornar o custo de conexão proibitivo no caso de pequenos e médios parques eólicos (SCHLEZ e TINDAL, 2012).

O empreendedor é técnica e financeiramente responsável pela conexão do parque até uma subestação adequada. Isso pode significar um grande investimento na construção de uma linha de interligação e, eventualmente, até a construção de uma subestação. Assim, os estudos iniciais de conexão devem considerar a potência do parque eólico, definindo a capacidade da subestação (LACTEC, 2007). A Tabela 6 apresenta uma classificação usada como regra geral.

Tabela 6 - Exigência de tensão mínima para certa potência (COPEL/Resolução nº 456/2000 da ANEEL) (LACTEC, 2007).

Potência [MW]	Tensão mínima [kV]
2,5	13,8
15	34,5
67	69
120	138

Um exame do sistema de distribuição elétrica e o diálogo com a concessionária local irá indicar se uma conexão elétrica ao sítio proposto será tecnicamente e comercialmente viável. Para uma primeira orientação sobre os possíveis pontos de conexão mais próximos da usina, podem ser consultados diretamente os mapas da rede básica do SIN disponibilizados pela em formato SIG pelo portal SIGEL da ANEEL ou tentar o contato com a concessionária de energia local para verificar a disponibilidade de mapas da rede elétrica da sua área de atuação.

A conexão a rede elétrica de transmissão é uma questão importante e fundamental para viabilizar o desenvolvimento da energia eólica. No Brasil, atualmente existem três possibilidades de conexão oferecida ao empreendedor dentro do contexto dos leilões de compra de energia (PORRUA, *et al.*, 2010):

- A conexão a rede de distribuição (MV) mais próxima, sujeita a capacidade da distribuidora de absorver essa conexão. Isso feito por ordem de solicitação, o primeiro a solicitar a conexão é o primeiro a receber.
- A conexão a subestação da rede básica (HV) mais próxima, sujeita a capacidade da subestação de absorver a conexão. A grande diferença em relação à opção anterior é que o planejamento da rede básica é centralizado é desse modo os procedimentos para conexão a rede são mais conhecidos e uniformes e as informações sobre a rede básica estão prontamente disponíveis.
- A conexão compartilha com uma subestação coletora da alta tensão por meio das ICG<sup>26</sup> no âmbito dos leilões de compra energia. O governo liberou algumas subestações coletoras de HV compartilhadas baseado no agrupamento de projetos

68

<sup>26</sup> Instalações de Transmissão de Interesse Exclusivo de Centrais de Geração para Conexão Compartilhada

candidatos de acordo com a sua distribuição geográfica, através das quais as usinas são conectadas a rede básica.

No modelo atual de leilões de compra de energia realizados pelo governo o investidor deve apresentar aprovação de acesso à rede emitida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), no caso de conexão a rede básica, ou pela concessionária de distribuição local, para conexão a níveis de tensão abaixo de 138 kV.

A definição do traçado de uma linha de transmissão (LT) é um problema tão complexo como a localização do parque eólico, sendo a construção da linha de transmissão também sujeita a avaliação de impactos ambientais específicos. Desse modo, a definição de um trajeto de LT está sujeita diversas restrições como acidentes geográficos, unidades conservação, áreas militares, habitações entre outros, o que pode causar grandes desvios do trajeto ou até inviabilizar a ligação do ponto de vista técnico e/ou econômico. Assim, a questão da conexão a rede se apresenta também como um problema espacial multicritério de decisão.

A conexão a rede é um fator importante, não só do ponto de vista econômico como também físico que depende de uma série de fatores, e será considerado no modelo de localização de sítios eólicos proposto. O critério mais adequado para tratar o problema de conexão de parques eólicos à rede elétrica seria baseado no método de caminho de mínimo custo (*Least Cost Path – LCP*). O procedimento LCP é usado para identificar caminhos ótimos baseado em critérios definidos pelo usuário e tem sido usado extensivamente em aplicações SIG para a localização de corredores e trajetos. O procedimento fundamental compreende três etapas (BERRY, 2007):

- 1. Desenvolver uma superfície de custos ou fricção que indica a preferência relativa para a definição de rotas para todos os locais na área de estudo
- Gerar uma superfície de custo acumulada caracterizando a conectividade ótima de um local inicial (que pode ser um ponto, linha ou polígono) para todos os outros locais baseada nas preferências relativas dos tomadores de decisão.
- 3. Identificar o caminho de menor resistência de um local de destino desejado ao longo da superfície acumulada.

A partir da geração das superfícies de custo acumulado em relação aos possíveis pontos de conexão a rede é possível avaliar o menor custo de conexão do sítio identificado a uma subestação ou saber se existe conectividade com pelo menos um ponto de conexão apropriado considerando as restrições definidas.

Ferramentas de cálculo da distância de custo em função de um mapa de custo fazem parte do módulo de análise espacial do programa comercial ArcGIS e também existem em outros aplicativos SIG.

#### 2.5.4 Acessibilidade

Durante a inspeção em campo o acesso que liga a rodovia mais próxima até o sítio precisa ser documentado detalhadamente. Vias em mau estado de conservação, trechos estreitados, pontes e passagens sobre riachos podem não ser adequados para o transporte pesado, como caminhões e guindastes, inviabilizando ou encarecendo os custos com infraestrutura (LACTEC, 2007).

Além disso, devem ser consideradas as inclinações de subidas e descidas críticas para o transporte pesado. As inclinações de 12% para asfalto/concreto, 6% para pedregulho e 2,5% para estradas de chão podem ser consideradas como valores críticos (LACTEC, 2007).

O critério de acessibilidade proposto nesse trabalho procura avaliar o custo em função da distância da rodovia mais próxima levando em consideração as condições do terreno e obstáculos no trajeto. O procedimento de caminho de custo mínimo proposto para avaliar a conexão á rede também será usado para avaliar a acessibilidade, considerando principalmente o conceito de conectividade.

#### 2.5.5 Ocupação e uso da terra

É importante que exista compatibilidade da ocupação e uso da terra com a energia eólica. Locais onde existem atividades econômicas que não influenciem demasiadamente no comportamento dos ventos, como a pecuária e certos tipos de agricultura, são os mais adequados, pois nesses casos se torna mais fácil a obtenção de licença ambiental uma vez que o local já está sendo explorado comercialmente (SÁ e DUTRA, 2011).

Conforme foi discutido anteriormente, dificilmente as informações de ocupação e uso da terra encontram-se atualizadas e na resolução adequada identificação de sítios eólicos. Para obtenção desse tipo de informação a visita ao local é fundamental.

Nesse caso também poderia ser feita uma reclassificação dos mapas disponíveis de ocupação e uso da terra considerando a compatibilidade da ocupação ou atividade desenvolvida no local com a implantação de parques eólicos.

## 2.6 Considerações finais

Nesse capítulo foram identificados critérios de avaliação para a localização de sítios eólicos promissores com base na literatura internacional e práticas empregadas, e levando em consideração as informações disponíveis. O propósito dessa avaliação é identificar locais promissores e definir restrições técnicas, comerciais e ambientais a fim de que somente os locais mais apropriados sejam selecionados para o desenvolvimento.

Além de restrições físicas impostas, um conjunto de restrições é definido a fim minimizar os impactos locais negativos sobre outros usos da terra associados à energia eólica. O objetivo dessas restrições é garantir que a localização do parque eólico seja adequada e, desse modo, o risco de objeção ou impedimento à sua implantação possa ser reduzido ou evitado.

A viabilidade econômica de um parque eólico depende principalmente do recurso eólico disponível, que por sua vez pode variar bastante em função da localização geográfica. Portanto, a existência de recurso eólico adequado no local é o fator crítico e mais importante para localização de um parque eólico.

Na falta de informações adequadas sobre o recurso eólico no local, indicadores topográficos podem ser utilizados para avaliar a pré-disposição do local ao aproveitamento da energia eólica. A aplicação de técnicas de *análise espacial* e de *modelagem de superfície* permite extrair medidas derivadas do DEM que são úteis ao contexto de tomada de decisão. A partir de medidas objetivas do relevo é possível avaliar o quanto o terreno atende aos

critérios espaciais favoráveis para a energia eólica como nível de exposição e complexidade do terreno.

Outros fatores técnico-econômicos que influenciam diretamente a localização de um parque eólico são: área disponível para o desenvolvimento, conexão à rede elétrica para o despacho e comercialização da energia, acesso ao local para a construção e a ocupação e uso da terra compatível.

# 3 Metodologia

Na seção anterior foram identificados e discutidos os principais fatores que influenciam a localização de um parque eólico. Foram apresentadas também as práticas internacionais consagradas para o desenvolvimento de empreendimentos eólicos e metodologias e práticas utilizadas no Brasil para a prospecção de sítios eólicos. Baseados nos fatores de influência identificados e nas práticas utilizadas para seleção de sítios eólicos foram definidos os critérios que serão considerados no problema de localização de sítios eólicos.

## 3.1 O problema de localização de sítios eólicos

Problemas de tomada decisão como a localização de sítios envolvem três passos: identificação de alternativas, avaliação de alternativas, e por último a escolha de uma alternativa. Em problemas onde existe um número limitado de alternativas, esses três passos são distintos, mas quando existem muitas alternativas viáveis esses passos são combinados implicitamente em um único problema de busca (BROOKES, 1997).

Muitos problemas espaciais podem ser resolvidos utilizando técnicas baseadas em mapas de adequação. A cada unidade espacial de um mapa de adequação é atribuída um valor que representa uma medida da sua adequação a algum propósito. Em problemas espaciais com muitas restrições, técnicas tradicionais de sobreposição de mapas (Boolean overlay) em SIG podem ser utilizadas para mascarar as áreas inadequadas e assim reduzir o número de alternativas que serão avaliadas e comparadas usando métodos de decisão multicritério.

Em aplicações de localização de parques eólicos o uso de modelos espaciais de dados *raster* é mais apropriado do que dados vetoriais, pois alguns dos atributos considerados são de natureza contínua como modelos de elevação digital e mapas de vento.

Os *mapas raster de adequação* são soluções simples e práticas que ajudam a reduzir a área de busca, mas o seu uso para localização de sítios é problemática quando o tamanho

do sítio é maior que a célula da grade. Células individuais não são soluções para o problema porque não satisfazem a restrição de tamanho. Nesse caso, um sítio candidato compreende um grupo de células contíguas que atende ambos os critérios espaciais e não espaciais ou intrínsecos. Quando o tamanho do sítio é muito maior do que a célula, a forma passa a se tornar um critério significativo. O espaço de busca para esse problema é grande e complexo, pois existem muitas alternativas de agrupamento de células e pequenas mudanças no tamanho, localização ou configuração de agrupamento pode afetar bastante a utilidade do sítio (BROOKES, 1997). Cova e Church (2000b) destacam que na literatura essa classe de problemas é conhecida por uma variedade de nomes incluindo seleção de sítios, aquisição de terra, alocação de terra e alocação de sítio, entretanto definem essa classe de problemas genericamente como busca de sítio (site search) procurando enfatizar que não existe um conjunto predeterminado de sítios candidatos nesses problemas. Nesse trabalho o termo genérico busca de sítio será usado para denominar essa classe de problemas.

Os métodos computacionais usados para tratar problemas de localização podem ser separados em duas classes dependendo se o objetivo é identificar explicitamente a fronteira do melhor sítio ou identificar áreas nas quais bons sítios podem existir (COVA e CHURCH, 2000b). A primeira classe de problemas se baseia em métodos de programação matemática (SHIRABE, 2005) (WILLIAMS, 2002)(WRIGHT, et al., 1983) ou métodos heurísticos (BROOKES, 1997)(CHURCH, et al., 2003) (XIAO, 2006) (XIAO, et al., 2002) enquanto a segunda classe se baseia em métodos de análise espacial usando técnicas de sobreposição de mapas. A Figura 13 ilustra uma classificação simples desses métodos.

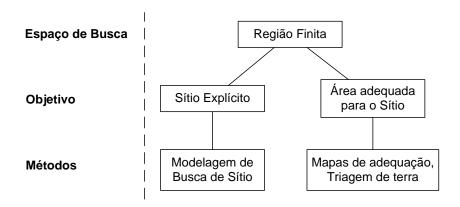


Figura 13 - Uma classificação simples dos métodos computacionais existentes para busca de sítios (COVA e CHURCH, 2000b).

A seguir é feita uma revisão de estudos e modelos baseados em SIG utilizados para a localização de parques eólicos e de métodos e abordagens utilizados no problema de busca de sítios, no qual a área da solução desejada é maior do que a unidade espacial do modelo de dados utilizado e compreende um grupo de unidades espaciais. Por fim, a metodologia proposta para identificação de sítios eólicos promissores é apresentada.

# 3.2 Modelos de SIG-AMD para a localização de parques eólicos

Problemas de decisão espacial geralmente envolvem um grande número de alternativas e critérios de avaliação múltiplos e conflitantes, que muitas vezes são incomparáveis. Nesse tipo problema, o processo de tomada de decisão envolve um grupo de indivíduos que possuem preferências específicas em relação à importância de cada critério usado para avaliar as alternativas. Nesse contexto, muitos problemas de decisão espacial dão origem a métodos de análise multicritério de decisão baseados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG-AMD) (MALCZEWSKI, 2006).

Os SIG possuem a capacidade de visualizar, manipular e simular diferentes cenários, restrições físicas, econômicas e ambientais. Consequentemente, SIGs podem desempenhar um papel fundamental como uma ferramenta de suporte a decisão para localização ótima de parques eólicos, na medida em que permitem reunir e analisar dados

de diferentes fontes (BABAN e PARRY, 2001). Por outro lado, métodos AMD fornecem uma vasta coleção de procedimentos e técnicas para auxiliar a estruturação de problemas de decisão e geração, avaliação e priorização de alternativas (MALCZEWSKI, 2006).

A abordagem de SIG-AMD mais utilizada na literatura se baseia no método de combinação linear ponderada ou soma ponderada simples (Weighted Linear Combination – WLC ou Simple Additive Weighting – SAW). O WLC é normalmente combinado com operações Booleanas (MALCZEWSKI, 2006).

O WLC é um dos modelos mais básicos de métodos de decisão multicritério (MDMC). O modelo geral de MDMC se baseia na geração de um conjunto discreto de alternativas, a formulação do conjunto de critérios, e a avaliação do impacto de cada alternativa em relação a todos os critérios. Os impactos estimados de cada alternativa sobre todos os critérios, chamado de avaliação do critério, é organizado em uma matriz de decisão C (JANKOWSKI, 1995):

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{I1} & \cdots & c_{II} \end{bmatrix}$$
 (5)

Onde:

 $c_{JI}$  é a avaliação do critério;

J representa os critérios; e

*I* representa as alternativas.

Dependendo da técnica MDMC, os critérios podem ser agregados no formato não padronizado ou no formato padronizado. Existem vários procedimentos lineares e não lineares de padronização que normalizam as avaliações do critério de forma que  $0 \le c_{II} \le 1$ .

Além das avaliações do critério existem as preferências dos tomadores de decisão. As preferências podem ser formuladas levando se em consideração as avaliações das alternativas em relação ao critério a partir da definição de valores de corte ou de níveis de aspiração desejados. Podem também ser formuladas em relação aos critérios de decisão na

forma de um vetor cardinal de pesos de preferências de critérios normalizados *w* onde (JANKOWSKI, 1995):

$$w = (w_1, w_2, ..., w_J), \quad e \quad 0 \leq w_J \leq 1$$
 (6)

Os critérios e preferências são então processados usando uma ou múltiplas funções de agregação o que retorna como solução:

- 1. Uma alternativa recomendada;
- 2. Um grupo reduzido das melhores alternativas encontradas; e
- 3. A ordenação das alternativas da melhor para a pior.

O WLC é uma técnica de MDMC compensatória, ou seja, existe o pressuposto de que o alto desempenho alcançado em um ou mais critérios pode compensar o baixo desempenho em outro critério. Para que isso seja possível, as avaliações das alternativas sobre cada critério são padronizadas de modo que a compensação entre critérios seja possível e que permita a comparação do desempenho da alternativa sobre uma escala comum (JANKOWSKI, 1995).

Portanto, no WLC as avaliações das alternativas sobre cada critério são normalizadas e combinadas com os pesos que representam as preferências definidas pelos tomadores de decisão sobre cada critério usando uma soma ponderada que pode ser representada pela notação matricial:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{J1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{1I} & \cdots & c_{II} \end{bmatrix} \mathbf{x} \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_I \end{bmatrix}$$

$$(7)$$

onde  $s_I$  é a avaliação geral da alternativa I, e a matriz de avaliações dos critérios é a matriz transposta da matriz de decisão C.

Esse método normalmente é aplicado em análises de adequação ou uso da terra, seleção de sítios, e problemas de avaliação de recursos. A grande popularidade do WLC está associada ao fato de que o método é facilmente programado dentro do ambiente SIG usando operações de álgebra de mapas e modelagem cartográfica. O método é também de fácil entendimento e intuitivamente atrativo para os tomadores de decisão (MALCZEWSKI, 2000).

Entretanto, apesar da sua formulação matemática simples e de fácil entendimento, no WLC existe uma série de pressupostos do método que frequentemente são ignorados ou desconhecidos pelo analista e não são levados em consideração em aplicações SIG. Além disso, o método é frequentemente aplicado sem um entendimento completo do significado de dois elementos críticos do WLC: os pesos atribuídos aos mapas de atributos e o procedimento usado para a geração de mapas de atributo comparáveis (MALCZEWSKI, 2000). Malczewski (2000) apresenta um resumo crítico das práticas usadas em aplicações do método WLC em SIG e sugere melhores abordagens práticas.

O WLC parte do pressuposto de que todos os critérios são comparáveis e todas as alternativas tem uma avaliação geral, mas em problemas reais nem sempre isso acontece. Alguns impactos de alternativas sobre determinado critério são considerados inaceitáveis, como por exemplo, um aerogerador não pode ser instalado em uma área alagada ou no centro de uma cidade. Esses tipos de critérios são chamados de restrições e contribuem para redução do número de alternativas.

Desse modo o WLC normalmente é combinado com métodos MDMC não compensatórios. O método desse tipo mais utilizado é o *Conjuntivo*, no qual cada critério possui um valor de corte mínimo ou classe indesejada especificada pelo tomador de decisão. As alternativas que não atenderem a essas restrições em todos os critérios de avaliação são eliminadas (JANKOWSKI, 1995). Esses métodos são programados em SIG usando operações *Booleanas*.

As aplicações de SIG-AMD podem utilizar modelos de dados espaciais em formato raster ou vetorial (Figura 14). No caso das aplicações na área de energia eólica, onde são consideradas variáveis contínuas no espaço como a elevação do relevo ou a distribuição do vento, o modelo raster é considerado a representação mais adequada. Assim o problema espacial é estruturado de modo que cada critério ou atributo considerado é representado por um mapa raster e cada célula no mapa corresponde a uma alternativa da solução. Como regra geral, a resolução utilizada na análise corresponde à maior resolução encontrada nos mapas utilizados.

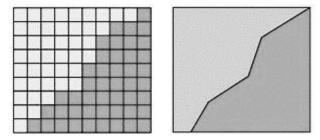


Figura 14 - Representação espacial em formato raster (esquerda) e formato vetorial (direita).

A maioria das aplicações SIG na área de energia eólica é voltada para solução de problemas de localização ou para a avaliação de recursos eólicos. Os exemplos mais comuns são aplicações para estudos de localização de parques eólicos (DOMÍNGUEZ e AMADOR, 2007). Domínguez e Amador (2007) citam o trabalho de Petit (1995) como um dos projetos pioneeiros nesse área. O propósito desse estudo de planejamento de parques eólicos na região de Nord-Pas-de-Calais na França era inventariar as áreas com os melhores ventos para o desenvolvimento de parques eólico. O estudo também considerou restrições naturais e humanas.

Sparkes e Kidner (1996) desenvolveram um sistema SIG para avaliar impactos ambientais de parques eólicos exigidos por um estudo de impacto ambiental no Reino Unido. O propósito de sistema era quantificar e qualificar o impacto visual baseado em técnicas de análise de visibilidade usando um modelo digital de elevação, fotomontagens do futuro parque eólico em relação a determinados pontos de vista e uma visualização 3D isométrica da projeção do mapa resultante da análise de visibilidade sobre o modelo de relevo.

Além disso, foi programado também na aplicação SIG um modelo de localização de parques eólicos baseado em uma série de restrições levantadas com base no guia de "boas práticas" para o desenvolvimento de parques eólicos da BWEA (1994). O modelo utilizava distâncias de separação mínima definidas para diversos tipos de uso da terra. Além disso, previa também uma restrição em relação à altitude mínima do local (que deveria apresentar elevações superiores a 100 metros) baseado na premissa de que as velocidades de vento eram geralmente maiores em terrenos mais altos, enquanto que os principais centros de população e áreas de turismo tendiam a ser localizados dentro dos planos costeiros do País de Gales. Ao final da análise um mapa de adequação era gerado. Por fim, o usuário podia definir uma restrição espacial de área para excluir os agrupamentos com áreas inferiores a

um valor de corte removendo dessa forma as áreas consideradas inadequadas para implantação de um parque eólico de determinado tamanho.

Baban e Parry (2001) propuseram um modelo de localização de parques eólicos no Reino Unido assistido por SIG. Na época, era prevista uma expansão substancial da energia eólica no Reino Unido baseada nas metas definidas pela União Europeia. Os autores previam que esse crescimento inevitavelmente seria acompanhado por conflitos e restrições de planejamento e ambientais. Nesse contexto, o estudo procurou identificar e entender os fatores necessários para a determinação de um sítio adequado para implantação de um parque eólico no Reino Unido a fim de desenvolver critérios para a localização de parques eólicos assistida por um SIG simplificado.

Para a identificação dos critérios de localização pertinentes um questionário foi elaborado e direcionado a autoridades locais e empresas de energia eólica no Reino Unido. Baseado na literatura e nos resultados obtidos dos questionários, critérios específicos de localização foram desenvolvidos. Os critérios reuniam diversos fatores restritivos e eram divididos nas categorias: *física*, *planejamento*, *econômica*, *ambiental* ou *recurso* (Tabela 7). Os dados necessários para criar os mapas referentes a cada critério foram obtidos. Os mapas foram importados para o SIG e em seguida foram feitas a alocação de pesos para cada camada e a associação de diferentes avaliações para cada atributo dentro das camadas usando métodos de reclassificação de geração de buffers.

Tabela 7 - Critérios de restrição de localização de parques eólicos(BABAN e PARRY, 2001).

#	Critério	Fator de restrição	Consideração
1	Evitar cumes de grandes morros	Topografia	Física
2	Possuir uma gradiente de inclinação menor que 10%	Topografia	_
3	Possuir uma orientação oeste	Direção do vento	_
4	Possuir uma velocidade de vento maior que 5 m/s	Velocidade do	_
	1 ossur uma verocidade de vento maior que 5 m/s	vento	_
5	Estar localizado a uma distância superior a 500 m de	Cobertura e uso do	
	florestas	solo	
6	Estar localizado a uma distância superior a 2000 m de	População	Planejamento
	grandes povoados	1 Opulação	_
7	Estar localizado a uma distância superior a 500 m de	População	
	habitações individuais	1 Opulação	
8	Estar localizado a uma distância inferior a 10 km de	Acesso	Econômica
	rodovias	Acciso	_
9	Estar localizado a uma distância inferior a 10 km da	Economia	
	rede elétrica nacional	Leonomia	
10	Estar localizado a uma distância superior a 400 m de	Hidrologia	Ambiental

#	Critério	Fator de restrição	Consideração
	corpos d'água		
11	Estar localizado a uma distância superior a 1.000 m de áreas de valor ecológico ou de interesse científico	Ecologia	
	especial	C	
12	Estar localizado a uma distância superior a 1.000 m de	Patrimônio histórico	Recurso
12	locais históricos	e cultural	
13	Estar localizado a uma distância superior a 1.000 m de	Patrimônio histórico	
13	propriedades de patrimônio histórico e cultural	e cultural	
14	Evitar ocupar terras agrícolas de classe 1 e classe 2	Recurso	

Baban e Parry (2001) usaram um método baseado em regras de decisão que permitia a compensação entre os critérios sem considerar nenhuma restrição absoluta, ou seja, sem a exclusão direta de áreas. As alternativas eram avaliadas para cada critério em função dos seus atributos em uma escala que variava de 0 a 10, onde 0 representava localidades ideais e 10 localidades inadequadas. A cada critério era atribuído um peso relativo à sua importância na decisão. A função de agregação utilizada era baseada na soma das avaliações dos critérios ponderada pelos pesos associados o que resultava em uma avaliação final para cada alternativa. O resultado final era um mapa de adequação que indicava áreas adequadas à implantação de parques eólicos, onde em uma escala de 0 (ideal) a 10 (inadequado) (Figura 15).

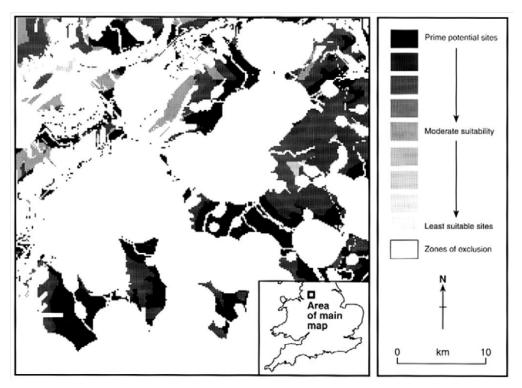


Figura 15 - Mapa de adequação para localização de Parques Eólicos (BABAN e PARRY, 2001).

Foi feita uma análise de sensibilidade considerando dois cenários: todos os critérios com pesos iguais e pesos específicos para cada grupo de critérios classificados em quatro níveis de significância. Os pesos para cada grupo foram alocados usando um método baseado na comparação par a par, criando uma matriz e extraindo os autovalores. Esse método de atribuição de pesos se baseia no MDMC AHP (*Analytic Hierarchy Process*) desenvolvido por Saaty (1980).

Nesse estudo o recurso eólico disponível foi identificado como uma restrição considerando um valor de corte para a velocidade do vento no local, mas não foi aplicado na análise (vide Tabela 7). Foram considerados aspectos topográficos como declividade e orientação do relevo e também critérios econômicos onde eram atribuídos valores de desempenho para certos tipos de atividade agrícola e faixas de distâncias de rodovias.

Baban (2004) aplicou o mesmo modelo de localização de parques eólicos desenvolvido para o Reino Unido em um estudo de caso em Trinidad e Tobago na região do Caribe. O foco principal do estudo foi apresentar uma metodologia para lidar com a pobreza da informação disponível sobre a região e mapear as localidades ideais para localização de parques eólicos na região do Caribe usando Trinidad e Tobago como um

estudo de caso. A métodologia proposta se baseava no uso de técnicas de geoinformática que envolvem a utilização de tecnologias de ponta disponíveis e confiáveis como sensoriamento remoto por satelites, sistema de posicionamento global (GPS) e sistemas de informação geográfica para gerar, desenvolver, complementar, gerenciar e analisar o conjunto de dados necessários para localização de parques eólicos no Caribe.

Dunsford *et al.* (2003) desenvolveram um SIG Regional para suportar o desenvolvimento estratégico de energias renováveis na região Nordeste da Inglaterra. O SIG Regional foi desenvolvido para ser usado em atividades de planejamento estratégico de energia renováveis na região e no suporte a autoridades de planejamento em resposta a pedidos de construção e a interesses dos empreendedores.

O SIG Regional se baseia em um modelo cartográfico composto por mapas de informações topográficas, infraestrutura, demográficas entre outras, com o propósito de gerar e testar opções para localização de parques eólicos em terra. Como o estudo é de caráter estratégico, critérios técnicos e econômicos como propriedade, acesso ao local e declividade não são considerados.

O modelo do SIG Regional é divido em três categorias de informação: modelo de restrições SIG (restrição), análise de visibilidade (fator) e avaliação de caráter da paisagem (fator) (Figura 16). Os critérios considerados como *restrições* impõem restrições absolutas sobre a localização, enquanto os *fatores* impõem restrições relativas em uma escala que vai da condição mais preferida a menos preferida. A Tabela 8 apresenta a lista de dados compilados para o modelo de Restrições SIG.

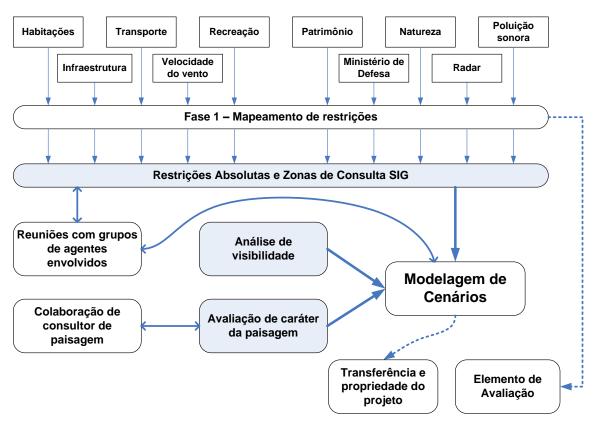


Figura 16 - Diagrama do SIG Regional da região NE da Inglaterra com as categorias de informação (modelos) destacadas pelos blocos em azul claro (DUNSFORD, *et al.*, 2003).

Tabela 8 - Lista de dados compilados para o modelo de Restrições SIG (DUNSFORD, et al., 2003).

Categories	Criteria	Туре	Source	Parameters	Constraint
Cultural Heritage	Historic Parks, Gardens and Battlefields	Polygon	ЕН	700m Buffer	Absolute
	Listed Buildings	Point	LA	Footprint	Absolute
	Greenbelt	Polygon	ODPM & LA	Footprint	Consultation
	World Heritage Sites	Polygon	EH	700m Buffer	Absolute
	World Heritage Sites	Polygon	EH	10000m	Consultation
Landscape	AONB	Polygon	CA	Footprint	Absolute
	Heritage Coast	Polygon	EH	Footprint	Absolute
	National Park	Polygon	CA	Footprint	Absolute
MOD	Low Flying Area 20	Polygon	AS & CESA	Footprint	Constraint
	Low Flying Area 13	Polygon	AS & CESA	Footprint	Consultation
Nature	SPA	Polygon	EN	Footprint	Absolute
conservation	RSPB	Polygon	RSPB	800m Buffer	Absolute
	SAC	Polygon	EN	Footprint	Absolute
	SSSI	Polygon	EN	Footprint	Absolute
	RAMSAR	Polygon	EN	Footprint	Absolute
	AW	Polygon	EN	Footprint	Absolute
Radar*	Newcastle Airport	Polygon	AS & CESA	Viewshed	Absolute
	Teeside Airport	Polygon	AS & CESA	Viewshed	Absolute
	Brizlee Wood	Polygon	AS & CESA	Viewshed	Absolute
	Fylingdales	Polygon	AS & CESA	Viewshed	Absolute
	Dun Fell	Polygon	AS & CESA	Viewshed	Absolute
Safety/Topple	Motorways	Line	OSCAR	150m Buffer	Absolute
distance	A roads	Line	OSCAR	150m Buffer	Absolute
	B Roads	Line	OSCAR	150m Buffer	Consultation
	Railways	Line	OS Strategi	150m Buffer	Absolute
	Electricity pylons	Line	TNGC plc	150m Buffer	Absolute
Windspeed	ETSU Windspeed	Polygon	DTI	>=6.4m/s	Absolute
Visual Amenity / Noise	Residential properties	Point	OS Address Point	400m Buffer	Absolute
,	Residential properties	Point	OS Address Point	700m Buffer	Absolute
Woodland AONB: Areas Beauty CA: Countrys DTI: Departn	d (AW): Ancient of Outstanding Natural	ETSU:  LA: Local Authorities  RAMSAR: wetlands  RSPB: Royal Society for the Protection of Birds  SAC: Special Areas of Conservation  SPA: Special Protection areas  SSSI: Sites of Special Scientific Interest  TNGC plc: The National Grid Company plc			
Industry EH: English H		Coverage not Complete for GONE area			

Conforme pode ser visto na Tabela 8, existem três tipos de parâmetros considerados: "presença" (footprint), buffers, e área de visibilidade (viewshed). "Presença"

EN: English Nature

descreve a localização real do fator ou restrição dentro da paisagem, *buffer* faz referência à área localizada dentro de uma distância específica da localização do objeto, e área de visibilidade corresponde à região vista da localização do objeto calculada a partir de um modelo de elevação digital, localização e altura do observador, altura dos objetos que se deseja ver (no caso um aerogerador) e do limite de distância (limite a partir do qual a visibilidade não é mais calculada). Dunsford *et al.* (2003) apresentam uma explicação detalhada de como é feito o cálculo de área de visibilidade e realizada a análise visibilidade do modelo. A operação *Buffer* é bastante comum em sistemas SIG e para a análise da área de visibilidade existe a função denominada *Viewshed* existente em alguns módulos de análise espacial de programas comerciais como o *ArcGIS* da empresa *Esri*.

Benson *et al.* (2003) descrevem a metodologia utilizada para a avaliação de caráter da paisagem utilizado no modelo que consiste basicamente na avaliação da sensibilidade da paisagem em relação a empreendimentos eólicos e a capacidade de parques eólicos que ela pode suportar sem que isso altere fundamentalmente suas características originais (vide Seção 2.2.1).

O SIG Regional produz três tipos de mapas que podem ser combinados para a análise de diferentes cenários (Figura 17).

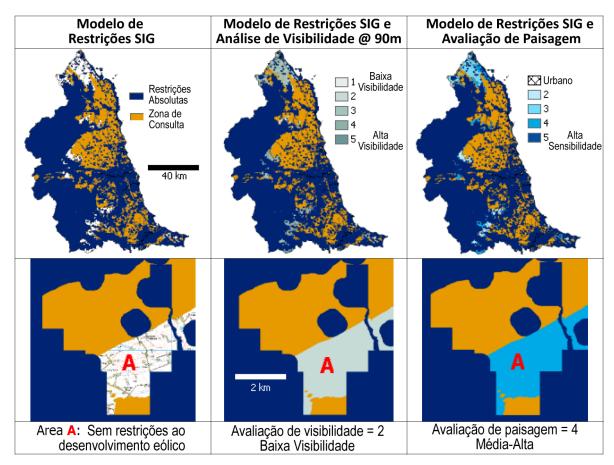


Figura 17 - Exemplo de cenário de modelagem usando o SIG Regional do NE da Inglaterra (DUNSFORD, et al., 2003).

O modelo de Restrições GIS gera um mapa de adequabilidade com três classes:

- Restrições absolutas: inviabiliza a implantação de parques eólicos;
- Zonas de consulta: permite a implantação de parques eólicos com restrições que devem ser avalizadas com as autoridades relevantes; e
- Sem restrições: não existem impedimentos para implantação de parques eólicos.

Os modelos de análise de visibilidade e avaliação de caráter da paisagem permitem ter uma noção geral do impacto visual e sobre a paisagem associado ao local, que é uma das principais causas de objeção à implantação de parques eólicos na Inglaterra e Europa em geral. É importante destacar que os resultados dessa análise são passados ao empreendedor que deverá escolher a localização do parque eólico e realizar a avaliação de impacto ambiental exigida no local. A grande vantagem desse processo é que o empreendedor tem mais segurança na escolha do local e obtém mais informações sobre as prováveis restrições

que serão encontradas. Além disso, o uso da informação de velocidade média do vento como restrição já orienta o empreendedor para áreas promissoras.

DEADP (2006) apresenta a metodologia proposta para a seleção de sítios estratégicos para implantação de parques eólicos na província de Cabo Oeste da África do Sul a fim de preservar a qualidade da paisagem enquanto promove o desenvolvimento da energia eólica na região. Na ocasião, existia o reconhecimento de que a presença de parques eólicos se tornaria uma característica da região e, portanto métodos de avaliação deveriam ser desenvolvidos para planejar e avaliar o desenvolvimento da energia eólica na província. A metodologia proposta seria utilizada para auxiliar na elaboração de um planejamento estratégico regional onde seriam consideradas áreas específicas para o desenvolvimento da energia eólica.

A metodologia foi desenvolvida a partir da identificação de critérios e abordagens utilizados internacionalmente que serviram como ponto de partida para seleção dos métodos de avaliação adaptados ao contexto local. O método regional para análise de adequação de parques eólicos era composto por modelos de restrições SIG, análise de visibilidade e avaliação da paisagem. A metodologia regional proposta possuía elementos em comum ao modelo SIG Regional de Dunsford *et al.* (2003), mas existiam algumas diferenças na sua implementação.

Os critérios de restrição foram agrupados em ambiental, planejamento, infraestrutura e cultural, e posteriormente mapas de restrição foram gerados aplicando se limites aos atributos de cada critério. Os mapas de restrição resultantes podiam ser considerados como impactos positivos ou negativos. Os resultados da análise de visibilidade e avaliação da paisagem foram combinados em um único mapa onde as possíveis combinações de pares de atributos de cada um dos mapas originais foram avaliadas como positiva, neutra ou negativa (Figura 18). Em seguida, todos os mapas gerados eram combinados de forma que os locais onde existiam critérios negativos foram classificados como áreas restritas ou altamente restritas e os locais com a presença de critérios positivos resultavam em áreas preferíveis ou altamente preferíveis. Entretanto a presença de qualquer critério negativo resultava em restrição independente do número de critérios positivos. Por fim, uma análise dos efeitos cumulativos de parques eólicos em

relação ao impacto visual era realizada sobre o mapa resultante. Nessa análise parques eólicos de um determinado tamanho eram distribuídos pelo mapa até ocupar todas as áreas disponíveis mantendo uma distância mínima de 30 km entre eles a fim de avaliar a capacidade de instalação de parques eólicos na região e, assim mitigar o impacto visual cumulativo. Essa análise era realizada para diferentes tamanhos de parque eólico.

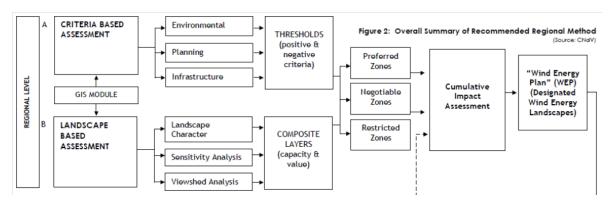


Figura 18 - Diagrama do método regional de análise de adequação de parque eólicos desenvolvido pelo Governo da Cidade do Cabo na África do Sul (DEADP, 2006).

No modelo de restrições foram incluídos dois critérios topográficos: altura máxima de 25 metros sobre a topografia local e distância mínima de 500 metros de linhas de cumeeira. O critério da altura máxima sobre a topografia não foi considerado na análise por falta de informações confiáveis sobre relevo. As linhas de cumeeira foram desenhadas manualmente para a aplicação do critério de distância mínima. Na ocasião do estudo não existiam estudos de inventário do recurso eólico na região e, portanto o critério de velocidade do vento não foi considerado.

Houve também uma preocupação extra em relação a zonas de confluência provavelmente associada com características específicas da região. Eram consideradas as áreas de captação de água das montanhas e distâncias de linhas de inundações de rios que ocorrem a cada 1 em 100 anos. Porém, nesse caso também esses dois critérios foram descartados por falta de dados confiáveis.

Hansen (2005) propõe o desenvolvimento de uma ferramenta de avaliação multicritério que permita analisar as complexas relações de troca entre as alternativas de escolha em relação a diferentes impactos ambientais e sócio econômicos. O objetivo final era utilizar os métodos e as ferramentas de análise multicritério desenvolvidos com o propósito de apoiar o planejamento espacial do desenvolvimento da energia eólica na

região do Mar Báltico na Europa para atendimento das metas definidas pela União Europeia dentro do contexto ao protocolo de Kyoto. Os critérios de seleção de sítios foram desenvolvidos com base em entrevistas com planejadores espaciais da região do Mar Báltico. O método de análise multicritério utilizado foi uma modificação do WLC usando lógica fuzzy.

O autor propôs estender os métodos tradicionais de análise multicritério baseados na lógica booleana usando a lógica fuzzy a fim tratar a incerteza e a imprecisão muito características de problemas de decisão espacial complexos como a localização de parques eólicos, onde os dados de entrada costumam ser imprecisos e a definição de limites para as restrições muitas vezes é subjetiva. A principal característica da lógica fuzzy é de agrupar os indivíduos em classes que não possuem limites bem definidos. Assim, os limites definidos para as restrições passam a possuir uma distribuição contínua no espaço variando de 0 a 1, onde 0 identifica os locais inadequados e 1 os locais ideais para localização de sítios. Desse modo, as restrições baseadas em critérios de proximidade passam a ser consideradas como fatores definidos por dois limites de distância: um inferior, abaixo do qual o local é inadequado, e um superior, acima do qual o local é ideal. Os valores intermediários qualificam a pertinência da restrição no local.

No estudo é utilizado o critério de recurso eólico definido pelo limite inferior de 250 W/m² e superior de 400 W/m², sugerindo uma consideração econômica na análise. O mapa eólico usado possuía um formato *raster* com resolução de 250 m, mas a resolução comum usada no estudo foi de 50 m, provavelmente em função da resolução do modelo de elevação utilizado.

Rodman e Meentemeyer (2006) desenvolveram uma ferramenta analítica usando SIG para avaliar a adequação de sítios para implantação de aerogeradores e para predizer a localização e a extensão de terra disponível para o desenvolvimento da energia eólica na região da Califórnia nos Estados Unidos. Os critérios de adequação utilizados eram divididos em fatores físico, ambientais e humanos (Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11).

Tabela 9 – Modelo de adequação de impactos humanos para localização de aerogeradores (RODMAN e MEENTEMEYER, 2006).

Avaliação de adequação	Urbano	Recreação
Excelente (4)	Não urbano	Não parque público
Inadequado	Urbano	Parque público

Tabela 10 – Classes de modelo de adequação físico para velocidade do vento, obstáculos e terreno (RODMAN e MEENTEMEYER, 2006).

	Vel	ocidade do vento (	(m/s)			Distância
Avaliação	Grandes aerogeradores	Pequenos aerog. conectados à rede	Pequenos aerog. isolados	Obstáculos	Vales	da linha de cumeeira (m)
Excelente (4)	> 7	> 4,5	> 3	Sem floresta	0-7°	< 10
Bom (3)				Baixa densidade de floresta	7-16°	10-30
Justo (2)				Média densidade de floresta	16-30°	30-50
Pobre (1)					30-40°	50-100
Inadequado	< 7	< 4,5	< 3	Alta densidade de floresta	> 40°	> 100

Tabela 11 – Modelo de adequação ambiental para localização de aerogeradores (RODMAN e MEENTEMEYER, 2006).

Avaliação de adequação	Cobertura e uso da terra	Espécies de plantas ameaçadas	Pântanos
Excelente (4)	Terras agrícolas ou improdutivas	Sem a presença de espécies ameaçadas	Sem a presença de pântanos
Bom (3)			
Justo (2)	Grama		
Pobre (1)	Arbustos ou chaparral		
Inadequado	Floresta ou pantânos	Presença de espécies ameaçadas	Presença de pantânos

Um modelo baseado em regras de decisão foi desenvolvido para a análise. As alternativas eram classificadas em função dos seus atributos em relação a cada critério em cincos classes de adequação: Inadequada (0), Pobre (1), Justo (2), Bom (3) e Excelente (4). Aos critérios individuais eram atribuídos pesos relativos à sua importância dentro de cada modelo de adequação considerado. Nesse trabalho, assim como em Baban e Parry (2001),

também foi usada como função de agregação a soma das avaliações dos critérios ponderada pelos pesos associados, com a diferença de que caso uma das avaliações fosse 0, a avaliação final atribuída à alternativa seria 0. Cada modelo de adequação era avaliado individualmente resultando em mapa de adequação que variava na escala de 0 a 4. Os modelos de adequação poderiam então ser combinados entre si permitindo que uma análise de sensibilidade pudesse ser realizada e a identificação do impacto de cada fator considerado, que pode tanto apoiar como se opor a implantação de um empreendimento eólico em local específico.

A análise considerou critérios de velocidade do vento para diferentes tipos de aplicação de energia eólica: aerogeradores de grande porte (acima de 7 m/s), aerogeradores de pequeno porte conectados à rede (acima de 4,5 m/s) e isolados (acima de 3 m/s). O critério de relevo incluía informações sobre elevação e declividade. Segundo Rodman e Meentemeyer (2006) as linhas de cumeeira ou outros terrenos mais elevados são geralmente preferíveis para localização de aerogeradores, e vales planos também podem ser adequados se funcionarem como um canal para o vento, em função do efeito de aceleração do vento causada pelo afunilamento do relevo. O critério de relevo recebeu um peso menor em relação aos outros critérios físicos pelo fato da informação do terreno já ter sido computada na geração dos dados de vento. Os critérios de terreno usados para avaliar a adequação do local eram baseados na proximidade de linhas de cumeeira ou na localização em vales relativamente planos. A avaliação de adequação do terreno era baseada na avaliação máxima em relação à linha da cumeeira ou ao vale plano, conforme apresentado na Tabela 10.

Rodman e Meentemeyer (2006) aplicaram o modelo de localização de aerogeradores proposto na área da Baía da Grande São Francisco na Califórnia e fizeram uma verificação dos resultados da análise a partir da comparação com desenvolvimentos de parques eólicos existentes na região (Figura 19). O estudo mostrou três sítios dentro da área da Baía que são considerados adequados para localização de parques eólicos de grande porte e observou que os parques instalados em dois desses locais sofreram muito pouca controvérsia em relação a outros parques de porte semelhante. Entretanto, um dos sítios identificados se refere ao parque eólico de grande porte de *Altamont Pass*, que se trata de um caso famoso na literatura de impactos negativos sobre aves, em particular aves de

rapina. Apesar do parque estar em operação a mais de duas décadas, a oposição continua até o presente devido principalmente a sua localização inadvertida em uma rota de migração de aves o que resultou em uma taxa alta de mortalidade de aves de rapina que é anormal. Nesse sentido, eles sugerem que o modelo de adequação pode ser melhorado pela inclusão de fatores adicionais como a visibilidade dos grandes centros urbanos ou rodovias e a localização de corredores de migração de pássaros.

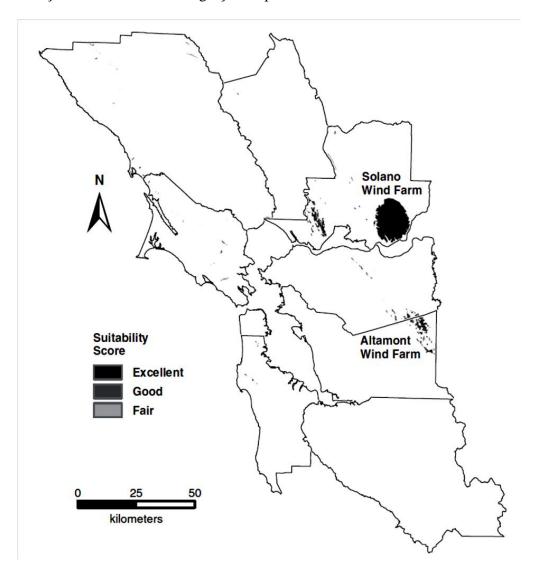


Figura 19 - Modelos físico, ambiental e de impacto humano para avaliação do potencial de implantação de parque eólico de grande porte (RODMAN e MEENTEMEYER, 2006).

O resume da análise dos trabalhos sobre localização de sítios eólicos é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Resumo da revisão bibliográfica dos modelos de localização de parque eólicos.

Fonte	Sparkes e Kidner (1996)	Baban e Parry (2001)	Dunsford et al. (2003)	Baban (2004)	DEADP (2006)	Hansen (2005)	Rodman e Meentemeyer (2006)
Modelo	AIA de parques eólicos	Localização de Parques eólicos no RU	Governo da região NE da Inglaterra	Localização de Parques eólicos no RU	Metodologia Regional do Cabo Oeste	Energia Eólica na região do Mar Báltico	Norte da Califórnia
Localização	País de Gales	Reino Unido	Inglaterra	Trinidad e Tobago	Província de Cabo Oeste da África do Sul	Região do Mar Báltico	EUA
Escala Objetivo	Regional Seleção de locais ideais para parques eólicos considerando restrições ambientais usando buffers de distância	Regional Desenvolver critérios de localização de parques eólicos no Reino unido assistido por um SIG simplificado	Regional Apoiar atividades de planejamento estratégico de energias renováveis na região e no suporte às autoridades de planejamento em resposta a pedidos de construção e a interesses dos empreendedores	Regional Mapear as localidades ideais para localização de parques eólicos na região do Caribe	Regional Seleção de sítios estratégicos para implantação de parque eólico na província de Cabo Oeste da África do Sul	Regional Desenvolver ferramentas de análise multicritério para apoiar o planejamento espacial da energia eólica na região do Mar Báltico	Regional Desenvolver uma ferramenta analítica usando SIG para avaliar a adequação de sítios para implantação de aerogeradores e para predizer as localizações e a extensão de terra disponível para o desenvolvimento da energia eólica na Califórnia.
Modelo de restrição	Social, Ambiental e Física.	Física, de planejamento, econômico, ambiental ou recurso.	Técnica e ambiental	Física, de planejamento, econômico, ambiental ou recurso.	Técnico e ambiental	Física, ambiental, social, infraestrutura e econômica.	Física, ambiental e humana.
Recurso Eólico	Não	Não. > 5 m/s	Sim. > 6,4 m/s	Não. > 5 m/s	Não.	Sim. > 400 W/m2	Sim. Aplicações de grande porte (> 7 m/s), pequeno porte conectados à rede (> 4,5 m/s) e isolados (> 3 m/s).
Aspectos do relevo	Locais acima de 100 m	Ângulo de inclinação < 10%, orientação para oeste, e evitar cumes de grandes morros.	Não	Ângulo de inclinação < 10%, orientação para oeste, e evitar cumes de grandes morros.	Altura máxima sobre a topografia local de 25 m e distância de 500 metros de linhas de cumeeira.	Não	Proximidade a linhas de cumeeira e localização em vales relativamente plano
Conexão a rede	Não	Não	Não	Não	Não.	Não	Não
Acesso ao local	Não	Sim. Distância de rodovias	Não	Sim. Distância de rodovias	Não.	Não	Não
Ocupação e uso do solo	Não	Sim. Tipos de atividades agrícolas	Sim	Sim. Tipos de atividades agrícolas	Sim	Não	Sim
Área disponível	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não	Não
Avaliação da Paisagem	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não
Análise de Visibilidade	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não
Método de análise multicritério	Método Conjuntivo (Boolean Overlay)	Modelo de regras de decisão, com as avaliações do critério variando de 0 (ideal) a 10 (inadequado). Pesos eram atribuídos a cada critério e a soma das avaliações ponderadas pelos pesos dos critérios era realizada	Combinação dos modelos de restrição, Análise de visibilidade, Análise de apreciação da paisagem.	Modelo de regras de decisão, com as avaliações do critério variando de 0 (ideal) a 10 (inadequado). Pesos eram atribuídos a cada critério e a soma das avaliações ponderadas pelos pesos dos critérios era realizada	Combinação dos modelos de restrição e Análise de apreciação da paisagem (incluindo Análise de visibilidade) e o resultado final sujeito a uma análise de avaliação de impactos cumulativos.	WLC usando lógica Fuzzy	Modelo de regras de decisão, com as avaliações do critério variando de 0 (inadequado) a 4 (ideal). Pesos eram atribuídos a cada critério e a soma das avaliações ponderadas pelos pesos dos critérios era realizada, mas caso algum dos critérios fosse 0 era atribuído 0 a avaliação final. O método de decisão era aplicado a cada um dos modelos de adequação resultando em mapa de adequação associado.
Análise de sensibilidade	Não	Sim. Dois cenários com pesos diferentes eram analisados	Sim. Combinações dos diferentes modelos	Sim. Dois cenários com pesos diferentes eram analisados	Sim. Combinações dos diferentes modelos	Não	Sim. Combinações dos diferentes modelos

# 3.3 Abordagens e métodos de busca de sítio

Análises de adequação e triagem de terra (*land screening* ou *Boolean overlay*) são duas abordagens tradicionais utilizadas na identificação de áreas onde um sítio promissor deve existir. Entretanto, esses métodos têm uma capacidade limitada em relação à inclusão de características espaciais de um grupo de unidades espaciais (sítio) no objetivo ou restrição de uma busca. Por exemplo, esses métodos não podem ser utilizados para identificar o sítio eólico mais adequado com uma área disponível de 5 km². Métodos que integram técnicas de otimização espacial e análise baseadas em SIG são mais adequadas para tratar problemas de busca de sítios que utilizam características espaciais explícitas como critério (COVA e CHURCH, 2000b).

Cova e Church (2000b) observam que uma ampla aplicação de métodos de otimização espacial em problemas de busca de sítio não tem sido vista apesar de existirem na literatura diversos modelos propostos. Segundo eles, isso acontece primeiramente devido a complexidade associada à solução desses modelos para problemas com dimensões realistas combinado com a dificuldade de descrever quantitativamente a forma espacial do sítio desejado. A forma é uma característica notoriamente difícil de descrever e quantificar satisfatoriamente em um domínio numérico. Muitas formulações para o problema de busca de sítios já foram propostas utilizando diferentes abordagens para descrição e modelagem da forma do sítio (BROOKES, 1997) (CHURCH, *et al.*, 2003) (COVA e CHURCH, 2000b) (SHIRABE, 2005) (XIAO, 2006) (XIAO, *et al.*, 2002). Wentz (2000) propõe representar numericamente a forma espacial de objetos para aplicações geográficas usando um conjunto de três medidas de forma: borda, perfuração e alongamento.

#### 3.3.1 Contiguidade em busca de sítio

Problemas de busca de sítio podem ser separados em duas classes: contíguos e não contíguos. Um sítio é dito contíguo se é possível caminhar de um ponto a outro sem sair do sítio. Se a propriedade de contiguidade não é exigida em uma busca, então o problema se torna muito mais fácil de modelar e resolver otimamente, na medida em que os elementos que compõe o sítio não estão sujeitos a nenhuma restrição espacial. A simples ordenação das células do modelo *raster* em função da sua adequação permite identificar as N melhores

células que seriam necessárias para atender uma área mínima desejada independente da localização de cada célula no espaço. Entretanto, quando o objetivo é identificar um único sítio contíguo, somente um subconjunto de todas as possíveis combinações de células constitui um sítio viável. Identificar esse subconjunto utilizando métodos de programação matemática tem se mostrado bastante desafiador (COVA e CHURCH, 2000b).

Brookes (1997) descreve um algoritmo simples para identificação de sítios contíguos baseado em um processo iterativo que mascara as células abaixo de um limite. Inicialmente o limite é definido com um valor elevado e em seguida reduzido continuamente até que exista pelo menos um grupo contíguo de células maior que a área desejada. Essa heurística maximiza a adequação mínima da célula de modo que o grupo terá uma utilidade alta em relação ao critério não espacial, mas ignora outros critérios espaciais considerando somente o critério de contiguidade da solução. Brookes (1997) identifica três problemas nesse método: (1) os grupos de células podem ser muito maiores do que o tamanho necessário e, portanto o problema de localização do sítio exato permanece; (2) os grupos podem conter furos; e (3) os grupos podem não atender as características espaciais de forma e compactação desejadas. Em muitas aplicações reais, uma solução viável deve ser compacta e não possuir furos (CHURCH, *et al.*, 2003). Para superar esses problemas, Brookes (1997) propõe um algoritmo genético usando um programa de crescimento de regiões (PCR) para a geração de sítios (grupos de células).

Desse modo, problemas onde a característica espacial é relevante são frequentemente complicados de resolver em função da dificuldade de formular a restrição de contiguidade. Desde a década de 1980, diversas formulações foram propostas e podem ser classificadas conceitualmente em duas abordagens gerais (COVA e CHURCH, 2000b) (XIAO, 2006).

Uma abordagem ao problema de contiguidade se baseia em formular um modelo que encoraja uma solução contígua. Wright *et al.* (1983) propuseram a primeira abordagem de modelagem discreta para um problema de localização de um único sítio, que denominaram de problema de *aquisição de terra*. O modelo encoraja uma solução contígua minimizando simultaneamente o perímetro e o custo do sítio. Esse modelo somente garante uma solução contígua quando o perímetro do sítio é minimizado, já que o relaxamento do

perímetro pode resultar um sítio não contíguo (COVA e CHURCH, 2000b). Essa primeira abordagem representa indiretamente a contiguidade do sítio usando um conjunto de parâmetros que define um sítio compacto (MINOR e JACOBS, 1994) (NALLE, *et al.*, 2002) (AERTS, *et al.*, 2003), ou delimitando o limite inferior de um *buffer* de células que cerca o sítio (WILLIAMS e REVELLE, 1996). Esses métodos, apesar de efetivos, não garantem um sítio contíguo e podem causar também dois problemas: a identificação de soluções inviáveis e alguma das soluções viáveis podem ser excluídas da busca (XIAO, 2006).

A segunda abordagem ao problema de contiguidade é obrigar essa condição através da programação de um algoritmo de solução que garanta uma solução contígua. Nessa abordagem, a propriedade de contiguidade não é formulada no modelo e sim declarada como uma condição necessária da solução. Gilbert *et al.* (1985) e Diamond e Wright (1991) utilizaram uma técnica de enumeração implícita que gerava somente soluções contíguas. Algoritmos de enumeração implícita usam estrutura de árvore binária para enumerar de forma inteligente o espaço de solução pela inclusão e exclusão sistemática de células que podem formar um sítio. Esses métodos garantem a solução ótima para um dado modelo, mas um algoritmo específico deve ser desenvolvido para cada formulação do problema e existem determinados limites em relação ao tamanho do problema que pode ser tratado (COVA e CHURCH, 2000b).

Brookes (1997)(2001) desenvolveu um programa de crescimento de região (PCR) que envolve o crescimento de um sítio a partir de uma célula semente em um mapa *raster* baseado em conjunto de parâmetros (por exemplo, a razão entre o menor e o maior eixo, orientação do maior eixo, número de braços e a relação entre dois critérios de crescimento) garantindo assim a contiguidade da solução. O programa é usado para representar a solução espacial na forma de uma cadeia de números reais em um algoritmo genético aplicado ao problema de alocação de sítio em um mapa de adequação. PCR parte do pressuposto de que o sítio pode ser descrito por uma forma de onda senoidal. Cova e Church (2000b) consideram o PCR uma abordagem heurística promissora para solucionar problemas de busca de sítio, entretanto com a limitação de que um único algoritmo deve ser desenvolvido para cada formulação do problema. Além disso, Xiao (2006) argumenta que esse método

pode negligenciar algumas soluções viáveis com formas espaciais que não podem ser capturadas utilizando os parâmetros considerados.

A abordagem desenvolvida por Xiao et al. (2002) utilizava um algoritmo evolutivo (AE) para a geração de alternativas para problemas de busca de sítio multiobjetivo. O AE era baseado em operadores evolutivos específicos que realizavam modificações morfológicas na solução representada por um grafo não orientado. A representação na forma de um grafo e os operadores evolutivos desenvolvidos garantiam a criação de sítios contíguos. Segundo os pesquisadores, o algoritmo foi efetivo em encontrar alternativas para o problema multiobjetivo, entretanto a formulação do problema era limitada somente a aplicações em modelo de dados *raster*.

Outra abordagem é baseada na formulação da contiguidade do sítio com restrições explícitas no domínio da programação inteira mista. Cova e Church (2000a) desenvolveram uma abordagem baseada na relação entre a raiz de um sítio e suas unidades integrantes. Em Cova e Church (2000b), um operador de vizinhança de ponto para área, capaz de identificar o melhor sítio dado uma unidade focal, é proposto utilizando a formulação de restrições de contiguidade explicitas. A aplicação desse operador está relacionada ao conceito de operador focal proposto por Tomlin (1990) em modelagem cartográfica. O operador de vizinhança proposto permite que o problema seja dividido em um conjunto de problemas locais menores que são mais fáceis de resolver otimamente usando técnicas de programação linear inteira. Desse modo, a histórica dificuldade em resolver problemas de busca de sítio é desassociada do número de unidades espaciais do modelo de dados raster. Entretanto, a dificuldade em resolver um operador de vizinhança de busca de sítio ainda é função do número de unidades espaciais na vizinhança da célula raiz (COVA e CHURCH, 2000b). Williams (2002) estendeu o programa zero-um desenvolvido por Williams (2001) para resolver a problema de árvore de extensão (spanning tree) de modo a obrigar a contiguidade do sítio. Entretanto, essas duas abordagens podem requerer um grande número de restrições em um modelo de programação inteira e assim são ineficiente na solução problemas de grandes dimensões.

Um modelo mais recente desenvolvido por Shirabe (2005) permite reduzir o número de restrições utilizando fluxos de rede, mais ainda é computacionalmente intensivo

dependendo do tamanho do problema. Xiao (2006) testa a abordagem proposta por Williams (2002) utilizando um problema de alocação de um sítio de 10 células em uma grade de 100 x 100 células, mas não consegue obter com sucesso uma solução em 2 dias. Shirabe (2005) também relata a intensidade computacional de seu modelo e sugere o uso de métodos heurísticos para problemas de grandes dimensões.

#### 3.3.2 Forma espacial em busca de sítio

A propriedade espacial de forma de uma solução é outra característica importante em problemas de busca que definem explicitamente um sítio. A formalização de uma medida satisfatória e computacionalmente amigável da forma do sítio é um segundo desafio na aplicação de modelos de otimização. Incluir algum modo de controle sobre a forma do sítio é essencial, pois modelos de otimização em geral tendem a buscar os locais com maior aptidão o que, dependendo das características espaciais do problema, pode gerar soluções sinuosas se o critério da forma for ignorado (COVA e CHURCH, 2000b). Essas soluções em geral não são úteis para problemas reais de localização de sítio onde normalmente uma solução compacta é preferida e/ou existe alguma restrição em relação às configurações viáveis da solução.

A incorporação de um objetivo ou restrição espacial da forma do sítio na busca pela melhor solução exige uma série de passos. Se possível, um analista deveria procurar obter uma ordem de preferência de forma espacial do tomador de decisão para um subconjunto de soluções possíveis. O resultado desse trabalho pode ser utilizado para identificar uma medida quantitativa da forma espacial que melhor se aproxima da ordem de preferência. Por último, a medida deve ser transferida para um domínio computacional para ser útil na busca pelo melhor sítio (COVA e CHURCH, 2000b).

Modelos de busca de sítio utilizam normalmente medidas de compactação para tratar o problema da forma. Essa abordagem tem a vantagem de considerar todas as formas viáveis, sujeitas, é claro, a restrições da divisão espacial (*tesselation*) em uso (um modelo *raster*, por exemplo, permite a configuração de mais forma do que uma divisão espacial irregular). Existem diversas medidas de compactação disponíveis na literatura que podem ser utilizadas para esse propósito (AUSTIN, 1984) (HORN, *et al.*, 1993) (VANEGAS, *et al.*, 2010) (KAI e BOA, 2010). Em geral, as medidas de compactação são derivadas de

outras medidas espaciais primitivas como perímetro, área, diâmetro máximo e mínimo círculo circunscrito. Mais importante, a medida deve reproduzir a ordem de preferência de forma o mais próximo possível. Além disso, a medida de compactação também deve ser composta por um número pequeno de características primitivas de forma espacial que sejam facilmente calculadas (COVA e CHURCH, 2000b). A Figura 20 compara o processo de modelagem de preferência da forma com o uso tradicional de medidas quantitativas para descrever a forma existente.

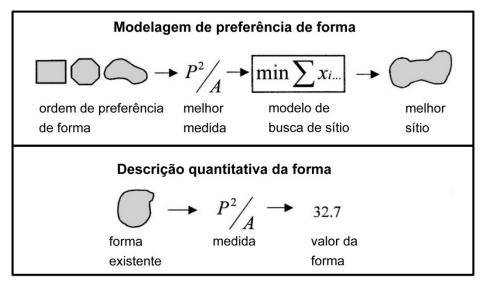


Figura 20 - Comparação do processo de modelagem da preferência da forma com o uso tradicional de medidas quantitativas para descrever uma forma existente (COVA e CHURCH, 2000b).

Kai e Boa (2010) comparam diferentes métodos de avaliação da compactação espacial existentes na literatura aplicados a um problema de otimização de planejamento do uso da terra utilizando um algoritmo genético simples. Esses métodos foram analisados considerando a eficiência do algoritmo e o efeito desejado na solução. Dos métodos analisados se destacaram pelo desempenho obtido:

• Método do vizinho não linear: para cada célula é registrado o número de células vizinhas que possuem o mesmo uso da terra. Na análise são identificados oito vizinhos considerando um modelo espacial raster (outras configurações de vizinhança são possíveis conforme ilustra a Figura 21). Com essa definição a formulação do problema fica:

min 
$$-\sum_{k=1}^{K} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} A_{ijk} x_{ijk}$$
 (8)

Onde:

$$A_{ijk} = x_{i-1jk} + x_{i+1jk} + x_{ij-1k} + x_{ij+1k} + x_{i-1j-1k} + x_{i+1j+1k} + x_{i-1j+1k} + x_{i+1j-1k}$$

$$\forall k = 1, \dots, K; i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M.$$

Os índices i e j correspondem, respectivamente, ao número da linha e da coluna do elemento  $x_{ijk}$  da matriz que representa o modelo raster. O índice k indica o tipo de uso da terra; se a célula possui o atributo de uso da terra do tipo k então  $x_{ijk} = 1$ , senão  $x_{ijk} = 0$ . A variável  $A_{ijk}$  corresponde à soma do número de células vizinhas que possuem o atributo de uso da terra do tipo k.

 Minimização do índice de forma: é função do perímetro dividido pela raiz da área do grupo de células. A formulação do problema é descrita pela equação:

$$Shape_{total} = \sum_{k=1}^{K} \sum_{c=1}^{C} \frac{P_{kc}}{\sqrt{R_{kc}}}$$

$$\tag{9}$$

Onde:

 $P_{kc}$  se refere ao perímetro de um grupo c para o uso da terra do tipo k; e  $R_{kc}$  representa a área de cada grupo c para o uso da terra do tipo k.

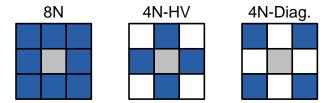


Figura 21- Algumas definições possíveis de vizinho utilizando modelos de dados *raster* onde as células em azul são consideradas vizinhas da célula central em cinza.

No caso do problema de busca de um único sítio, só um tipo de uso da terra existe e a solução é representada por um único agrupamento contendo p células contíguas. O índice de forma apresentado é interessante, pois não varia com o tamanho do sítio. Esse índice multiplicado pela constante 0,282 varia de 1,0 para um círculo até infinito para uma forma estreita e longa infinita. A forma de um quadrado apresenta o valor de 1,1 (BAKER e CAI, 1992).

Outra medida de compactação interessante é o *círculo circunscrito relacionado*<sup>27</sup> (CCR) descrito em Baker e Cai (1992). Esse índice compara a área do sítio com a área do menor círculo capaz de circunscrever o sítio. A fórmula o sítio é:

$$CCR = \frac{2 * ([area]/\pi)^{1/2}}{[maior\ eixo]}$$
(10)

Esse índice varia de 0,0 a 1,0 à medida que a compactação do sítio se aproxima de um círculo. Um quadrado tem o valor de 0,79789.

Baker e Cai (1992) descrevem também uma medida da complexidade do perímetro denominada de *dimensão fractal* (DF). A interpretação da dimensão fractal apresentada no estudo é função do perímetro e área. A fórmula para a DF é:

$$DF = 2 * \frac{\log([perimetro])}{\log([area])}$$
 (11)

Wentz (2000) se refere a essa medida com *índice de borda* que varia de 1,0 < DF < 2,0 aonde valores maiores representam níveis mais alto de rugosidade da borda.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Traduzido do termo em inglês *Related circumscribing circle* (RCC).

## 3.4 Um algoritmo evolutivo para a busca de sítio

Em diversos problemas reais de busca de sítios exatos as características espaciais da solução são importantes e, portanto devem ser consideradas no modelo de busca. Uma solução para esse tipo de problema espacial é composta por um conjunto de unidades espaciais sujeitas a certas relações espaciais como contiguidade e forma. Nesse contexto, o problema de localização de um sítio eólico é um problema complexo de otimização combinatória do tipo NP-Completo, no qual o esforço computacional para encontrar a solução cresce rapidamente com o tamanho do problema. Dependendo da dimensão do problema, torna-se computacionalmente inviável encontrar a solução ótima. Esse tipo de problema insolúvel pode ser resolvido aproximadamente por métodos heurísticos, que não garantem encontrar a solução ótima, mas são capazes de prover uma solução "boa" ou "quase ótima".

Além disso, problemas complexos de decisão espacial em geral são mal ou semiestruturados, o que torna difícil a tarefa de definir o problema ou articular totalmente os objetivos para os tomadores de decisão (DENSHAN, 1991). Dibble e Densham (1993) sugerem o desenvolvimento de métodos capazes de gerar um número limitado de alternativas promissoras para auxiliar os tomadores de decisão a explorar o espaço de solução e a estabelecer suas prioridades. Essas alternativas devem permitir aos decisores um melhor entendimento da estrutura do seu problema, incluindo as relações de compensação físicas entre os critérios. Para a geração de alternativas interessantes em problemas espaciais complexos, Dibble e Densham (1993) propõe a integração de um algoritmo genético (AG) com um sistema de informação geográfica. Eles argumentam que AGs são fáceis de implementar, e que sua estrutura simples e o poder de exploração do espaço de solução de problemas de otimização tornam essa classe de métodos heurísticos uma escolha natural.

Nesse contexto, esse trabalho propõe o uso de um método heurístico de otimização baseado no algoritmo evolutivo (AE) proposto por Xiao (2006) para tratar o problema de identificação de sítios eólicos promissores. Os componentes do método proposto são apresentados a seguir.

### 3.4.1 Formulação do problema

Xiao (2006) emprega uma representação na forma de grafo não orientado a fim de capturar a característica espacial de uma solução válida para um problema de busca de sítio. Um grafo é um par G = (V, E), onde  $V = \{v_i\}$  é um conjunto de vértices,  $v_i$  é o iésimo vértice  $(1 \le i \le n)$ ,  $E = \{(v_i, v_j)\}$  é um conjunto de arcos, e um arco  $(v_i, v_j)$  é E se e somente se os vértices  $v_i$  e  $v_j$  são diretamente conectados. No contexto de um problema de busca de sítio, um vértice representa uma unidade espacial e um arco existe entre duas unidades adjacentes. Um caminho é uma sequencia de vértices onde um arco existe entre dois vértices consecutivos em sequencia. Um grafo é dito desconectado se existe pelo menos um par de vértices que não podem ser conectado pelo caminho. Um vetor de atributos  $A = (c(v_1), \dots, c(v_n))$  associa a cada vértice  $v_i$  um custo  $c(v_i)$ . A razão de usar um vetor ao invés de um conjunto para definir os atributos é que um conjunto exige a unicidade de seus elementos, o que não necessariamente se mantém para os valores dos atributos.

Dado um grafo G, uma solução viável para um problema de busca de sítio pode ser representada por um subgrafo G' de G. Sendo p o número de vértices (unidades espaciais) para serem alocadas, o subgrafo é definido como  $G' = \{V', E'\}$ , onde  $V' = \{v_i | 1 \le i \le p, e \text{ existe um caminho para todos os pares de vértices em <math>V'\}$ , e  $E' = \{(v_i, v_j) | (v_i, v_j) \in E; v_i, v_j \in V'\}$ . A definição do subgrafo expressa informalmente o requerimento de contiguidade definido pelo conceito de grafo conectado. A propriedade de contiguidade necessária da solução é mantida por meio de mecanismos implementados nos operadores evolutivos que serão discutidos na Seção 3.4.3. Por último, a função objetivo é definida como a minimização da soma dos custos de todos os vértices em V':

$$\min f = \sum_{v \in V'} c(v) \tag{12}$$

onde c(v) é o atributo de custo (ou utilidade) do vértice v que é definido em um vetor de atributos A.

V, E e A juntos definem os dados de entrada para o problema de busca de sítio. O objetivo do problema de busca de sítio é encontrar um subgrafo G' que otimize a função objetivo.

A representação do problema em forma de grafo permite ao algoritmo evolutivo proposto por Xiao (2006) tratar problemas espaciais aonde o modelo de dados não é representado por uma grade regular. Essa generalização permite a aplicação do AE a uma gama maior de problemas espaciais. No entanto, o algoritmo evolutivo proposto no presente trabalho se limita somente a aplicações em modelos raster. Essa abordagem simplifica o algoritmo na medida em que permite explorar as características espaciais do modelo raster a fim de manter a contiguidade da solução, e com isso as relações espaciais entre os vértices (arcos E') não precisam ser explicitadas. Para resolver esse tipo de problema, a informação E' não é necessária na formulação do problema assim como mecanismos para armazenar a informação de arco (XIAO, 2005). Um exemplo da representação em grafo de em um modelo *raster* é ilustrado em Figura 22.

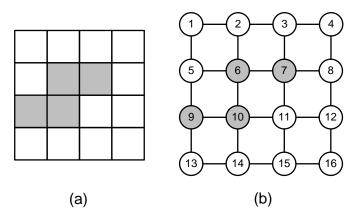


Figura 22 - Representação do grafo de um problema de busca de sítio com um modelo espacial raster. (a) Uma grade regular de 4 x 4 onde as quatro células cinzas são alocadas (i.e., p=4); (b) o grafo da grade onde cada número identifica um vértice. Assim,  $V = \{1, 2, ..., 16\}$ ;  $E = \{(1, 2), (1, 5), (2, 3), ..., (15, 16)\}$   $V' = \{6, 7, 9, 10\}$ ;  $E' = \{(6, 7), (6, 10), (9, 10)\}$ . A cada vértice também é associado um valor de custo que forma o vetor de atributo A.

Entretanto, para que sejam encontradas soluções úteis e realistas do problema de identificação de sítio eólicos, um controle da forma espacial do sítio deve ser considerado na modelagem do problema. Conforme discutido na Seção 3.3, o controle da forma da solução pode ser implementado de duas formas: incluindo uma medida de forma

(compactação) na formulação do problema como um objetivo ou restrição, ou através de um procedimento de construção do sítio que considera o fator de forma no algoritmo de solução. As duas estratégias de controle de forma não são excludentes e podem ser consideradas simultaneamente no modelo de busca de sítio. Nesse sentido, duas formulações do problema considerando um critério de avaliação da forma da solução final são apresentadas a seguir, enquanto a estratégia de implementação do controle de forma através do algoritmo será descrita na Seção 3.4.3.

Para a inclusão do critério de forma espacial na formulação do problema, duas medidas de compactação são sugeridas pela sua facilidade de implementação e eficiência computacional: o *método do vizinho não linear* e o *índice de forma* (apresentados na Seção 3.3.2). No *método do vizinho não linear* o número de vértices vizinhos |N(v)| ao vértice v da solução V' que pertencem a V' é contabilizado para cada vértice e em seguida esses valores são somados. Já o *índice de forma* é uma medida de compactação derivada do perímetro e da área do sítio. Assim, duas formulações gerais da função objetivo adaptadas ao problema de identificação de sítios eólicos são definidas em (13) e (14) para o *método do vizinho não linear* e o *índice de forma*, respectivamente. A função objetivo definida com o *método do vizinho não linear* é:

$$\min f = \sum_{v \in V'} c(v) + k \sum_{v \in V'} |N(v)| \tag{13}$$

Onde:

c(v) é o atributo de custo (ou utilidade) do vértice v que é definido em um vetor de atributos A;

$$N(v) = \{v_n \in V' | v_n \text{ \'e vizinho de } v \text{ e } v_n \neq v\}; e$$

k é o coeficiente para o ajuste do peso do fator de compactação no valor da função objetivo.

A identificação do conjunto de vizinhos do vértice v em V', dado por N(v), depende da definição de vizinho utilizada (na Figura 21 são ilustradas algumas possibilidades em um modelo espacial raster).

A formulação utilizando o *índice de forma* é:

$$\min f = \sum_{v \in V_I} c(v) + h \frac{P}{\sqrt{R}}$$
 (14)

Onde:

P é o perímetro do sítio representado pelo vértice em V';

R é a área do sítio, que para o caso do modelo raster é calculado como

R = a \* |V'|, onde a equivale a área da célula da grade regular; e

h é o coeficiente para o ajuste do peso do fator de compactação na função objetivo.

A utilidade de cada uma das medidas de compactação sugeridas para o problema de busca de sítio deve ser avaliada com base na sua capacidade de representar a ordem de preferência de forma defina pelo tomador de decisão. A Seção 3.3.2 descreve o processo de modelagem da preferência de forma do sítio proposto por Cova e Church (2000b).

## 3.4.2 Algoritmos evolutivos

Algoritmos evolutivos são procedimentos de otimização inspirados no processo de evolução natural de sistemas biológicos. O termo algoritmo evolutivo é usado para designar uma classe geral de algoritmos que são encontrados na literatura com diferentes nomes: algoritmos genéticos (HOLLAND, 1975), estratégias evolutivas (RECHENBERG, 1965), programação evolutiva (FOGEL, *et al.*, 1966) e programação genética (KOZA, 1992). Essa família de algoritmos implementa estratégias de otimização baseadas na teoria *Darwiniana* de seleção natural e sobrevivência do mais apto.

Na aplicação de um AE, a solução do problema sendo resolvido é codificada como um indivíduo e uma população de indivíduos é gerada. Durante a evolução da população é importante que se mantenha uma coleção de boas soluções para que o AE possa encontrar soluções ótimas ou "quase ótimas". O mecanismo de evolução do AE para a solução ótima se dá por meio da atribuição de um valor de aptidão para cada indivíduo, que normalmente é derivado do valor da função objetivo de cada solução individual. Indivíduos com altos valores de aptidão possuem uma alta probabilidade de serem mantidos na população e assim têm mais chances de espalhar os seus bons atributos para um número crescente de indivíduos nas gerações sucessivas.

Um procedimento geral de AE é descrito na forma de pseudocódigo na Figura 23. Na execução de um AE a população inicial é gerada, normalmente de forma aleatória. Em seguida, um conjunto de operações evolutivas (seleção, recombinação e mutação) é aplicado aos indivíduos da população atual para criar uma nova geração de indivíduos. Na operação de recombinação, dois indivíduos pais são selecionados da população atual com base nos seus valores de aptidão. A informação codificada nos indivíduo pais é então usada para criar um ou dois indivíduos filhos, que são incluídos na próxima geração. Um indivíduo da nova geração pode ser escolhido, normalmente com uma baixa probabilidade, para ser submetido a uma operação de mutação que introduz genes aleatórios ou ruído na informação genética do indivíduo a fim de ajudar o processo de busca a escapar de ótimos locais. Tais operações são executadas iterativamente até que um critério de parada seja satisfeito (por exemplo, número pré-determinado de gerações, número de gerações seguidas sem que haja melhora no valor da função objetivo do melhor indivíduo, entre outros).

Proce	edimento AE
1	$t \coloneqq 0$
2	Inicializa população $G(t)$
3	Repete
4	Avalia $G(t)$
5	$t \coloneqq t + 1$
6	Repete
7	Seleciona indivíduos pais de $G(t-1)$
8	Aplica recombinação aos indivíduos pais e copia filhos para $G(t)$
9	Aplica mutação aos novos filhos em $G(t)$
10	<b>Até</b> todos os indivíduos em $G(t)$ serem criados
11	Até o critério de parada ser satisfeito

Figura 23 - Procedimento geral de um algoritmo evolutivo.

### 3.4.3 Desenho do AE para o problema de busca de sítio

Na implementação do AE de Xiao (2006), cada solução individual é representada por uma cadeia de *p* números inteiros que identificam os vértices de um sítio válido. A informação dos arcos do grafo G de entrada é armazenada em uma lista que é usada pelo operador evolutivo para manter a contiguidade de cada solução individual (no caso do AE proposto essa informação não é armazenada, pois pode ser facilmente obtida através da informação dos vértices da solução e da estrutura da grade regular do problema de busca de sítio proposto no presente trabalho).

Uma operação de inicialização (denominada INIT-SITE) é desenhada para gerar uma variedade de sítios com uma forma relativamente regular ou compacta (Figura 24). INIT-SITE chama um processo de crescimento de sítios (denominado ACCRETE-SITE) que começa a partir de um vértice semente e continua a construir um sítio parcial contíguo até que o tamanho p desejado seja alcançado (Figura 24). No procedimento ACCRETE-SITE, um conjunto  $V_1$  é mantido para guardar os vértices que podem ser adicionados à solução parcial sem violar a restrição de contiguidade. O passo 4 em ACCRETE-SITE seleciona todos os vértices adjacentes aos vértices do sítio parcial. A Figura 25 ilustra o processo de crescimento de sítio a partir de uma célula semente realizado pelo algoritmo ACCRETE-SITE.

Proce	dimento ACCRETE-SITE(V, E, p, v)
1	i = 1
2	$V'\coloneqq 1; V_1\coloneqq \emptyset; V_2\coloneqq \{v\}$
3	Enquanto $i < p$ faça
4	$V_1 \coloneqq \{u \in V   u \text{ \'e adjacente a algum em } V_2, u \not\exists V'\}$
5	Se $ V_1  \leq p - i$ então
6	Adiciona todos os vértices em $V_1$ para $V'$
7	Senão
8	Aleatoriamente $p-i$ adiciona vértices em $V_1$ para $V'$
9	$V_2 \coloneqq V_1$
10	$i \coloneqq i +  V_1 $
11	Retorna V'
Proce	dimento INIT-SITE $(V, E, p)$
1	Seleciona aleatoriamente um vértice semente $v$ de $V$
2	Retorna ACCRETE-SITE $(V, E, p, v)$

Figura 24 - Inicialização usando um procedimento de crescimento de sítios (XIAO, 2006).

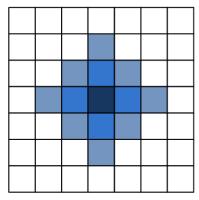


Figura 25 – Processo de crescimento de sítio a partir de uma célula semente usado pelo algoritmo ACCRETE-SITE, onde a célula semente é indicada em azul escuro. As células em azul mais claro indicam o processo de crescimento do sítio a partir da célula semente.

Xiao (2006) apresenta um operador específico de busca local para cumprir o papel explotatório da operação de recombinação em AEs com o argumento de que em problemas de busca de sítio pode ser difícil recombinar duas soluções pais em um novo sítio, pois nem sempre os sítios pais possuem algum vértice em comum, especialmente quando o tamanho da solução p é muito menor que o número de vértices n do grafo G. Xiao (2006) cita que em Xiao  $et\ al$ . (2002) um operador de recombinação específico foi desenvolvido para transferir uma solução pai para a localização da outra. Entretanto, essa operação é limitada a grafos regulares (por exemplo, um modelo raster) não sendo adequada para grafos em geral. Esse operador poderia ser facilmente implementado no AE proposto no presente trabalho que é baseado em um modelo raster.

O algoritmo de busca local é projetado com base no conceito de vizinhança de uma solução S, que é definida como um conjunto de soluções que são consideradas próximas de S usando várias métricas, como a distância Euclideana ou distância de Manhattan (XIAO, 2006). O algoritmo de busca local (denominado LOCAL-SITE) proposto por Xiao (2006) ajusta a solução atual para um novo local que pode possuir um melhor valor da função objetivo (Figura 26). Os ajustes são repetidos *nlocal* vezes e desse modo à contiguidade do sítio é mantida durante a operação. Esse algoritmo é controlado por uma probabilidade *plocal* que normalmente recebe um valor alto (por exemplo, 0,9).

Durante cada iteração do algoritmo LOCAL-SITE, duas funções são executadas sequencialmente. A primeira função (FIND-MOVEABLE-RAND) retorna um vértice movível que pode ser removido sem criar um sítio parcial fragmentado (não contíguo) (por

exemplo, o vértice 7 na Figura 22); a segunda função (FIND-ELIGIBLE-GREEDY) retorna um vértice elegível que pode se adicionado em um sítio parcial sem resultar em sítio fragmentado (por exemplo, na Figura 22 se o vértice 7 é removido, os vértices 2, 5, 11, 13 e 14 são elegíveis). A função FIND-MOVEABLE-RAND seleciona aleatoriamente dois vértices da solução atual V'. Se o vértice de maior custo é movível, então ele será retornado, caso contrário o processo é repetido k vezes até que um vértice movível seja encontrado. Se nenhum vértice movível for encontrado em k iterações, a solução atual V' não será alterada. Xiao (2006) sugere que a definição do parâmetro k igual a  $p^2/4$  é suficiente para que esse procedimento retorne um vértice movível na maioria dos casos na prática. A função FIND-ELIGIBLE-GREEDY encontra todos os vértices e retorna aquele com o menor valor de custo que é então adicionado a solução. A Figura 27 ilustra o funcionamento do algoritmo LOCAL-SITE.

Proce	edimento FIND-MOVEABLE-RAND( $V$ ')
1	Repete k vezes
2	Encontra aleatoriamente dois vértices em $v_1$ e $v_2$ de $V'$
3	Atribui a $v$ o vértice que possui o maior valor de custo em $v_1$ e $v_2$
4	Se v é movível então
5	Retorna v
6	Retorna null
Proce	edimento FIND-ELIGIBLE-GREEDY(V')
1	Encontra todos os vértices elegíveis
2	Retorna o vértice elegível que possui o menor valor de custo
Proce	edimento LOCAL-SITE(V',plocal,nlocal)
1	Gera um número aleatório uniformemente distribuído entre 0 e 1
2	Se o número aleatório é maior do que plocal, então
3	Retorna V'
4	Repete nlocal vezes
5	Encontra um vértice móvel $v_1$ usando FIND-MOVEABLE-RAND
6	Se $v_1 = null$ então mantém $V'$ e vá para o passo 4
7	Senão
8	Remove $v_1$ de $V'$
9	Encontra um vértice elegível $v_2$ usando FIND-ELIGIBLE-GREEDY
10	Adiciona $v_2$ a $V'$
11	Retorna V'

Figura 26 - Algoritmo de busca local (XIAO, 2006).

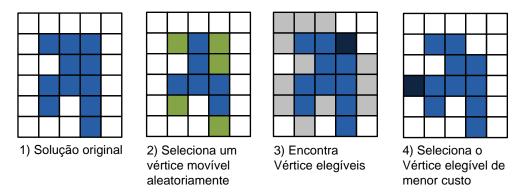


Figura 27 - Exemplo da execução do algoritmo LOCAL-SITE. Em (1) as células em azul compõe a solução, em (2) as células movíveis são marcadas em verde, (3) apresenta a célula movível selecionada aletoriamente está em azul escuro e as células elegíveis para fazer parte da solução estão em cinza, e (4) mostra a solução modificada destacando a célula movida em azul escuro.

No AE proposto, uma modificação baseado no conceito de lista tabu é implementada na função LOCAL-SITE. Nesse procedimento modificado, o vértice removido em cada iteração do laço no passo 4 do algoritmo LOCAL-SITE é armazenado e mantido em uma lista tabu por certo número de iterações. Durante um número predefinido de iterações os vértices contidos na lista tabu são inelegíveis.

O algoritmo de mutação (denominado MUTATE-SITE) é um processo de reinicialização adaptativo que funciona de uma maneira iterativa (Figura 28). O algoritmo INIT-SITE é inicialmente chamado para criar um sítio usando como semente um vértice do grafo *G* selecionado aleatoriamente. Então, o vértice com o menor valor de custo do sítio criado é usado como o vértice semente para criar outro sítio usando a função ACCRETE-SITE, e esse processo é repetido por *nmutat* vezes (parâmetro especificado pelo usuário). Semelhante ao algoritmo de busca local, o algoritmo de mutação é controlado pela probabilidade *pmutat* que normalmente recebe um valor baixo (por exemplo, 0.1).

Proc	Procedimento MUTATE-SITE(V', pmutat, nmutat)				
1	Gera um número aleatório uniformemente distribuído entre 0 e 1				
2	Se o número aleatório é maior do que <i>pmutat</i> , então Termina				
3	$V' \coloneqq \text{INIT-SITE}(V, E, p)$				
4	Repete nmutat vezes				
5	Encontra o vértice $v \in V'$ com o menor valor de custo				
6	V' := ACCRETE-SITE(V, E, p, v)				
7	Retorna V'				

Figura 28 - Operador de mutação para o problema de busca de sítio (XIAO, 2006). As funções INIT-SITE e ACCRETE-SITE são listadas na Figura 24.

Com as operações definidas acima o procedimento AE para o problema de busca de sítio é montado (denominado SITE-EA) (Figura 29). Os parametros *gen* e *popsize* indicam o número total de iterações (ou gerações) a ser conduzido durante cada execução do AE e o número de indivíduos contidos população do AE. A avaliação dos indivíduos da população no passo 4 do SITE-EA é realizado utilizando a função de aptidão proposta por Xiao (2006):

$$f_i' = 0.1 + \frac{f_{max} - f_i}{f_{max} - f_{min}}$$
 (15)

Onde  $f_i$  é o valor da função objetivo do indivíduo i em (12), e  $f_{min}$  e  $f_{max}$  são o valores mínimo e máximo dos valores de função objetivo da população respectivamente.

Proc	Procedimento SITE-EA				
1	$t \coloneqq 0$				
2	Inicializa população $G(t)$ usando INIT-SITE				
3	Repete gen vezes				
4	Avalia $G(t)$				
5	$t \coloneqq t + 1$				
6	Repete				
7	Seleciona um indivíduo de $G(t-1)$ baseado na aptidão				
8	Aplica LOCAL-SITE ao indivíduo selecionado				
9	Copia o individuo filho criado a $G(t)$				
10	Aplica MUTATE-SITE ao novo filho				
11	Até todos os indivíduos em $G(t)$ serem criados				

Figura 29 - O algoritmo evolutivo para problemas de busca de sítio (XIAO, 2006).

Conforme pode ser observado na Figura 29, uma boa solução terá uma chance maior de ser submetida à busca local, que em geral melhora a solução. Devido à característica aleatória da busca local, diferentes execuções do algoritmo irão resultar em diferentes soluções, apesar de que a diferença pode ser pequena em relação à configuração

espacial. Por outro lado, o operador de mutação é utilizado para ajudar o processo de busca a fugir de um ótimo local. Esses mecanismos combinados irão aumentar a chance do AE de encontrar solução de alta qualidade (XIAO, 2006).

#### 3.4.4 Controle de forma do sítio no AE

O controle de forma implementado no AE proposto por Xiao (2006) é realizado por meio de dois procedimentos: ACCRETE-SITE (Figura 24) e LOCAL-SITE (Figura 26). O procedimento ACCRETE-SITE tende a gerar uma solução com uma forma relativamente compacta a partir do vértice semente que tende a se aproximar de um círculo (considerando um modelo *raster*). Esse procedimento não considerado o valor de custo de cada vértice e assim a solução criada só depende da localização do vértice semente. Já o procedimento LOCAL-SITE procura melhorar o valor da função objetivo ajustando localmente a solução atual para um novo local usando um processo iterativo onde um vértice movível é selecionado aleatoriamente e substituído pelo vértice de menor custo do conjunto identificado de vértices elegíveis (células viáveis de integrar o sítio preservando sua contiguidade e sem que furos sejam criados).

Esse mecanismo, entretanto, possui duas limitações: (1) parte do princípio de que a solução desejada possui uma forma compacta, o que nem sempre é o caso, e (2) o procedimento de busca local usa somente o critério de custo para modificar a solução procurando minimizar (maximizar) o valor de custo máximo (adequação mínima) do conjunto de células do sítio e isso pode levar, ao longo do processo de evolução, a criação de sítios estreitos e sinuosos que não são considerados soluções realistas do problema.

O SITE-AE funciona bem em problemas onde a solução engloba um número pequeno de células e/ou o forma da solução não é um fator restritivo, mas não atende de forma satisfatória o problema de busca de um sítio eólico onde a forma é uma característica importante da solução. A solução do problema de localização de um parque eólico de grande porte, que varia 10 a 50 MW, é em um sítio que compreende 200 a 1000 unidades espaciais, em função da resolução espacial utilizada de aproximadamente 92m x 92m (Tabela 13).

Tabela 13 - Tamanhos de um parque eólico em função da potência considerando a capacidade instalada de 6MW/km² e a resolução da grade espacial de 92 m x 92 m.

Potência (MW)	Área ocupada (km²)	Número de unidades espaciais do sítio
10	1,7	≈ 200
30	5	≈ 600
50	8,3	≈ 1000

Além disso, existem diversas configurações espaciais possíveis para o parque eólico que dependem fortemente do regime de ventos e das restrições no local. A disposição dos aerogeradores em fileiras perpendiculares a direção predominante do vento é bastante comum em locais favoráveis que apresentam o relevo bem plano ou levemente ondulado e onde não existem grandes obstáculos ou restrições construtivas (Figura 30). Essa disposição dos aerogeradores favorece a produção de energia elétrica em um parque eólico sujeito a um regime de vento com uma direção predominante bem definida, pois permite reduzir o espaçamento lateral entre os aerogeradores reduzindo a área ocupada, e evita o efeito da esteira aerodinâmica nos aerogeradores a jusante melhorando o desempenho total do parque.

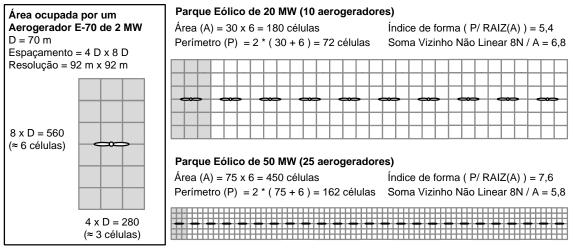


Figura 30 - Foto do complexo eólico de Osório (RS) composto por três parques eólicos. Cada parque possui uma potência de 50 MW e 25 aerogeradores distribuídos em uma fileira.

(Fonte: CRESESB, 2006)

A distribuição dos aerogeradores em fileiras pode formar parques eólicos estreitos e alongados que devem ser considerados soluções viáveis ao problema de localização de sítios. A forma do sítio de um parque eólico aonde os aerogeradores são alinhados em uma

fileira única pode ser considerada, portanto um limite da compactação do sítio que varia em função da potência do parque considerado. A Figura 31 ilustra a representação de um parque eólico em fileira em um modelo *raster* e duas medidas de compactação calculadas para dois parques eólicos com potências diferentes. Pode ser observado que o valor do *índice de forma* tende a diminuir com a compactação do sítio, enquanto o *método do vizinho não linear* aumenta (associado ao aumento da conectividade do subgrafo *G'* que representa o sítio).



<sup>\*</sup> Para um círculo aproximado de 177 células: Índice de forma ( P/ RAIZ(A) ) = 4,5; Índice de forma ( P/ RAIZ(A) ) = 7,2

Figura 31 - Área ocupada por Parques eólicos de 20 MW e 50 MW com aerogeradores distribuídos em uma única fileira e considerando a utilização de toda a área disponível.

Na literatura, algoritmos de crescimento de região a partir de uma célula semente usando mapas *raster* foram propostos por Brookes (1997) e Church *et al.* (2003) para tratar problemas de identificação de sítio onde as características espaciais de forma e compactação são requisitos da solução. Conforme já apresentado na Seção 3.3.1, Brookes (1997) propôs um algoritmo de crescimento de região parametrizado (CRP) baseado em dois procedimentos: crescimento de região simples (CRS) e crescimento de forma parametrizada (CFP). O procedimento CRS é iniciado com uma célula semente e iterativamente adiciona a célula vizinha com o menor custo (maior adequação) até que a região tenha crescido ao tamanha desejado. Esse processo procura minimizar (maximizar) o custo máximo (a adequação mínima) da célula e desse modo otimizar o custo (a adequação) total do sítio. Esse processo é dito ganancioso (*greedy*), pois sempre adiciona o vizinho com a melhor avaliação. Em um cenário de células da grade no qual existe uma cadeia de

células formando um vale de baixo custo, esse processo irá seguir o caminho do vale e formar uma sítio longo e estreito (CHURCH, et al., 2003). Nesse sentido, Brookes (1997) implementa um termo de crescimento da forma espacial parametrizado para adicionar um grau de compactação a forma. No CFP cada célula envolvendo a célula semente é pontuada em relação a sua contribuição para se ajustar a forma desejada (baseado na razão entre o menor e o maior eixo, orientação do maior eixo e número de braços) centralizada na célula semente. Esse termo relacionado a forma espacial permite controlar o grau de compactação e assim evitar a formação de um sítio estreito e sinuoso o que consitui em muitos casos uma solução inadequada ao problema.

Partindo da estratégia comum de crescimento de região a partir de uma célula semente Church *et al.* (2003) propõe um procedimento alternativo. Nesse procedimento somente foi exigido que a solução construída fosse relativamente compacta, não existindo nenhum objetivo específico em relação o forma desejada ou orientação, em contraste com Brookes (1997). Church *et al.* (2003) argumenta que o termo da forma espacial proposto por Brookes, que é utilizado para o cálculo do custo (adequação) total da célula, orienta a geração de uma forma desejada centralizada em relação a célula semente ao invés de pensar a célula semente somente como parte do sítio e não necessariamente o seu centro, o que pode restringir o número de soluções possíveis construídas a partir de uma célula inicial. Nesse sentido, a característica do algoritmo de Church *et al.* (2003) de não impor uma forma espacial predefinida a solução é bastante favorável ao problema de busca de sítio, pois dá maior liberdade ao processo de criação do sítio a partir de uma célula inicial e assim permite ao algoritmo de busca explorar uma variedade maior de soluções.

A fim de superar as limitações do mecanismo de controle de forma da solução do algoritmo SITE-EA identificadas anteriormente, é proposta uma modificação no algoritmo evolutivo baseada no procedimento de crescimento de sítio apresentado por Church *et al.* (2003). Church *et al.* (2003) resume os objetivos que orientaram o desenvolvimento do processo de crescimento de sítio (PCS) para a geração de sítios úteis a problemas de planejamento espacial, particularmente de áreas de preservação ambiental de espécies específicas, considerando que o processo:

1. É capaz de gerar bons sítios representativos em relação a uma célula raiz;

- 2. Tem a tendência, na medida em que cresce, a selecionar as células vizinhas mais adequadas;
- 3. Tende a manter o perímetro do sítio baixo;
- 4. É independente de qualquer forma predefinida; e
- 5. Gera sítios que atendem os critérios de adequação dos especialistas.

O PCS desenvolvido com base nos critérios destacados acima é ilustrado na Figura 32. Primeiro, a seleção da célula semente está condicionada ao atendimento do valor mínimo de adequação especificado, eliminando a possibilidade do PCS ser iniciado em um ponto que não satisfaz os padrões mínimos. Segundo, as células localizadas dentro de *w* células da fronteira da área de estudo são excluídas de serem selecionadas como uma célula semente, onde *w* é o valor de expansão inicial de células a partir da célula raiz.

Se a célula semente selecionada atende aos dois primeiros requisitos, então o sítio é automaticamente expandido para um "sítio semente" a partir de uma célula semente. O tamanho dessa expansão é determinado pelo parâmetro w, que corresponde ao número de células acima e abaixo, à esquerda e a direita, distantes a partir da célula semente que define o escopo do "sítio semente". Isso permite a inicialização de um sítio parcial compacto centralizado na célula semente.

No segundo passo, as células que são vizinhas ao sítio são identificadas e incluídas em uma lista. Então a ordem das células na lista é alterada de forma aleatória, de modo que a ordem na qual as células vizinhas são identificadas e posicionadas na lista não influencie na ordem na qual elas podem ser selecionadas para serem adicionadas ao sítio. Depois, cada célula da lista é analisada em relação ao número de arestas e que ela compartilha com o sítio atual. Esse valor irá variar de 1 a 4 (dependendo da definição de vizinho utilizada). A adequação composta da célula i ( $CS_i$ ) na lista é então calculada como:

$$CS_i = S_i + N * e_i \tag{16}$$

Onde:

 $S_i$  é o valor de adequação da célula i;

 $e_i$  é o número de arestas que a célula i compartilha com o sítio existente; e

N é o peso atribuído as arestas compartilhadas com o sítio existente.

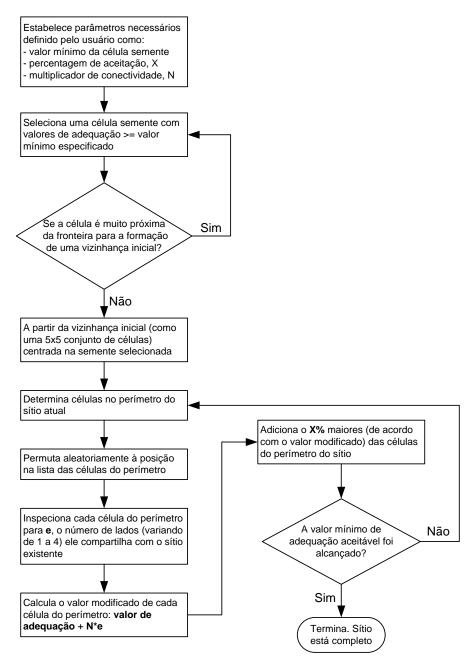


Figura 32 - Diagrama do processo de crescimento de sítio (CHURCH, et al., 2003).

Após a avaliação da adequação composta ser calculada para cada célula na lista do perímetro, a lista é ordenada pela avaliação da adequação composta em função do maior para o menor valor. Depois, os maiores X por cento das células dessa lista são adicionados ao sítio, onde X é um dos parâmetros do PCS. Se o sítio é grande o suficiente e possui uma adequação total suficiente, então o sítio está completo. Caso contrário, então o processo retorna ao passo no qual as células no perímetro do sítio são identificadas para uma nova lista. Furos podem ser criados durante o crescimento do sítio e podem fazer parte do sítio

final. Durante o crescimento, células contidas em furos são elegíveis para serem adicionadas ao sítio, pois elas são tratadas da mesma forma que outras células no perímetro. Segundo Church *et al.* (2003) é possível, entretanto, adicionar uma restrição que evite que a inclusão de qualquer célula que crie um furo na solução. Tal restrição já foi implementada no procedimento FIND-ELIGIBLE-GREEDY do algoritmo SITE-EA descrito anteriormente que pode ser facilmente incluído no PCS. Outras adaptações ao PCS são: na última iteração limitar o acréscimo de células somente a quantidade necessária para completar a exigência de tamanho do sítio e a condição de término considerando somente o critério de tamanho da solução retornando o sítio completo com o tamanho desejado.

O PCS possui três parâmetros diferentes que orientam o crescimento do sítio: *X*, *N* e *w*, onde *X* e *N* são os mais importantes. O parâmetro *X* define o percentual das melhores células identificadas no perímetro do sítio atual. Assim blocos de células são adicionados a cada iteração até que o tamanho do sítio seja atingido. Nessa abordagem o valor da adequação composta das células adicionadas nem sempre será o maior absoluto.

O parâmetro *N* da avaliação da adequação composta recompensa a compactação da forma geral resultante da inclusão das *X* por cento maiores células do perímetro no sítio parcial. Em qualquer iteração, cada aresta que uma célula vizinha compartilha com o sítio parcial aumenta o valor da compactação mantendo o comprimento do perímetro total baixo. Para uma dada área, um perímetro mais baixo leva a uma forma mais compacta (CHURCH, *et al.*, 2003).

Na implementação do algoritmo SITE-EA modificado (modSITE-EA) proposto no presente trabalho, a seleção dos indivíduos da subpopulação é implementada utilizando o método de amostragem estocástica universal (*Stochastic Universal Smapling – SUS*) proposto por Baker (1987). Esse método usa um único giro de roda. Essa roda, construída da forma padrão usada pelo método de seleção tradicional da Roda da Roleta, é girada com um número igualmente espaçado de marcadores igual ao tamanho da população, o oposto de um único marcador (caso do método da Roda da Roleta). O algoritmo de amostragem SUS soluciona o problema de variância do número esperado de filhos dos indivíduos pais associado ao algoritmo de Roda da Roleta (MICHALEWICZ, 1996). Além disso, foi utilizado um método de seleção elitista (*elitist model*) (DE JONG, 1975) onde um conjunto

dos melhores indivíduos encontrados na população é copiado diretamente (sem a aplicação de nenhum operador genético) para a nova geração. O Elitismo é uma estratégia interessante que permite preservar um conjunto das melhores soluções encontradas ao longo das gerações da população. Essa propriedade do algoritmo evolutivo é particularmente interessante para o problema de busca de sítios eólicos, onde, em geral, o espaço geográfico de busca é extenso e pode estar sujeito a muitas restrições o que resulta em uma área disponível bastante reduzida e fragmentada. Os parâmetros utilizados no algoritmo modSITE-EA são resumidos na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros usados no Algoritmo Evolutivo (AE) proposto para o problema de busca de sítio.

Parâmetro	Descrição	Escopo	
Gen	Número de iterações (ou gerações)	_	
popsize	Número de soluções individuais na população	_	
Gap	Parcela dos melhores indivíduos da população que é copiada sem	AE geral	
<u> </u>	modificações para geração seguinte	_	
p	p Número de células contidas na solução		
plocal	Probabilidade que determina se a busca local deve ser conduzida	_	
nlocal	Número de iterações realizadas na busca local	- Busca Local	
ntabu	Número de vértices mantido na lista tabu para serem excluídos da	Busca Local	
піади	lista de vértices elegíveis durante a busca local		
pmutat	Probabilidade que determina se mutação deve ser conduzida	_	
nmutat	Número de iterações de crescimento de um novo sítio realizadas	Mutação	
mmutai	na mutação		
142	Número de células distantes da célula semente que define a		
W	expansão inicial do sítio em uma forma compacta	_	
X	Percentual dos vértices elegíveis de maior adequação para serem	Crescimento	
Λ	incluídos na solução		
	Peso atribuído ao número de arestas que a célula elegível	do Sítio	
N	compartilha com o sítio parcial para o cálculo da adequação		
1 <b>V</b>	composta da célula (controla a compactação da forma do sítio		
	resultante)		

# 3.5 Metodologia de localização de sítios eólicos

Uma metodologia para identificação de sítios eólicos promissores é sugerida com base na definição do problema de localização de sítios eólicos e na revisão da literatura internacional sobre métodos e abordagens empregados apresentados nas seções anteriores. A metodologia proposta é dividida em quatro etapas (Figura 33):

- Etapa 1 Definição da região de estudo: identificar uma região com áreas promissoras a partir de mapas de vento disponíveis do território e/ou levando em consideração outros critérios de caráter político ou estratégico. O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro é bastante indicado e adequado para orientar esse estudo inicial.
- Etapa 2 Levantamento e definição das restrições: estudar a região procurando identificar e definir as restrições físicas, humanas e ambientais a partir de dados e estudos prontamente disponíveis. O IBGE, IBAMA, Ministérios de Minas de Energia, ANEEL, ONS e Ministério dos Transportes possuem muita informação disponível publicamente. Algumas dessas instituições já disponibilizam os dados em formato georreferenciado e até possuem sistemas de consulta baseado em mapas interativos na internet. Nessa etapa são identificadas as áreas inadequadas ao desenvolvimento de parques eólicos
- Etapa 3 Identificação de sítios eólicos: definir os fatores que irão orientar a identificação de possíveis sítios eólicos dentro das áreas consideradas adequadas na etapa anterior. Para essa etapa são definidos os objetivos específicos que irão orientar a busca de sítios eólicos levando em consideração critérios técnicos, econômicos e ambientais. Ao final dessa etapa são geradas alternativas de sítios eólicos.
- Etapa 4 *Seleção de sítios eólicos promissores*: definir os critérios de avaliação e as preferências dos tomadores de decisão, especialistas e agentes envolvidos, e o método de decisão multicritério que será utilizado para avaliar e selecionar as alternativas mais promissoras. Essa etapa final é somente indicada na metodologia e, portanto não será abordada no restante do presente trabalho. Desse modo, o estudo de métodos de decisão multicritério para a seleção de sítios eólicos promissores já fica como uma proposta de trabalho futuro.

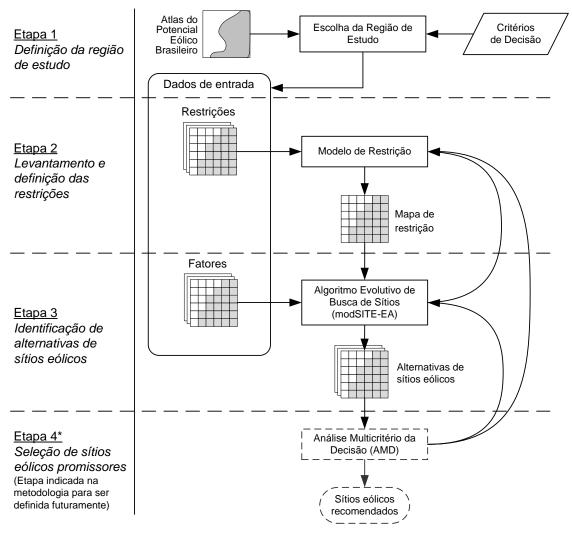


Figura 33 - Etapas e componentes da metodologia de localização de sítios eólicos proposta. As caixas com linha tracejada indicam processos previstos não definidos no presente trabalho.

### 3.5.1 Definição da região de estudo

A definição da região depende do objetivo do estudo que será desenvolvido. Tal objetivo pode ser orientado no caso de empreendedores por interesses mais econômicos procurando desse modo as áreas onde a velocidades de vento são consideradas adequadas para viabilizar economicamente um empreendimento eólico. Em geral, velocidades acima de 7 m/s no eixo do rotor do aerogerador são consideradas economicamente atrativas para a geração de energia elétrica de grande porte (EWEA, 2009) (CEPEL, 2001). A escolha da área de estudo pode ser orientada também a partir de interesses específicos em determina região associados a programas de desenvolvimento regional ou políticas energéticas. Simão e Haklay (2005) descrevem a metodologia que foi utilizada para orientar a escolha racional

da região de estudo para o projeto de pesquisa de desenvolvimento de um sistema participativo para promover a participação pública no debate da questão da localização de parques eólicos.

Após a definição da região de estudo, áreas menores são identificadas a partir de um valor de corte para velocidade média de vento considerado adequado à aplicação desejada. No caso desse trabalho são consideradas adequadas velocidades médias anuais superiores a 7 m/s para o desenvolvimento de parques eólicos de grande porte conectados à rede para comercialização de energia (para outras aplicações como sistemas de médio e pequeno porte velocidades médias de vento menores podem ser consideradas).

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro é bastante indicado e adequado para orientar esse estudo inicial considerando as dimensões da área de estudo. A definição da região pode ser feita através de mapas do Atlas em formato KMZ<sup>28</sup> usando a versão gratuita do Google Earth (Figura 34) ou através do aplicativo on-line do Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA<sup>29</sup>) resultado dos esforços do Programa Ambiental das Nações Unidas (United Nations Environment Programme) (Figura 35).

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> Mapas regionais do *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* estão disponíveis em: <a href="http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/index.php?task=livro&cid=1">http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/index.php?task=livro&cid=1</a>.

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Disponível em: <a href="http://en.openei.org/apps/SWERA/">http://en.openei.org/apps/SWERA/</a>.

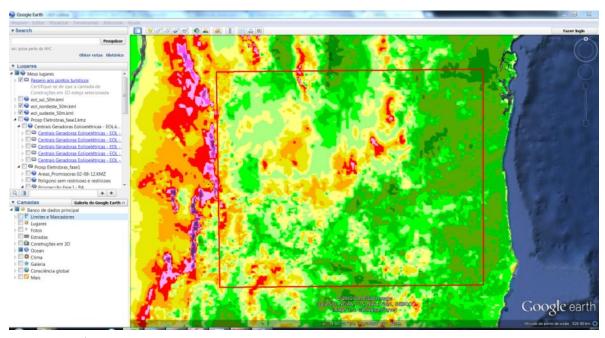


Figura 34 - Área do estudo de caso definida pela linha vermelha que compreende a região sul da Bahia e parte do Nordeste de Minas Gerais vista no *Google Earth* com o mapa de velocidade média anual de vento do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro na resolução de 1 km x 1 km.

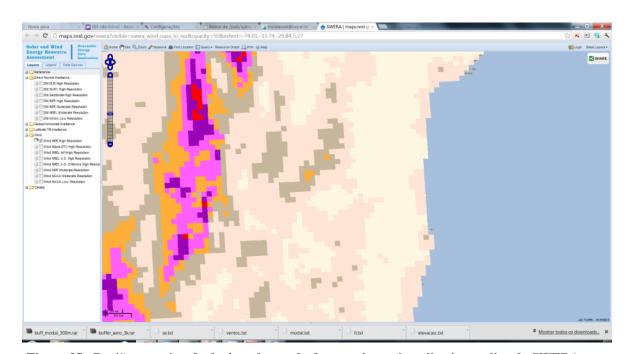


Figura 35 - Região aproximada da área de estudo de caso vista pelo aplicativo on-line do SWERA com o mapa de velocidade média anual de vento do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro na resolução de 10 km x 10 km.

A empresa *AWS Truepower*<sup>TM</sup> comercializa mapas de vento e dados em alta resolução (200 m) em diferentes alturas padronizadas que variam entre 10 a 100 m para todo o território brasileiro (AWS TRUEPOWER, 2012). Esses dados de velocidade e direção do vento permitem associar a cada local um indicativo da produção de energia bastante preciso e adequado à etapa inicial de seleção do sítio. Seria bastante apropriado usar essa informação como a variável de decisão dominante no modelo de localização de sítio eólico, já que a viabilidade econômica de um parque eólico está fortemente associada à produção de energia. Entretanto, obter essa informação envolve um custo associado que deve ser avaliado em relação a sua pertinência nessa fase inicial de seleção do sítio, pois existe uma série de restrições e fatores que também condicionam a escolha do local. Nesse sentido, uma análise preliminar utilizando os dados prontamente disponíveis poderia apoiar essa decisão de investimento. Os dados podem ser consultados e adquiridos a partir do serviço web *Wind Site Assessment Dashboard* (Figura 36).

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> Disponível em: <a href="https://windnavigator.com/index.php/cms/pages/wind-site-assessment">https://windnavigator.com/index.php/cms/pages/wind-site-assessment</a>.

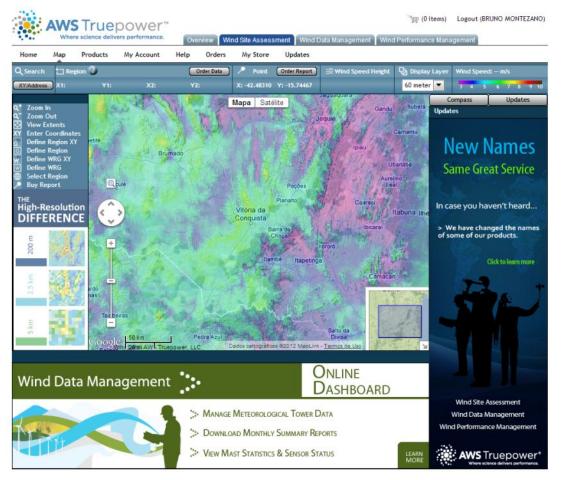


Figura 36 - Tela do serviço web *Wind Site Assessment Dashboard* da AWS Truepower apresentando o mapa de vento da área do estudo de caso (AWS TRUEPOWER, 2012).

A área do estudo de caso que será apresentado no próximo capítulo compreende a região sul da Bahia e parte do Nordeste de Minas Gerais indicada geograficamente na Figura 34.

### 3.5.2 Levantamento e definição das restrições

O guia de "boas práticas" para o desenvolvimento de parques eólicos da EWEA (2002) é bastante abrangente e resume os principais impactos ambientais causados (apresentado em detalhes no ANEXO I). O guia é uma excelente referência que deve ser consultada a fim de garantir que a localização do parque eólico seja adequada e que desse modo o risco de objeção ou restrição à implantação possa ser reduzido ou evitado. Ele sugere a definição de distâncias de separação para minimizar o impacto sobre outros usos da terra. Entretanto, nem todos os critérios podem ser facilmente atendidos, considerando

que a importância relativa de cada critério depende muito da perspectiva de cada agente envolvido e que características particulares do ambiente local podem determinar critérios específicos associados a uma área particular ou mesmo país (SPARKES e KIDNER, 1996). Esses impactos devem ser considerados no processo e restringem a área disponível.

A definição do conjunto de restrições apresentado na Tabela 15 foi baseada no guia da EWEA (2002), na literatura internacional e levando em consideração as informações disponíveis sobre a região de estudo.

Tabela 15 - Conjunto de restrições consideradas para a simulação do estudo de caso.

Categoria	Critério	Tipo	Fonte	Parâmetro
Física	Rodovias	Linha	PNLT/MT*	Buffer de 300m
	Ferrovias	Linha	PNLT/MT*	Buffer de 300m
	Aeroportos	Ponto	Google Earth**	Buffer de 15 km
Ambiental	Corpos d'água	Polígono e Linha	PNLT/MT*	Buffer de 300m
	Unidades de conservação	Polígono	PNLT/MT*	Polígono
	Costa litorânea	Linha	IBGE	Buffer de 4 km
Social	Proximidade de áreas	Polígono	IBGE e Google Earth***	Buffer de 2 km
	urbanas		Earth***	

<sup>\*</sup> Acervo de informações geográficas utilizado no Plano Nacional de Logística e Transporte<sup>31</sup> do Ministério dos Transportes de 2010

Dois tipos de restrições são definidos em função dos parâmetros: *polígono* e *buffer*. O parâmetro *polígono* descreve a localização real da restrição dentro da paisagem e *buffer* faz referência à área localizada dentro de uma determinada distância da localização do objeto.

Os aerogeradores bem instalados são estruturas estáveis e seguras. Entretanto, é recomendada por segurança uma distância no mínimo equivalente a duas vezes a altura da base do rotor (considerada no caso de 150 metros) de rodovias, ferrovias e linhas de transmissão, o que resulta em um buffer de 300 metros.

<sup>\*\*</sup> Informações obtidas através de imagens de satélite do aplicativo Google Earth

<sup>\*\*\*</sup> Mapa de coordenadas de localidades obtido no acervo de informações on-line do IBGE<sup>32</sup> e posterior identificação do perímetro urbano a partir de imagens de satélite do aplicativo Google Earth

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> Disponível em: <a href="http://www2.transportes.gov.br/bit/01-inicial/pnlt.html">http://www2.transportes.gov.br/bit/01-inicial/pnlt.html</a>. Acesso em: 10 out. 2012.

<sup>-</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> Disponível em: <a href="ftp://geoftp.ibge.gov.br/organizacao\_territorial/localidades/Google\_KML/">ftp://geoftp.ibge.gov.br/organizacao\_territorial/localidades/Google\_KML/</a>. Acesso em: 10 out. 2012.

Os aerogeradores podem representar um risco de colisão com aeronaves voando baixo e podem interferir na operação adequada do radar, pela limitação da capacidade de controle aéreo e na instrumentação de sistemas de pouso de aeronaves. Portanto, quando o sítio eólico em estudo localizar-se próximo a um aeródromo é necessário um estudo técnico e posterior solicitação de autorização junto às autoridades do CINDACTA / Ministério da Aeronáutica (LACTEC, 2007). A distância mínima de 15 km de aeroportos e aeródromos foi definida com base na literatura.

Atenção especial deve ser dada as reservas naturais, as áreas vizinhas e habitat de alto valor para conservação natural. O Brasil possui áreas protegidas consideradas de rica biodiversidade e beleza cênica, criadas por Decreto presidencial ou Lei, denominadas de Unidades de Conservação. Apesar de existirem algumas UCs de Uso Sustentável que possibilitam o desenvolvimento de parques eólicos com restrições que devem ser consultadas junto a ICMBio, todas as UCs serão evitadas, pois em geral resultam em uma dificuldade adicional na obtenção de licenças ambientais.

A região próxima à costa é considerada uma paisagem de grande beleza cênica e biodiversidade, onde inclusive estão localizadas muitas das UCs, e costuma ser bastante habitada e/ou destino turístico. Nesse contexto, foi definida uma distância mínima de 4 km da costa, apesar dessa região normalmente possuir ventos intensos de alta qualidade em função da boa exposição do local, a rugosidade baixa e do efeito local das brisas marinhas.

A distância de 300 metros de corpos d'água foi definida com base na distância de segurança, pelo fato de representarem zonas de alta confluência e por questões ecológicas relacionadas ao regime hidrológico do local.

As áreas urbanas são locais considerados bastante povoados. Nesse sentido, parques eólicos não devem ser localizados tão próximos dessas áreas de modo que possam afetar injustificadamente a amenidade de tais propriedades através de ruído, cintilação de sombra, dominação visual ou luz refletida. Em geral, a distância necessária para atenuar o ruído dos aerogeradores é próxima à distância de segurança utilizada e bem menor do à distância usada para evitar dominância visual que varia até 2 km. Portanto, uma distância mínima de 2 km de áreas urbanas é considerada suficiente para atenuar o impacto sobre a amenidade do local em relação ao ruído e a dominância visual.

### 3.5.3 Identificação de sítios eólicos

Após o levantamento e a definição dos critérios de restrição relevantes à área de estudo e ao problema de localização de parque eólicos, um *mapa de restrição* é criado a fim de identificar as áreas inadequadas. Esse processo restringe o espaço geográfico de busca. Assim, as áreas classificadas como adequadas na etapa anterior definem o espaço de soluções viáveis do problema de identificação de sítios eólicos.

Essa etapa é dividida em duas fases. Primeiro, a área disponível (adequada) é avaliada em relação ao conjunto de critérios técnicos e econômicos selecionados a fim de identificar as áreas mais promissoras para o desenvolvimento de parques eólicos. Cada unidade do modelo do espaço geográfico recebe uma avaliação considerando o grau de satisfação do critério selecionado e um mapa de atributo é gerado. Depois, os mapas de atributo são combinados com a importância relativa de cada critério resultando em um mapa composto que atribui um único valor a cada localidade associado ao grau de atendimento do objetivo, que no caso é identificar os locais mais promissores. Como resultado da primeira fase é gerado um mapa de adequação considerando o objetivo final de maximização da adequação total do sítio que será identificado na fase seguinte. Na segunda fase, um conjunto de sítios promissores é então identificado a partir de um procedimento de otimização espacial que considera o custo e a restrição imposta sobre cada unidade espacial que compõe o sítio e o atendimento dos critérios espaciais de compactação e de tamanho do sítio desejado.

Um mapa de adequação pode ser gerado a partir da aplicação de um método de decisão multicritério sobre o conjunto de mapas de atributo associado aos critérios identificados (diagrama à esquerda da Figura 37). Essa abordagem avalia previamente a adequação de cada unidade espacial e, desse modo reduz o tempo de processamento do algoritmo de otimização espacial. Entretanto, somente uma combinação estática dos pesos dos critérios pode ser avaliada de cada vez. Uma abordagem alternativa poderia considerar cada mapa de atributo como uma variável de decisão na função objetivo, permitindo dessa forma variar dinamicamente as avaliações e os pesos dos critérios considerados durante o processo de otimização do problema (diagrama à direita da Figura 37) (BROOKES, 2001).

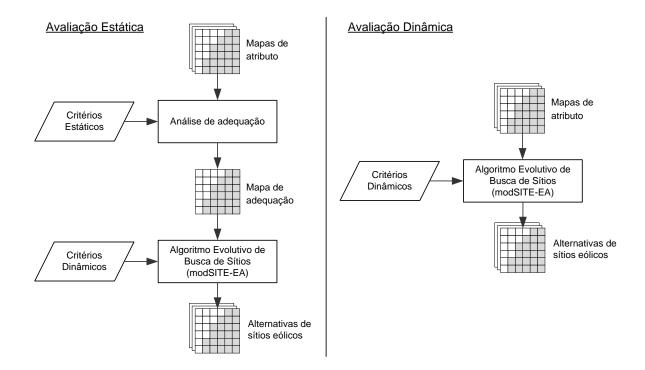


Figura 37 - Formas de avaliação das unidades espaciais de um modelo de dados *raster*. Na *avaliação estática* (à esquerda) todos os critérios estáticos são pré-processados para gerar um único mapa de adequação. Na *avaliação dinâmica* (à direita) não existem critérios estáticos, os mapas de atributos são avaliados diretamente pelo AE de busca de sítio.

Na Seção 2.5, os principais fatores técnicos e econômicos que orientam a localização de sítio eólicos promissores foram identificados e discutidos. Além disso, foram discutidas algumas estratégias para modelar esses critérios no problema. Esse conjunto de fatores foi reunido com base na literatura internacional e em práticas consolidadas por especialistas no tema. Os objetivos gerais que suportam a seleção desses critérios são:

- Maximizar a produção de energia (depende diretamente da existência de ventos intensos e constantes na região);
- Minimizar o custo de capital e custos operacionais; e
- Atender as restrições impostas pelo sítio.

A lista dos critérios considerados na etapa de identificação de sítios eólicos promissores é apresentada de forma resumida na Tabela 16. Esses critérios são descritos a seguir com exceção do critério de ocupação e uso do solo, que não será considerado no modelo em função da dificuldade de obtenção de dados de qualidade e da demanda

cognitiva e tempo necessários para avaliar as diferentes classes de ocupação e uso do solo em função da sua compatibilidade com a energia eólica.

Tabela 16 - Conjunto de critérios considerados e estratégias de modelagem sugeridas para o problema de localização de sítios eólicos promissores.

Critério	Estratégia de modelagem	Categoria	Tipo
Topografia	Na ausência de dados de vento confiáveis na escala do problema de identificação de sítios eólicos, características do terreno consideradas favoráveis à energia eólica são identificadas e mensuradas utilizando o modelo de elevação digital STRM de alta resolução (aprox. 92m x	Físico	Fator
	92m).		
Área disponível	Toda a área sem restrições é considerada disponível para abrigar um parque eólico. O tamanho da área necessária para o sítio é calculada em função da densidade de potência de 6 MW/km² e do tamanho do parque desejado.	Físico	Restrição espacial
Forma do sítio	Controle da forma espacial da solução para evitar que sítios eólicos inviáveis sejam gerados.	Técnico	Restrição espacial
Conexão à rede elétrica	A melhor abordagem para o problema de avaliação da conectividade e de custo de conexão é baseada no conceito de distância efetiva. Métodos de caminho de mínimo custo baseados em mapas de custo ou fricção são considerados os mais adequados e simples para tratar esse problema. Entretanto, o problema de identificação de corredores de linha de transmissão é considerado tão complexo quanto problema de identificação de sítios eólicos. Assim será utilizada uma avaliação baseada na medida de proximidade de subestações da região.	Técnico	Fator
Acessibilidade	A mesma abordagem para o critério de conexão à rede elétrica é sugerida aqui. A avaliação da acessibilidade será baseada em uma medida de proximidade com a malha rodoviária composta por vias principais e secundárias asfaltadas.	Técnico	Fator
Ocupação e uso do solo (não utilizado)	Em virtude da pobreza dos dados disponíveis e da demanda cognitiva necessária para avaliar as diversas paisagens existentes em relação à sensibilidade a energia eólica e capacidade de instalação de parques eólico suportada, esse critério não será avaliado no modelo de identificação de sítios eólicos.	Econômico	Fator

## 3.5.3.1 Topografia

A busca de um sítio eólico promissor deve ser sempre orientada pela existência de ventos intensos no local, pois além do recurso eólico ser bastante localizado, para maioria dos projetos, a viabilidade econômica é significativamente mais sensível a mudanças na produção de energia elétrica do que em custos de infraestrutura. Entretanto, na falta de dados de vento confiáveis na escala do problema de identificação de sítios eólicos, características topográficas consideradas favoráveis à energia eólica são buscadas.

O uso de indicadores topográficos para orientar na escolha do sítio são abordagens usualmente empregadas em muitas situações onde existe pouca ou nenhuma informação sobre a condição do vento no local. Essa abordagem, entretanto, exige um profundo conhecimento da influência da topografia no comportamento dos ventos na camada limite atmosférica. Hiester e Pennell (1981) apresentam uma revisão sobre indicadores topográficos do potencial eólico considerando os aspectos meteorológicos da localização de parques eólicos.

A meteorologia da energia eólica, que tem interesse na faixa atmosférica de 10 a 200 m acima do solo, divide os efeitos da topografia em três categorias típicas: rugosidade, obstáculos e relevo. Conforme já foi discutido anteriormente, a qualidade da informação disponível não permite identificar de forma adequada os efeitos de microescala da rugosidade da superfície e de obstáculos no local, sendo nesse caso necessária uma visita ao local. Mas a informação disponível do relevo pode ser utilizada para indicar o comportamento geral dos ventos na região e assim apontar áreas com boa probabilidade de existência de ventos.

O uso de técnicas de *análise espacial* e de *modelagem de superfície* em um modelo digital de elevação permite caracterizar vários aspectos do terreno a partir da extração de medidas objetivas. O DEM da STRM na resolução aproximada de 92 m x 92 m de todo o território brasileiro está disponível publicamente<sup>33</sup> e pode ser usado para esse fim (WEBER, *et al.*, 2004).

133

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> Modelos Digitais de Elevação do SRTM adaptados para o sistema de referência oficial brasileiro e divididos por unidades da federação estão disponíveis em: http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo.

Alguns critérios de avaliação do relevo foram identificados na Seção 2.5.1:

- Exposição: avaliação do grau de exposição ao vento no local em função da proximidade dos topos de morros elevados acima da média da região e em áreas de gradiente de inclinação menor ou igual a 10%.
- Declividade: avaliação da gradiente de inclinação do relevo do local. O terreno deve ter inclinação em média menor que 10% para permitir a montagem do aerogerador no local e reduzir custos associados às obras civis.
- Complexidade: avaliação do grau de planeamento e suavidade do relevo do local. A
  complexidade do terreno é avaliada em função de duas medidas: grau de
  aproximação do relevo ao um plano e grau de irregularidade em função do padrão
  de variação da altura no terreno.
- Sombreamento de relevo: avaliação do grau de influência no local de terrenos mais elevados localizados a montante da direção predominante do vento na região.
- Índice de complexidade do relevo (RIX): calcula o percentual da área vizinha ao local em um raio de 3,5km com gradiente de inclinação maior ou igual a 30%.

O critério de exposição está associado ao grau de exposição ao vento considerando a influência do relevo na vizinhança. Esse critério é avaliado em função da proximidade dos topos de morros elevados acima da média da região e em áreas de gradiente de inclinação menor ou igual a 10%. Berry (2007) descreve um procedimento comum para identificação das linhas de cumeeiras de terrenos mais elevados a partir de um modelo digital de elevação que é utilizado para o cálculo do critério de exposição. O procedimento é dividido em onze etapas descritas na Tabela 17 em paralelo com as operações usadas no programa ArcGIS.

Tabela 17 – Etapas do procedimento de cálculo do critério de exposição usando DEM em paralelo com as operações executadas no programa ArcGIS.

#		Etapa	Operação no ArcGIS
1	M data and	Realiza uma operação focal para suavizar a superfície para eliminar mudanças de elevação súbitas e frequentemente artificiais.	Neighborhood > Block statistic [forma de círculo, raio de 3 células, cálculo da média]
2		Simula o fluxo de água caindo na superfície e descendo a encosta pelo caminho mais inclinado. Um mapa de fluxo é gerado onde os locais com os menores valores indicam os locais	Hidrology > Flow direction e Hidrology > Flow accumulation

#		Etapa	Operação no ArcGIS
		referentes aos cumes.	
3		Reclassifica o mapa de fluxo para isolar as localizações contendo somente um caminho de escoamento (valores de 1 a 2) identificando os candidatos a cumes do relevo.	Reclassify [1 a 2 recebe 1; >3 recebe 0]
4		Realiza uma operação focal para atribuir o valor da maioria da vizinhança a cada localidade do mapa resultante da operação anterior. Esse passo é realizado para remover os picos isolados ou muito pequenos identificados.	Neighborhood > Block statistic [forma de círculo, raio de 1 célula, cálculo da maioria]
5		Agrupa as células adjacentes para identificar áreas de cumeeiras.	Generalization > Region Group
6		Calcula a altura média dos grupos identificados na etapa anterior.	Zonal > Zonal Stat [cálculo da média]
7		Elimina os grupos com alturas médias inferiores a elevação média do terreno restando somente os locais referentes às cumeeiras mais altas (mapa de cumes).	Map math > Boolean [ (elevação do grupo) > E(elevação) ]
8	35°C	Gera um mapa de declividade da elevação.	Slope
9		Isola as áreas com inclinações suaves (gradiente =<10%).	Map math > Boolean [ (gradiente) <= 10%]

#	Etapa	Operação no ArcGIS
10	Realiza uma operação focal para atribuir o valor da maioria da vizinhança a cada localidade do mapa resultante da operação anterior. Esse passo é realizado para remover os pontos isolados ou áreas muito pequenas identificadas deixando áreas relativamente grandes com inclinações suaves (mapa de áreas planas).	Neighborhood > Block statistic [forma de círculo, raio de 1 célula, cálculo da maioria]
11	Calcula a distância efetiva das áreas de cumeeira considerando os locais com inclinações não suaves (gradiente >10%) como barreira absoluta. O resultado é um mapa indicando a proximidade das linhas de cumeeira em uma área relativamente plana.	Reclassify "mapa de cumes" [0 recebe null]*; Reclassify "mapa de áreas planas" [0 recebe null]*; e Cost Distance [objetos "mapa de cumes", obstáculos "mapa de áreas planas"].

<sup>\*</sup> Operações intermediárias de ajuste do mapa de entrada para outra operação.

O critério da declividade considera que os sítios adequados tecnicamente para construção de parques eólicos devem ter gradientes de inclinação em média menores do que 10% para permitir a montagem do aerogerador no local e reduzir custos com obras civis (LACTEC, 2007). A declividade também está associada à complexidade do terreno, onde em geral se considera que para gradientes maiores do que 30% (ou 17°) acontece o descolamento do escoamento causando perdas na velocidade do vento e aumento da turbulência no local (veja Seção 2.1.1). A declividade é uma medida básica usada na análise espacial de terreno normalmente programada em aplicativos SIG. A abordagem mais simples de calcular a declividade considera as oito elevações vizinhas da célula da grade no centro de uma janela de 3 por 3. Mesmo assim, ainda existem diversos modos de calcular a declividade da célula utilizando o valor da inclinação média, máxima, generalizada ou do plano ajustado. Portanto, cada programa SIG pode implementar o cálculo de declividade de uma forma diferente, o que resulta em mapas em princípio um pouco diferentes, mas que podem influenciar bastante na análise (BERRY, 2007). O aplicativo ArcGIS, por exemplo, utiliza o valor máximo de inclinação na análise de declividade.

O critério de complexidade avalia o grau de irregularidade (suavidade) da superfície e o grau de aproximação do terreno ao plano (inclinação) a partir de técnicas de caracterização das condições do micro terreno. Um procedimento bastante utilizado que pode avaliar o grau irregularidade do micro terreno envolve a comparação da tendência da

superfície em relação à elevação real. Primeiro o mapa de tendência da superfície é calculada utilizando um operador de vizinhança que atribui a cada célula o valor da elevação média encontrada no conjunto formado pela célula central e células vizinhas. Depois um *mapa de diferenças* é gerado subtraindo os valores de elevação da superfície original dos valores da tendência da superfície. Esse mapa indica o grau de irregularidade do terreno associando valores positivos a locais protuberantes e negativos a afundamentos em relação à tendência da superfície, enquanto valores próximos de zero indicam locais com relevo mais suave favorável ao escoamento do vento.

O grau de aproximação do terreno ao plano é avaliado a partir de diferenças de elevação das células vizinhas em relação à célula central (considerando uma janela móvel de 3 x 3 células). Essa medida pode ser calculada como a média dos desvios absolutos ou como desvio absoluto máximo. Os valores próximos de zero indicam terrenos mais planos, enquanto valores maiores indicam terrenos mais inclinados ou irregulares. O aplicativo aberto *Quantum GIS* implementa os modos de análise de DEM de *índice de posição topográfica* (IPT), e *índice de rugosidade do terreno* (IRT) e *rugosidade*, associados à medida de suavidade do terreno e as medidas de aproximação do plano utilizando o desvio absoluto médio e o desvio absoluto máximo respectivamente (WILSON, *et al.*, 2007). Em resumo, a complexidade do micro terreno pode ser avaliada utilizando diferente métricas que resultam em mapas similares, mas com algumas diferenças que devem ser consideradas na análise final. A Figura 38 ilustra algumas medidas de análise do micro terreno que podem ser utilizadas para avaliar do grau de complexidade do terreno.

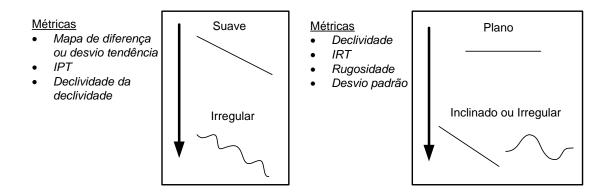


Figura 38 – Métricas de avaliação do grau de complexidade do terreno que podem ser usadas para avaliar a adequação do relevo do local para o aproveitamento da energia eólica.

Portanto, o critério de complexidade do terreno é avaliado como uma medida de aspereza ou irregularidade do terreno (o contrário de suave) aonde quanto mais áspero for o terreno maior tende ser a ocorrência de turbulência no local. Além disso, terrenos mais irregulares resultam em custos adicionais de obras civis para construção de vias de acesso e das fundações dos aerogeradores.

O critério de sombreamento de relevo proposto aqui nesse trabalho é uma abordagem diferente de avaliação do relevo não vista na literatura conhecida de modelos de localização de parque eólicos. Esse critério estende o princípio de sombreamento causado por obstáculos ao relevo vizinho (veja Seção 2.1.1.2). Nessa condição, um morro mais elevado a montante em relação ao sentido de fluxo do vento pode vir a perturbar o escoamento do vento no local. Caso a gradiente de inclinação da encosta de descida do morro em relação ao fluxo do vento for superior a 30%, um descolamento do fluxo do vento deverá ocorrer nesse ponto e se estender a uma distância no plano de 40 vezes a altura relativa entre o ponto de descolamento e o local avaliado. O princípio do cálculo do critério de sombreamento de relevo é ilustrado na Figura 39.

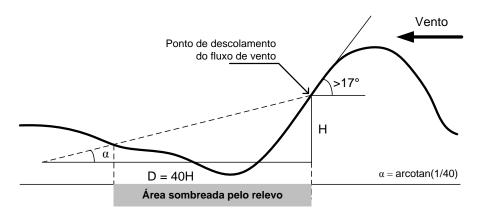


Figura 39 – Princípio de avaliação do critério de sombreamento do relevo, onde a área cinza indica os locais que sofrem influência do relevo a montante do vento.

O sombreamento de relevo é calculado considerando o fluxo do vento vindo dos quatro pontos cardeais (Norte, Leste, Sul e Oeste) e dos quatro pontos colaterais (Nordeste, Sudeste, Sudoeste e Noroeste) ponderados pela frequência multiplicada pela velocidade média dos ventos elevada ao cubo em cada direção obtida do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. A ponderação pela velocidade média ao cubo é uma forma de avaliar a energia

eólica disponível em cada direção. O critério de sombreamento de relevo é normalizado com valores variando entre 0 (sem sombreamento) e 1 (completamente sombreado) associados cada localidade. Essa hipótese do modelo de sombreamento do relevo baseada no princípio de sombreamento de obstáculos parece coerente, mas ainda precisa ser validada usando programas de simulação do vento baseados em técnicas computacionais de dinâmica dos fluídos.

O critério de RIX é uma medida objetiva da declividade ou irregularidade do relevo do terreno ao redor do sítio definida como a percentagem do terreno mais íngreme do que uma inclinação crítica (um gradiente de inclinação de 30% ou 17°) (BOWEN e MORTENSEN, 2004). Ele é avaliado nesse trabalho como o percentual da área vizinha ao local em um raio de 3,5km com gradiente de inclinação maior ou igual a 30%. Uma diferença fundamental desse critério em relação critério de complexidade apresentado anteriormente consiste na extensão da área vizinha considerada no cálculo, que no caso anterior considera somente as células adjacentes (o que equivale a uma distância de aproximadamente 92 metros no DEM utilizado). Desse modo o critério de RIX considera a influência das áreas vizinhas no comportamento do vento experimentado pelo sítio.

## 3.5.3.2 Área disponível

O critério de área disponível está associado à existência de restrições construtivas no local para a implantação de parques eólicos. Esse critério é formulado como uma restrição espacial que determina a área do sítio necessária para instalação de um parque eólico com uma dimensão previamente definida pelo usuário. Desse modo, o tamanho da solução (sítio) em unidades espaciais é definido em função da potência desejada do parque eólico pela fórmula:

$$p = teto\left(\frac{PT}{DP * a}\right) \tag{17}$$

Onde:

p é o número de unidades espaciais da solução (sítio);

PT é a potência total do parque eólico;

DP é a capacidade instalada de potência por área (no caso é considerado o valor de 6 MW/km²); e

a é a área da célula da grade do modelo raster (92 m x 92 m  $\approx$  0,0085 km<sup>2</sup>).

#### 3.5.3.3 Forma do sítio

O critério de forma do sítio é uma medida da forma espacial da solução a fim de evitar que sítios inviáveis sejam gerados. A medida de forma do sítio é calculada em função do perímetro e da área da solução usando o *índice de forma* (Seções 3.3.2 e 3.4.1). Esse critério é implementado no modelo como uma penalidade na função objetivo resultando na fórmula:

$$\min f = \sum_{v \in V_f} c(v) + h * \max \left\{ 0, \frac{P}{\sqrt{R}} - C_f \right\}$$
 (18)

Onde:

c(v) é o atributo de custo (ou utilidade) do vértice v;

P é o perímetro do sítio representado pelo vértice em V';

R é a área do sítio, que para o caso do modelo espacial *raster* é calculado como R = a \* |V'|, onde a equivale a área da célula da grade regular e V' é o conjunto de vértices que compõe a solução;

h é o coeficiente para o ajuste da penalidade de forma; e

 $\mathcal{C}_f$  é o limite do valor do *índice de forma* a partir do qual a solução passa ser penalizada.

O valor de  $C_f$  pode ser calculado em função da potência PT do parque eólico considerando a disposição dos aerogeradores em uma única fileira perpendicular a direção predominante do vento. A fórmula para o cálculo do parâmetro  $C_f$  considerando o modelo de aerogerador E-70 de 2 MW e o espaçamento 4 x 8 diâmetros de rotor (D) (equivalente a 3 x 6 células da grade) é:

$$C_f(PT) = \frac{2 * \left(3 * \frac{PT}{2} + 6\right)}{\sqrt{\left(3 * \frac{PT}{2}\right) * 6}}$$
(19)

onde PT é a potência total do parque eólico. A Figura 40 apresenta o cálculo de  $C_f$  para um parque eólico de 10 MW.

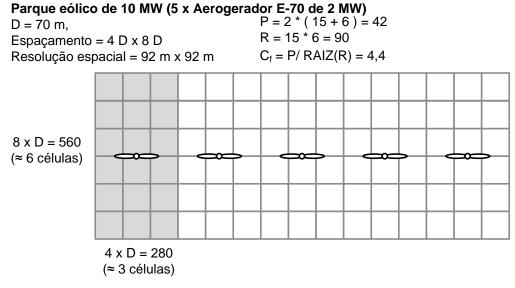


Figura 40 – Representação espacial de um Parque Eólico de 10 MW formado por 5 aerogeradores dispostos em uma única fileira em um modelo raster.

### 3.5.3.4 Conexão à rede elétrica e Acessibilidade

Os critérios de conexão à rede elétrica e acesso ao local (acessibilidade) em geral não costumam ser utilizados em modelos de localização ou são modelados na forma de restrições com a definição de distâncias máximas aceitáveis, e não como fatores que podem melhorar ou piorar a adequação do sítio a implantação de um parque eólico. Esses critérios refletem considerações de caráter técnico e econômico que podem tornar um sítio com ventos promissores inviável.

A conexão à rede, além de ser uma exigência técnica para permitir o despacho e a comercialização da eletricidade gerada, é o segundo item de maior custo na implantação de um parque eólico. O custo de construção da linha de transmissão é o que apresenta maior variação entre os custos de conexão à rede, sendo diretamente proporcional ao seu comprimento. Como o vento é caracterizado como um recurso geograficamente distribuído,

os parques eólicos frequentemente são espalhados sobre grandes áreas geográficas e em regiões predominantemente rurais, onde a rede elétrica em geral é fraca. Desse modo, a distância até um ponto de conexão à rede pode resultar em custos significativos ao empreendimento em função da distância entre o sítio com recurso eólico e o ponto de conexão à viável. Assim, a distância ao ponto de conexão à rede pode ser considerada como um fator importante no problema de localização de sítios eólicos, do ponto de vista técnico e econômico. Entretanto estimar a distância efetiva para a conexão do parque eólico até o ponto de conexão é considerado um problema de decisão espacial tão complexo como a localização do sítio eólico que envolve a localização da linha de transmissão no espaço.

A estratégia mais apropriada para modelar o critério da conexão à rede no problema de localização de sítios eólicos se baseia no método do *caminho de mínimo custo* usado para solucionar o problema de localização de uma linha de transmissão no espaço. Esse método se baseia no uso de um *mapa de custo ou fricção* elaborado a partir de métodos de decisão multicritério. O mapa de custo associa a cada célula do modelo *raster* um valor que está relacionado ao custo ou esforço necessário para de atravessar a célula, baseado nas preferências relativas dos tomadores de decisão. A partir do mapa de custo é gerada uma superfície de custo acumulado que caracteriza a conectividade ótima de um ou vários possíveis pontos de conexão à rede para todos os outros locais no espaço de busca. E assim, através dessa superfície de custo acumulado em relação aos possíveis pontos de conexão à rede é possível avaliar o menor custo de conexão do sítio identificado a uma subestação ou saber se existe conectividade com pelo menos um ponto de conexão apropriado considerando as restrições existentes. Alguns modelos de localização de linhas de transmissão baseados no método do *caminho de mínimo custo* podem ser encontrados em(BAGLI, *et al.*, 2011) (HOUSTON e JOHNSON, 2006) (SCHMIDT, 2009).

O critério de acessibilidade pode ser avaliado em função da distância efetiva da rodovia mais próxima levando em consideração as condições do terreno e obstáculos no trajeto utilizando o mesmo método usado para a avaliação do critério de conexão à rede.

Para simplificar o estudo de caso apresentado no presente trabalho, esses dois critérios foram avaliados através de uma medida de proximidade das subestações na região

e das rodovias principais e secundárias. A análise de proximidade é uma função comum programada na maioria das ferramentas SIG disponíveis.

# 3.6 Considerações finais

Existem diferentes modelos de localização de parques eólicos baseados na integração de sistemas de informação geográfica e técnicas de análise multicritério da decisão (Seção 3.2). Tais modelos apresentam características específicas em relação à ao conjunto de critérios de decisão selecionado e a escolha do método de decisão multicritério, que podem ser justificadas pelas condições particulares do ambiente físico, econômico e cultural regional. Por outro lado, todas essas aplicações têm em comum a extensão geográfica regional do problema e a apresentação da solução na forma de um ou mais mapas temáticos que identificam as áreas favoráveis ou inadequadas ao desenvolvimento de parques eólicos.

Os mapas *raster* de adequação gerados por modelos SIG-AMD são bastante úteis para apoiar a solução de problemas estratégicos de planejamento espacial ou de avaliação de políticas específicas na medida em que permitem responder a perguntas como "qual o potencial eólico aproveitável?", ou "quais são as áreas mais indicadas para o desenvolvimento da energia eólica na região?". Entretanto, esses mapas somente não permitem dizer qual é o local mais apropriado para a implantação de um parque eólico de 50 MW, pois dentro de uma área podem existir diversas soluções possíveis. Esse tipo de problema de otimização espacial, considerado bastante complexo e difícil de resolver, é conhecido na literatura como problema de *busca de sítio* (Seção 3.3).

Diversas abordagens já foram propostas para solução de problema de busca de sítio usando métodos exatos, no domínio da programação matemática, ou métodos aproximados baseado em heurísticas. Métodos exatos garantem encontrar a melhor solução do problema e foram aplicados com sucesso em vários problemas de busca de sítio. Entretanto, a eficácia dos algoritmos exatos é limitada pelo tamanho do problema que pode ser tratado. Nesse contexto, os algoritmos heurísticos, apesar de não garantirem a melhor solução, são capazes de encontrar soluções "quase ótimas" para problemas com dimensões bem maiores de

forma eficiente. Dentro da classe dos métodos heurísticos, modelos baseados em algoritmos evolutivos aplicados ao problema de busca de sítio têm se mostrado bastante promissores, não só pelo fato de resolverem o problema de forma efetiva, mas também pela capacidade de exploração do espaço de busca com geração de um conjunto de soluções do problema inerente dos AEs. Essa propriedade dos AEs é bastante favorável ao processo de tomada de decisão, pois problemas de decisão espacial em geral são mal ou semiestruturados e, nesse sentido, a geração de alternativas promissoras pode auxiliar os tomadores de decisão a explorar melhor o espaço de solução e a estabelecer suas prioridades.

Por fim, uma metodologia para a localização de sítios eólicos é proposta utilizando modelos SIG-AMD e AE. Essa metodologia é dividida em quatro etapas: (1) definição da região de estudo; (2) levantamento e definição das restrições; (3) identificação de sítios eólicos e (4) seleção de sítios eólicos promissores. A etapa inicial de definição da região de estudo se apoia em um processo racional de decisão que favorece uma escolha mais consistente e uniforme, e justifica a delimitação da região de estudo.

O levantamento e a definição das restrições da região de estudo são realizados a partir de pesquisa em escritório e consultas com especialistas e outros agentes envolvidos. Dessa etapa, é obtido um modelo de restrições que aplicado sobre a região de interesse resulta em um mapa de restrição que identifica os locais inadequados para implantação de parques eólicos. Em geral, o método *Conjuntivo* é utilizado na criação desse mapa e pode ser facilmente implementado em SIG usando operações *Booleanas*.

A etapa de *identificação de sítios eólicos* pode ser dividida em duas fases: *análise de adequação* e *busca de sítios*. A *análise de adequação* compreende a aplicação de um método de decisão multicritério a um conjunto de mapas de atributo e resulta em um único *mapa de adequação*. O método de *combinação linear ponderada* ou WLC normalmente é o mais utilizado em função da sua facilidade de implementação em SIG e por ser de fácil entendimento e intuitivamente atrativo para os tomadores de decisão. Porém outros métodos de decisão multicritério também podem ser utilizados como a *Teoria da Utilidade Multiatributo*, também conhecida por *MAUT (Multi-Attribute Utility Theory)*. Em seguida, os *mapas de adequação* e *de restrição* são utilizados como entrada para o algoritmo de *busca de sítios* que irá identificar um conjunto de sítio eólico promissores que atende as

restrições impostas pelo problema. Essas duas fases também podem ser implementadas diretamente no algoritmo de busca de sítio, entretanto a criação de um *mapa de adequação* intermediário pode auxiliar o tomador de decisão a conhecer a região de estudo e entender as relações de compensação entre os critérios.

A etapa final de *seleção de sítios eólicos promissores* é somente indicada na metodologia e não será considerada no estudo de caso, pois, dado que um número reduzido de alternativas de sítios eólicos já foi identificado, o problema seleção dos sítios eólicos mais promissores se torna um problema de decisão multicritério comum para o qual existe uma grande variedade de métodos de decisão multicritério aplicáveis.

# 4 Estudo de caso e resultados

Nesta seção a metodologia proposta é aplicada a um estudo de caso na região que compreende o sul da Bahia e parte do Nordeste de Minas Gerais indicada geograficamente na Figura 34. Essa região foi escolhida em função da experiência e conhecimento obtidos pelo autor em atividades de prospecção de sítios eólicos realizadas na região. Desse modo, será possível avaliar os resultados da metodologia considerando o conhecimento prévio dos locais mais promissores e também dos menos promissores. A seguir cada etapa da aplicação da metodologia (apresentada na Seção 3.5) ao estudo de caso é descrita de forma sucinta e objetiva considerando a tarefa de seleção de sítios eólicos promissores para inspeção no local. O objetivo geral do estudo será localizar sítios promissores para a implantação de parques eólicos de 10 MW conectados à rede para fins de comercialização da energia gerada, ou seja, na modalidade de Produtor Independente de Energia (PIE).

# 4.1 Definição da região de estudo

A região definida para o estudo de caso é situada no interior do estado da Bahia próxima a fronteira com Minas Gerais (delimitada pelo quadrado com linha preta na Figura 41). Dentro da região é possível identificar áreas promissoras (com ventos superiores a 7 m/s segundo o *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* indicado pelas cores vermelha e roxa) próximas à cidade de Vitória da Conquista, que representa o maior centro urbano da região com cerca de 300 mil habitantes.

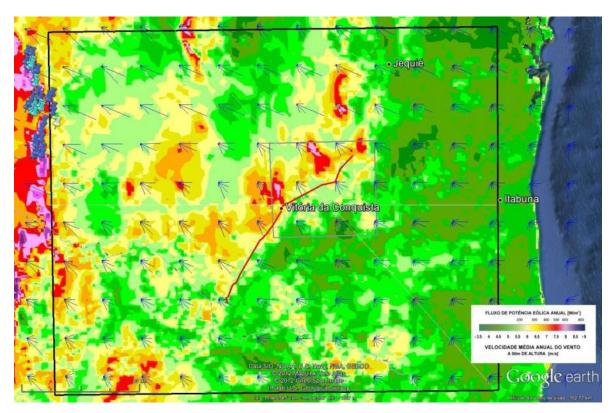


Figura 41 — Região de estudo delimitada pela linha preta vista no programa Google Earth sobreposta com a camada do *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. As cores que vão de amarelo a roxo indicam os ventos superiores a 6,5 m/s e as linhas azuis indicam a direção do vento na localidade. A área de análise é delimitada pelo quadrado de linha cinza.

Essa área promissora, entretanto está localizada em local mais baixo considerando a direção predominante do vento na região variando de Leste a Sudeste segundo o atlas eólico (Figura 42 e Figura 43). Conforme discutido na Seção 2.1, em função de problemas no modelo de relevo utilizado pelo atlas eólico é provável que o vento exista e não esteja indicado no local exato, mas próximo dele (possivelmente em locais próximos mais elevados). A direção predominante do vento na região varia de Leste a Sudeste, o que caracteriza um regime de vento bastante comportado favorável ao aproveitamento da energia eólica. Assim, a área que será utilizada na análise é definida pelo quadrado em cinza próximo a cidade de Vitória da Conquista.

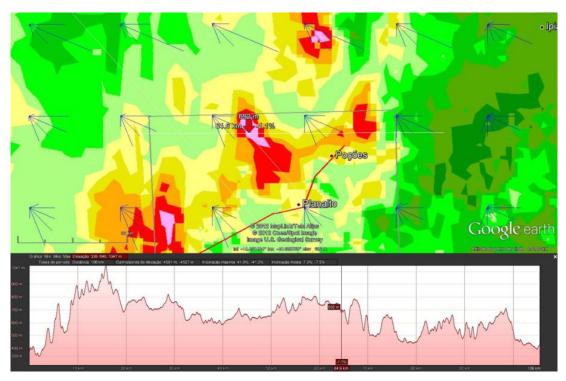


Figura 42 – Perfil de elevação do terreno visto pelo vento vindo da direção Leste (considerando o sentido da esquerda para direita no gráfico), onde a Seta vermelha mostra o local indicado pelo Atlas Eólico com o melhor vento.

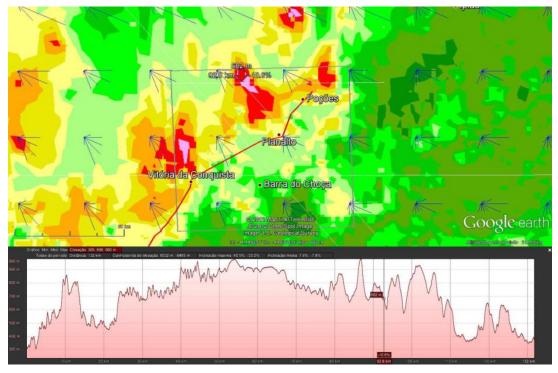


Figura 43 – Perfil de elevação do terreno visto pelo vento vindo da direção Sudeste (considerando o sentido da esquerda para direita no gráfico), onde a Seta vermelha mostra o local indicado pelo Atlas Eólico com o melhor vento.

A topografia da região é caracterizada por planaltos extensos elevados no interior do continente (com alturas acima de 900 metros) e planícies com elevações de cerca de 200 metros próximas ao litoral. A vegetação predominante é a caatinga, mas existem algumas áreas cobertas por vegetação cerrado. A vegetação caatinga é caracterizada por uma vegetação arbustiva com galhos retorcidos que perde suas folhas no período seco, característica do clima típico da região. A estatura média da vegetação caatinga varia entre 2 e 5 metros, o que representa uma paisagem de baixa rugosidade para aplicações de energia eólica de grande porte, com torres que variam de 80 a 100 metros. Entretanto, a área identificada com ventos promissores é bastante antropizada, com a presença de áreas de roçado, cultura de café e algumas pastagens, e de grandes áreas de cultivo de eucalipto, uma atividade observada no local que parece estar em franca expansão. A árvore de Eucalipto chega a alturas de 30 a 50 metros e o seu cultivo normalmente é feito em blocos, com árvores pouco espaçadas, que representam grandes obstáculos ao escoamento do vento e assim restringem a área disponível ao aproveitamento da energia eólica na região. Nesse sentido, essas áreas com cultura intensiva de Eucalipto poderiam ser identificadas e incluídas como uma restrição à localização de sítios eólicos. Entretanto, o estudo da ocupação e uso do solo da região seria necessário, mas não é objetivo desse trabalho ser exaustivo e resolver o problema real de localização de sítios eólicos promissores na região.

# 4.2 Levantamento e definição das restrições

Conforme discutido anteriormente, a definição do conjunto de restrições foi baseada no guia da EWEA (2002) e na literatura internacional considerando as informações disponíveis sobre a região de estudo. A Tabela 15 na Seção 3.5.2 apresenta a lista de restrições com as distâncias de afastamento consideradas. A Figura 44 ilustra as feições que representam as restrições: as linhas vermelhas indicam as rodovias principais, as linhas em azul são linhas de transmissão de média e alta tensão, o ícone em azul na forma de avião são aeroportos e os polígonos em amarelo são áreas urbanas. Das restrições consideradas, somente o mapa de hidrografia que compreende os rios e corpos d'água não é representado.

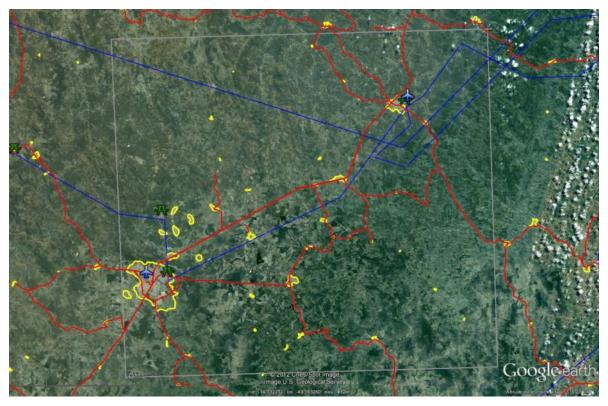


Figura 44 – Imagem de satélite da área de análise onde as linhas vermelhas indicam as rodovias principais, em azul as linhas de transmissão de média e alta tensão, o ícone em azul na forma de avião os aeroportos e os polígonos em amarelo são áreas urbanas.

A aplicação do modelo de restrições considerado sobre a área de análise resulta no *mapa de restrição* da Figura 45, onde as áreas em branco são consideradas inadequadas para a implantação de parques eólicos. Pode ser observado no mapa que as restrições reduzem bastante à área disponível.

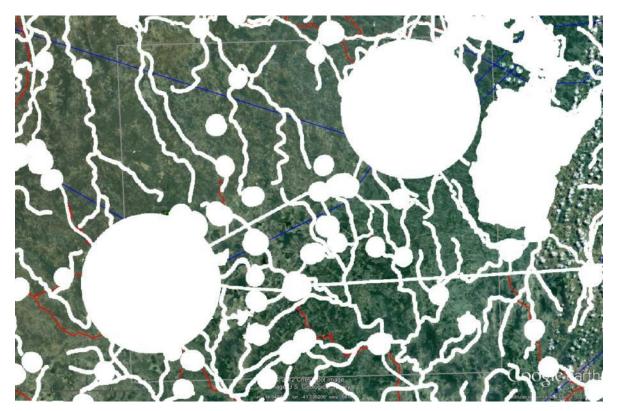


Figura 45 – Mapa de restrição da área de análise, onde as áreas em branco são inadequadas para a implantação de parques eólicos.

# 4.3 Identificação de sítios eólicos

A etapa de *identificação de sítios eólicos* é dividida em duas fases: *análise de adequação* e *busca de sítios*. A *análise de adequação* compreende a aplicação de um método de decisão multicritério sobre um conjunto de mapas de atributo e resulta em um único mapa que avalia a área de estudo em relação a sua adequação a um uso específico. O *mapa de adequação* resultante e o *mapa de restrição* gerado na etapa anterior são dados de entrada para o algoritmo de *busca de sítios* que irá identificar um conjunto de sítios eólicos promissores que atenda as restrições impostas pelo problema. Como o problema de busca de sítio foi formulado como uma minimização, um *mapa de custo* ao invés de um *mapa de adequação* será considerado no estudo de caso (veja Seção 3.4.1).

## 4.3.1 Análise de adequação

Uma abordagem baseada no método de *combinação linear ponderada* (WLC) é empregada na combinação dos mapas de atributo e na geração do mapa de custo final. A diferença dessa abordagem em relação ao WLC é que os mapas de atributo associados a cada critério não são proporcionais e, assim um peso é atribuído a cada critério considerando a grandeza medida e a importância relativa de cada critério para a solução do problema. Portanto, a soma dos pesos dos critérios não precisa ser necessariamente unitária. A estrutura hierárquica de objetivos e atributos considerada na análise de custo (adequação) das localidades para o problema de busca de sítios é ilustrada na Figura 46.

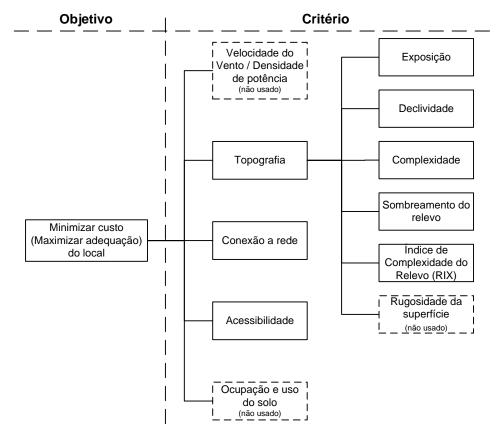


Figura 46 - Estrutura hierárquica de objetivos e atributos proposta para a análise de custo/adequação do local. Os critérios com linhas tracejadas não foram usados na análise.

Conforme discutido na Seção 2.1, o ideal seria possuir dados recentes de velocidade do vento ou densidade de potência eólica adequados à escala do problema. Nesse caso, o critério de topografia incluiria somente a declividade do terreno em função de restrições técnicas associadas à montagem e construção do parque eólico, pois os dados de vento já

consideram aspectos do relevo, obstáculos e rugosidade do local. Os critérios de ocupação e uso do solo e rugosidade da superfície também não foram utilizados em função da pobreza dos dados disponíveis (Seção 2.5.5). Assim, o critério de topografia é usado para avaliar as condições do relevo favoráveis ao aproveitamento da energia eólica a fim de compensar a falta de dados de vento.

Definido o conjunto de critérios, a questão principal agora é estabelecer as relações de preferência entre os critérios para a avaliação e posterior comparação das alternativas consideradas, no caso cada unidade espacial do modelo do espaço geográfico. O peso de um critério é dependente da grandeza medida e da faixa de valores do critério, ou seja, a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo das avaliações de um dado critério. Uma regra geral para avaliar a relação de preferência entre os critérios é considerar a vantagem percebida na mudança do nível máximo para o nível mínimo em cada critério relativa às vantagens de mudar do pior para o melhor nível para cada critério considerado. Assim, os pesos atribuídos aos mapas de atributo devem ser determinados pedindo ao tomador de decisão para comparar uma mudança do valor mais preferido para o menos preferido em um mapa de atributo em relação a uma mudança similar em outro atributo (MALCZEWSKI, 2000).

Segundo Malczewski (2000), a técnica *swing weights* (balanço de pesos) é provavelmente a mais adequada para ser utilizada em conjunto com SIG. No método *swing weights* o decisor é confrontado com a situação hipotética de uma alternativa que possui a menor pontuação em todos os critérios envolvidos no processo de decisão. Assim, o decisor atribui 100 pontos para o critério que prefere elevar primeiro à maior pontuação possível. Esse critério é então eliminado do processo e o decisor é convidado novamente a escolher o critério que gostaria de elevar, atribuindo um valor inferior ou igual a 100 pontos. Esse processo continua até que todos os critérios tenham sido avaliados. Esse método de atribuição de pesos foi utilizado para avaliar o conjunto de critérios de topografia. A Tabela 18 apresenta os pesos e as faixas de valores dos critérios de topografia utilizados na análise, onde os valores mais próximos de zero indicam os locais mais promissores.

Tabela 18 - Peso atribuído aos critérios de topografia utilizados.

Critério	Unidade de medida	Faixa de valores	Peso	Peso [%]
Exposição	km	$[0\infty)$	100	30,3
Declividade	-	[0∞), onde 1 equivale a gradiente de inclinação de 10%	30	9,1
Complexidade	-	$[0\infty)$	30	9,1
Sombreamento de relevo	percentual	[01], onde 1 indica que o local é sombreado 100% do tempo	100	30,3
Índice de complexidade do relevo	percentual	[03,33], onde 1 é indica o valor crítico do RIX de 30%	70	21,2

A escolha dos pesos dos critérios de topografia, acesso à rede e acessibilidade foi baseada na divisão típica de custos iniciais de um parque eólico apresentada na Seção 2.4.3 e replicada na Tabela 19. Nessa divisão o custo dos aerogeradores, da conexão elétrica e à rede e de obras civis correspondem respectivamente a 75%, 12% e 8% do total do investimento em infraestrutura. Como o critério de topografia está sendo considerado como um indicativo da possibilidade de existência de vento no local foi atribuído o peso de 0,75 a esse critério considerando o custo inicial dos aerogeradores. Partindo desse pressuposto, o peso atribuído ao critério de conexão à rede foi de 0,12 e o de acessibilidade foi de 0,02 (considerando o custo de construção e melhoria de vias de acesso como parte do custo das obras civis).

Tabela 19 - Divisão típica dos custos de capital para um parque eólico em terra (EWEA, 2009).

Categoria de custos de capital	(%)
Aerogeradores	75
Obras civis	8
Conexão elétrica e à rede	12
Outros	5

É importante observar que os valores dos critérios de conexão à rede e acessibilidade estão em quilômetros. Nesse sentido foi feito um ajuste proporcional desses valores considerando a divisão de custos de infraestrutura de um parque de 10 MW, o custo de capacidade instalada de um aerogerador de 3.000 R\$/kW e o custo de uma linha de transmissão de 69 kV de 150.000 R\$/km. Assim, o valor de ajuste proporcional de 1/K para o critério de conexão a rede foi calculado como:

$$K = \frac{[Potência] * [Custo por kW]}{[Custo por km]} * \frac{[Custo Conexão]}{[Custo Aerog.]} = 32 km$$
 (20)

O mesmo ajuste proporcional foi feito para o critério de acessibilidade. O objetivo era comparar os critérios de topografia, conexão à rede e acessibilidade considerando o valor crítico de cada critério como unitário e desse modo facilitar a avaliação da relação de compensação entre os critérios. A Tabela 20 apresenta os pesos dos critérios que contribuem diretamente para a avaliação do objetivo. O mapa de custo da área de análise resultante da combinação linear dos mapas de atributo com os pesos dos critérios associados é apresentado na Figura 47.

Tabela 20 – Pesos dos critérios principais que contribuem diretamente para a avaliação do objetivo.

Critério	Unidade de medida	Faixa de valores	Ajuste	Peso	Peso [%]
Topografia	-	[0∞)	1	75	84,3
Conexão à Rede	km	[0∞)	1/32	12	13,5
Acessibilidade	km	[0∞)	1/32	2	2,2

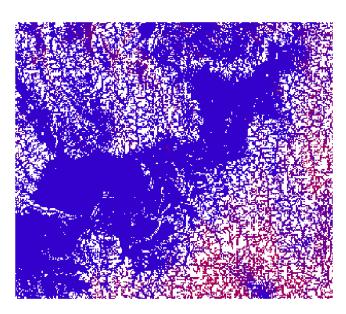


Figura 47 – Mapa de custo da área do estudo de caso onde as áreas em azul são mais promissoras e em vermelho menos. As áreas em branco são consideradas inadequadas, com gradientes de inclinação maiores que 10%.

Aplicando as restrições ao mapa de custo, obtém-se o mapa de custo restrito (Figura 48) que será utilizado para identificação de sítios eólicos promissores usando o algoritmo evolutivo de busca de sítio modSITE-EA descrito na Seção 3.4. Neste trabalho, optou-se por utilizar um mapa estático no procedimento de otimização espacial. Uma abordagem

alternativa poderia considerar cada mapa de atributo como uma variável de decisão na função objetivo, permitindo dessa forma variar dinamicamente o peso dos critérios considerados durante o processo de otimização do problema.

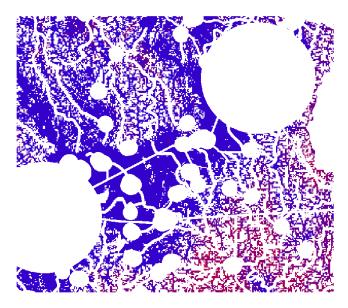


Figura 48 - Mapa de custo restrito da área do estudo de caso onde as áreas em azul são mais promissoras, em vermelho as áreas menos promissoras, e as áreas em branco são inadequada para implantação de um parque eólico.

#### 4.3.2 Busca de sítios eólicos

O algoritmo modSITE-EA foi aplicado ao estudo de caso com objetivo de identificar sítios eólicos promissores para implantação de um parque eólico de 10 MW. O problema do estudo de caso é representado por um formato de grade regular (modelo *raster*) onde cada célula na grade equivale a um vértice no grafo e pode ser identificada unicamente por um número inteiro. A representação do problema considera que duas células adjacentes na mesma linha ou coluna possuem a uma conexão direta ou um arco.

Na formulação da função objetivo foi implementada uma penalidade para os vértices da solução localizados em áreas restritas. Os vértices localizados em áreas restritas recebiam o valor de custo igual à *kconstraint* vezes o valor de custo máximo encontrado no mapa de custo restrito. Na versão do algoritmo modSITE-EA utilizado, não foi implementada a modificação do procedimento de crescimento de sítio proposto na Seção 3.4.4, mas o procedimento ACCRETE-SITE foi modificado para só permitir que um sítio seja gerado a partir de um vértice semente válido, ou seja, de uma célula sem restrições. A

Tabela 21 apresenta o conjunto de parâmetros do algoritmo modSITE-EA com a descrição, o escopo e o valor padrão considerado no estudo de caso.

Tabela 21 – Configuração dos parâmetros para execução do algoritmo modSITE-AE.

Parâmetro	Descrição	Escopo	Valor padrão
Gen	Número de iterações (ou gerações)	_	100
popsize	Número de soluções individuais na população		100
Gap	Parcela dos melhores indivíduos da população que é copiada sem modificações para geração seguinte	AE geral	0,1
p	Número de células contidas na solução	·	194
plocal	Probabilidade que determina se a busca local deve ser conduzida		0,9
nlocal	Número de iterações realizadas na busca local	Busca Local	20
ntabu	Número de vértices mantidos na lista tabu para serem		3
pmutat	pmutatProbabilidade que determina se mutação deve ser conduzidanmutatNúmero de iterações de crescimento de um novo sítio realizadas na mutação		0,1
nmutat			5
kshape	Coeficiente de penalidade de forma. Essa penalidade só incide sobre a diferença positiva entre o índice de forma do sítio e o limite do índice de forma calculado em função do tamanho do parque eólico definido.  Peso atribuído ao número de arestas que a célula elegível compartilha com o sítio parcial para o cálculo.		0,1
kneighbor			0,1
kconstraint	Coeficiente de penalidade de restrição. A penalidade de restrição atribui o valor equivalente a <i>kconstraint</i> vezes o maior valor encontrado no mapa de custo aos vértices da solução localizados em áreas restritas.	Penalização da função objetivo	5

O AE foi implementado no programa comercial de cálculo numérico MATLAB® da empresa MathWorks e executado em um computador com processador AMD Phenom<sup>TM</sup> II X4 955 @ 3,2 GHz, 4 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 7 32 Bits.

A execução do algoritmo modSITE-EA sobre o problema de estudo de caso usando a configuração padrão dos parâmetros (apresentada na Tabela 21) teve um tempo médio de processamento por geração de cerca de 6 segundos. A curva de evolução da função objetivo ao longo da execução do AE é apresentada na Figura 49. Pode ser observado que a curva da função objetivo da melhor solução converge rapidamente apresentando uma pequena

melhora ao longo da evolução do AE e que a média da população converge em cerca de 10 gerações e a partir daí passa a flutuar aleatoriamente entorno de um valor médio, não sugerindo a convergência da população para a melhor solução. Esse fato pode estar associado à característica do espaço de busca que é bastante complexo e com muitas restrições e/ou a configuração dos parâmetros utilizados na execução do algoritmo evolutivo.

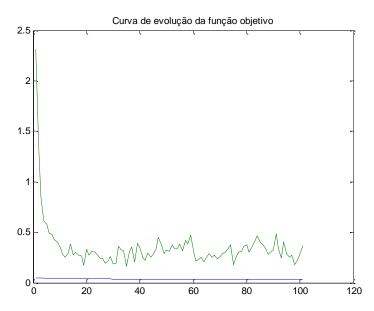


Figura 49 – Curva de evolução da função objetivo do problema. A linha azul indica o valor do melhor indivíduo e a linha verde a média da população em cada geração.

O resultado final obtido da execução do AE é mostrado no mapa da Figura 50. A área delimitada pela linha roxa corresponde à região que foi selecionada para a inspecção em campo e visitada pelo autor. Essa região foi previamente identificada como promissora e escolhida em função da sua proximidade com áreas promissoras indicadas pelo *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro* e por estar localizada em uma área mais elevada com relevo bastante plano (vide Seção 4.1). As áreas em verde indicam os sítios mais promissores que estão localizados principalmente dentro e próximos da região promissora. Isso indica que os critérios utilizados para a identificação de sítios eólicos promissores são consistentes com as práticas do CEPEL empregadas para localização de parques eólicos.

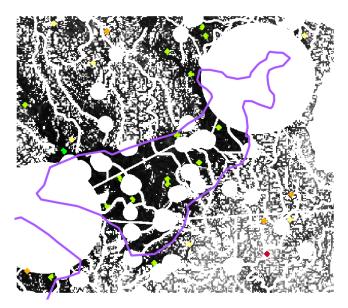


Figura 50 – Mapa da população final da execução do algoritmo modSITE-EA usando a configuração padrão apresentada na Tabela 21. Áreas em verde indicam os sítios mais promissores, áreas em amarelo indicam os sítios intermediários e áreas em laranja e vermelho os sítios menos promissores.

Além disso, na região do canto inferior direito do mapa resultante do AE se concentram os sítios menos promissores indicados pelas cores vermelha e laranja. Esse resultado condiz com as características dessa região que apresenta um relevo bastante acidentado e terrenos muito íngremes (com inclinações acima do ângulo crítico de 17°) e com velocidades médias anuais de vento baixas<sup>34</sup> (menores do que 5 m/s de acordo com atlas eólico conforme ilustra a Figura 43). Portanto, os resultados apresentados se mostram bastantes consistentes com situação real da região. Nesse sentido, podemos dizer que o conjunto de critérios selecionado é bastante promissor e os resultados inclusive indicam alguns sítios eólicos promissores inspecionados em campo.

Uma análise simplificada dos parâmetros do modSITE-EA foi feita por meio de uma série de experimentos realizados sobre o estudo de caso a partir da configuração padrão. As configurações dos experimentos são apresentadas na Tabela 22, onde cada linha representa os experimentos sobre um parâmetro que é ajustado em função de um conjunto de valores enquanto os outros parâmetros são mantidos constantes (usando o valor padrão

159

-

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> Velocidades médias de vento inferiores a 7 m/s são consideradas antieconômicos para empreendimentos eólicos de grande porte (DUTRA, 2007) (SÁ, 2001).

indicado na Tabela 21). Para cada experimento realizado os seguintes resultados foram levantados:

- *Média*: a média da função objetivo das soluções válidas na população final;
- *Melhor*: valor da função objetivo da melhor solução encontrada;
- *Tempo*: tempo de processamento em segundos do experimento;
- Válido: percentual das soluções válidas na população final; e
- *Índice de forma*: valores médio, máximo, mínimo e desvio padrão do índice de forma das soluções válidas na população final (Seções 3.3.2 e 3.4.1).

Tabela 22 - Configurações dos experimentos sobre os parâmetros.

Experimento	nlocal	ntabu	kshape	kneighbor
nlocal	{20; 50; 100}	3	0,1	0,1
ntabu	20	{3; 10; 20}	0,1	0,1
kneighbor	20	3	0.1	{0,01; 0,1; 1}
kshape+kneighbor	20	3	{0,0	01; 0,1; 1}

Os experimentos apresentaram em média 80% dos indivíduos da população final válidos, ou seja, que não apresentam nenhuma célula com restrições. Esse resultado provavelmente está associado ao valor padrão de 0,1 do parâmetro *pmutat* usado nos experimentos, que determina a probabilidade de ocorrência de uma operação de mutação sobre um indivíduo, e ao espaço de busca que apresenta muitas restrições. O procedimento do operador MUTATE-SITE faz com que a solução seja reinicializada em um novo local selecionado aleatoriamente usando o algoritmo INIT-SITE, que apesar de impedir que uma célula com restrições seja escolhida como célula semente para o crescimento do sítio, pode criar o sítio em uma célula válida na borda de uma área restrita ou em uma região com muitas restrições e uma área disponível insuficiente para atender o requisito de tamanho da solução.

O resultado dos experimentos sobre *nlocal* indica que um aumento no valor do parâmetro resulta em um aumento proporcional no tempo de processamento do AE, mas não sugere uma melhora significativa da melhor solução (Tabela 23). A Figura 51 apresenta os mapas da população final resultantes da execução do algoritmo modSITE-EA com o valor do parâmetro *nlocal* igual a 20, 50 e 100, respectivamente. O parâmetro *nlocal* 

influencia bastante a diversidade de formas espaciais existentes na população final conforme sugere o intervalo de variação e desvio padrão do *índice de forma* das soluções válidas na Tabela 23. Pode ser observado no mapa à direita da Figura 51 que o experimento com *nlocal* igual 100 apresenta sítios com uma variedade maior de formas espaciais em relação aos outros dois experimentos com *nlocal* igual 20 e 50. Isso acontece porque o parâmetro *nlocal* controla o número de repetições que operador LOCAL-SITE pode realizar para ajustar localmente o sítio a fim de melhorar a solução. Assim, quanto maior o valor de *nlocal* maior pode ser a modificação feita na forma espacial da solução criada pelo algoritmo ACCRETE-SITE.

Tabela 23 – Resultados dos experimentos sobre o parâmetro nlocal.

nlocal	Mádia	Malhan	Tompo [a]	Válida		Índice	de forma	
mocai	Média	Melhor	Tempo [s]	Válido	Média	Máximo	Mínimo	DesvPad
20	0,04176	0,03457	564,85	83%	3,6166	4,1642	3,1590	0,1482
50	0,05023	0,03807	1190,7	87%	3,9141	5,0257	3,2308	0,2167
100	0,05215	0,03336	2284,82	81%	3,7653	5,9591	3,3026	0,4155

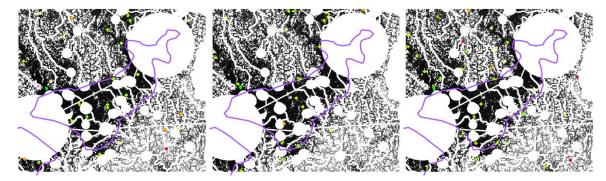


Figura 51 – Mapas da população final resultantes da execução do algoritmo modSITE-EA com o valor do parâmetro *nlocal* igual a 20, 50 e 100, respectivamente. Áreas em verde indicam os sítios mais promissores, áreas em amarelo indicam os sítios intermediários e áreas em laranja e vermelho os sítios menos promissores.

O parâmetro *ntabu* define o número de vértices que são mantidos em uma lista tabu e ficam inelegíveis para fazer parte da solução por um número de iterações durante a execução do algoritmo de busca local LOCAL-SITE. A variação do parâmetro *ntabu* não resultou em nenhuma melhora aparente da melhor solução encontrada ou no desempenho do AE (Tabela 24). A Figura 52 apresenta os mapas da população final resultantes da execução do algoritmo modSITE-EA com o valor do parâmetro *ntabu* igual a 3, 10 e 20, respectivamente. A variação do parâmetro *ntabu* também colabora positivamente com a

diversidade de formas espaciais existentes na população final conforme sugere o intervalo de variação e desvio padrão do *índice de forma* das soluções válidas na Tabela 24. Esse resultado provavelmente está associado ao comportamento do parâmetro *ntabu*, pois impede que vértices recentemente excluídos da solução sejam novamente incluídos o que cria restrições temporárias a alguns locais próximos à fronteira do sítio e assim obriga o algoritmo de busca local a explorar outras áreas.

Tabela 24 - Resultados dos experimentos sobre o parâmetro ntabu.

ntabu	Média	Melhor	Tempo [s]	Válido	Índice de forma				
					Média	Máximo	Mínimo	DesvPad	
3	0,04176	0,03457	564,85	83%	3,6166	4,1642	3,1590	0,1482	
10	0,05436	0,03366	569,80	81%	4,0445	4,8103	3,2308	0,3217	
20	0,10704	0,03424	558,25	82%	4,6825	5,8155	3,8052	0,4764	

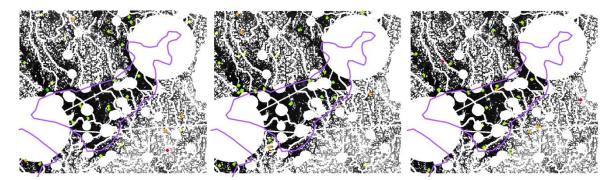


Figura 52 — Mapas da população final resultantes da execução do algoritmo modSITE-EA com o valor do parâmetro *ntabu* igual a 3, 10 e 20, respectivamente. Áreas em verde indicam os sítios mais promissores, áreas em amarelo indicam os sítios intermediários e áreas em laranja e vermelho os sítios menos promissores.

O parâmetro *kneighbor* modifica o valor de custo das células usado para selecionar o vértice elegível na fronteira do sítio que irá fazer parte da solução no algoritmo LOCAL-SITE. Esse parâmetro permite controlar a compactação da forma do sítio resultante do procedimento de busca local. Já o parâmetro *kshape* corresponde ao coeficiente de penalidade da forma espacial da solução que tende a piorar o valor da função objetivo dos sítios que ultrapassarem certo limite de compactação. Os parâmetros *kneighbor* e *kshape* definem o mecanismo de controle de forma espacial da solução do algoritmo modSITE-EA.

A Tabela 25 apresenta o resultado dos experimentos com *kshape* igual a 0,1 e *kneighbor* igual 0,01, 0,1 e 1. O aumento do parâmetro *kneighbor* resulta em soluções mais

compactas e em uma menor variação do *índice de forma*. A partir de *kneighbor* igual 0,1 passa a existir pouca variação na diversidade de formas espaciais dos indivíduos da população final. A Figura 53 apresenta os mapas da população final resultantes da execução do algoritmo modSITE-EA com o valor do parâmetro *kneighbor* igual a 0,01, 0,1 e 1, respectivamente. Pode ser observado no mapa à esquerda da Figura 53 que o experimento com *kneighbor* igual 0,01 apresenta sítios com uma grande variedade de formas espaciais em relação aos outros dois experimentos com *kneighbor* igual 0,1 e 1 que apresentam sítios com formas espaciais bem compactas não muito diferentes da forma do sítio inicializado pelo algoritmo ACCRETE-SITE. Entretanto, apesar da grande variedade de formas espaciais dos sítios identificados pelo experimento com *kneighbor* igual a 0,01, alguns dos sítios apresentam formas muito estreitas e sinuosas que não são consideradas soluções realistas do problema.

Tabela 25 - Resultados dos experimentos sobre o parâmetro kneighbor.

kneighbor	Média	Melhor	Tempo [s]	Válido	Índice de forma			
Kneighbor					Média	Máximo	Mínimo	DesvPad
0,01	0,21365	0,04045	607,12	78%	5,6921	8,4719	3,0872	1,1863
0,1	0,04176	0,03457	564,85	83%	3,6166	4,1642	3,1590	0,1482
1	0,04742	0,03857	551,86	84%	3,3009	4,0206	2,9436	0,1787

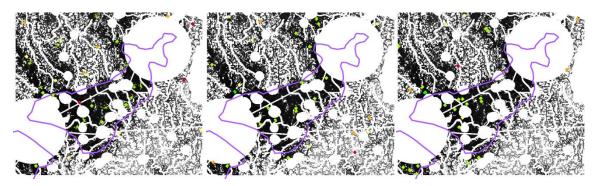


Figura 53 – Mapas da população final resultantes da execução do algoritmo modSITE-EA com o valor do parâmetro *kneighbor* igual a 0,01, 0,1 e 1, respectivamente. Áreas em verde indicam os sítios mais promissores, áreas em amarelo indicam os sítios intermediários e áreas em laranja e vermelho os sítios menos promissores.

A Tabela 26 e a Figura 54 apresentam os resultado dos experimentos com ambos os parâmetros *kshape* e *kneighbor* igual 0,01, 0,1 e 1. Conforme pode ser observado no mapa à direita da Figura 54 a definição de *kshape* e *kneighbor* igual 0,01 levou a identificação de

sítios ainda mais estreitos e sinuosos que não representam soluções realista para o problema.

Tabela 26 - Resultados dos experimentos sobre os parâmetros kshape e kneighbor.

kshape+	Média	Melhor	Tempo [s]	Válido	Índice de forma			
kneighbor					Média	Máximo	Mínimo	DesvPad
0,01	0,05176	0,03729	564,85	85%	5,5675	10,3386	3,1590	0,9470
0,1	0,04176	0,03457	564,85	83%	3,6166	4,1642	3,1590	0,1482
1	0,04784	0,03702	584,21	84%	3,7325	4,2360	3,0154	0,2185

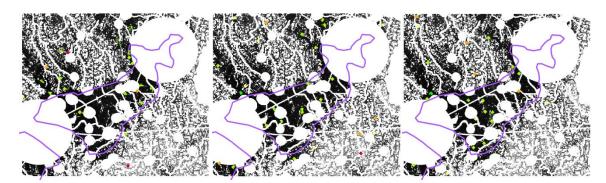


Figura 54 – Mapas da população final resultantes da execução do algoritmo modSITE-EA com o valor dos parâmetros *kshape* e *kneighbor* iguais a 0,01, 0,1 e 1, respectivamente. Áreas em verde indicam os sítios mais promissores, áreas em amarelo indicam os sítios intermediários e áreas em laranja e vermelho os sítios menos promissores.

A análise simplificada dos parâmetros do algoritmo modSITE-EA pôde descrever o comportamento geral do algoritmo e apresentar o mecanismo de controle da forma espacial da solução, porém uma análise mais detalhada e completa do conjunto de parâmetros é necessária. Foram observadas duas limitações no algoritmo evolutivo proposto: (1) o *índice de forma* usado para avaliar a forma espacial utilizado é influenciado pela orientação principal do sítio em função do modelo espacial de dados *raster* utilizado, e (2) os parâmetros de ajuste e controle de forma propostos no AE é complexo em virtude da dificuldade de definir e avaliar a forma espacial de um sítio e da dependência do problema. Além disso, fica a proposta de futura implementação do procedimento de crescimento de sítio proposto por Church *et al.* (2003) com objetivo de tentar explorar melhor a forma espacial da solução (conforme proposto na Seção 3.4.4).

## 5 Conclusões e propostas de trabalhos

## futuros

A energia eólica tem ganhado bastante destaque no cenário mundial por ser uma fonte de energia renovável e limpa, sendo considerada como uma das alternativas energéticas mais promissoras para ajudar a reverter o quadro atual de mudanças climáticas. Na perspectiva econômica, a geração eólica tem apresentado custos competitivos com fontes convencionais de energia baseadas em combustíveis fósseis. Entretanto, a energia eólica, como qualquer outra atividade industrial, pode causar impactos no ambiente que devem ser analisados e mitigados. Essas duas dimensões controversas da energia eólica, tornam a questão da localização de parques eólicos um problema bastante complexo, dado o número de impactos associados a parques eólicos e a incompatibilidade entre esses impactos de caráter localizado e o grande benefício público associado à energia eólica.

O Brasil vem ampliando significativamente a participação da geração eólica na sua matriz elétrica como consequência de políticas específicas para o setor. O Proinfa foi o mecanismo de incentivo mais importante para a energia eólica e resultou na adição de 1.436 MW a matriz elétrica nacional. Entretanto, houve uma estagnação do mercado de energia eólica brasileiro entre contratação dos projetos do PROINFA (2004) até o primeiro leilão de energia eólica em 2009, mas desde então a perspectiva da fonte eólica começou a tomar rumos mais positivos com participação em vários leilões consecutivos com valores mais competitivos do que aqueles apresentados por fontes tradicionais. Nesse novo cenário, O PDE 2020 prevê a expansão da energia eólica à participação de 6,75% da matriz de geração de energia elétrica, o que representa 11,5 GW de potência instalada (EPE, 2011).

Além da questão econômica, a localização de parques eólicos envolve também questões de planejamento e socioambientais que podem restringir a área disponível e levar inevitavelmente a conflitos associados principalmente à maneira como o processo de localização de sítio é conduzido. Diante da perspectiva de expansão da geração eólica no Brasil esses conflitos tendem a se intensificar naturalmente com a distribuição de parque eólicos pelo território ocupando áreas mais sensíveis ou inadequadas à implantação de

parques eólicos, dada à experiência internacional observada (EWEA, 2009) (BABAN e PARRY, 2001). Esses parques, além de serem economicamente viáveis, devem ter um impacto insignificante no ambiente local em termos de intrusão visual e acústica, interferência eletromagnética e habitat selvagem.

A viabilidade econômica de um empreendimento eólico está diretamente associada à energia eólica disponível que pode ser extraída do vento e de como esse recurso varia com a localização. Porém, além da indicação do recurso eólico, outros critérios devem ser levados em consideração durante o desenvolvimento de um projeto eólico. São considerações técnicas, de planejamento, ambientais e sociais que influenciam fortemente na escolha do sítio e tendem a reduzir a área disponível. A experiência e o conhecimento adquiridos com o desenvolvimento de projetos eólicos no mundo mostra como é importante e às vezes crítico para o sucesso do projeto levar em consideração os aspectos sociais e ambientais (EWEA, 2009) (BWEA, 1994). A escolha do sítio corresponde à etapa inicial do desenvolvimento de um projeto eólico e tem o propósito de identificar locais promissores e definir restrições técnicas, comerciais e ambientais a fim de que somente os locais mais apropriados sejam selecionados para o desenvolvimento das etapas seguintes.

A localização de sítios eólicos promissores é, portanto considerada um problema de decisão espacial bastante complexo, que envolve vários agentes com objetivos distintos, e muitas vezes conflitantes, e está sujeito a diversas restrições de caráter técnico e ambiental. A solução desse problema, para ser considerada aceitável, deve ser capaz de conciliar esses objetivos conflitantes atendendo as restrições impostas.

Um estudo de localização de sítios eólicos normalmente se inicia com a escolha de uma região onde são identificas áreas menores, em geral, considerando um valor de corte para velocidade média de vento apropriado para uma geração de energia elétrica economicamente atrativa. Em seguida nas áreas candidatas são identificados sítios adequados levando em consideração critérios como velocidade e direção do vento, relevo e rugosidade, acesso ao local, proximidade a rede elétrica, ocupação e uso da terra e o atendimento das restrições físicas, econômicas e ambientais. Esse estudo deve levar em consideração todos os dados técnicos e ambientais publicados disponíveis com o apoio de ferramentas como base dados e mapas de vento, imagens de satélite e modelos

topográficos, e uma base cartográfica georreferenciada com vias de acesso, sistema elétrico, limites de áreas de preservação ambiental, e etc.

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro é uma ótima ferramenta para a determinação da região de estudo e identificação de áreas promissoras a nível regional. Entretanto, o atlas eólico não é adequado à escala do problema de busca de sítio considerado, que corresponde à resolução do modelo de elevação digital STRM utilizado (cerca de 92 m x 92 m), em função da sua resolução (1 km x 1 km) e de problemas de representatividade do modelo de dados de vento, mais acentuado em regiões no interior do país. Assim, atlas eólico não foi usado para estimar a velocidade do vento no local, mas foi considerado como um indicativo de que na área existem ventos promissores e usado para delimitar uma região de busca. Apesar disso, as informações de rosa dos ventos do atlas, que apresentam uma pequena variação no espaço geográfico em relação à escala geográfica considerada, foram utilizadas para avaliar o nível de exposição dos sítios ao vento predominante.

Existem dados de vento do território brasileiro em alta resolução (200 metros) que são comercializados pela empresa AWS Truepower™ e permitiriam indicar o potencial eólico do local de maneira bastante precisa e adequados à etapa de inicial de seleção do sítio. Portanto a obtenção dessa informação envolve um custo associado que deve ser avaliado em relação a sua pertinência nessa fase inicial de seleção do sítio, pois existe uma série de restrições e fatores que também condicionam a escolha do local. Nesse sentido, uma análise preliminar utilizando os dados publicamente disponíveis poderia apoiar essa decisão de investimento.

A busca de um sítio eólico promissor deve ser sempre orientada pela existência de ventos intensos no local, pois além do recurso eólico ser bastante localizado, para maioria dos projetos, a viabilidade econômica é significativamente mais sensível a mudanças na produção de energia elétrica do que em custos de infraestrutura. Entretanto, na falta de dados de vento confiáveis na escala do problema de identificação de sítios eólicos, indicadores topográficos podem ser utilizados para avaliar a pré-disposição do local ao aproveitamento da energia eólica. O uso de indicadores topográficos para orientar na escolha do sítio são abordagens usualmente empregadas em muitas situações onde existe pouca ou nenhuma informação sobre a condição do vento no local.

A meteorologia da energia eólica divide os efeitos da topografia em três categorias típicas: rugosidade, obstáculos e relevo. A qualidade da informação disponível não permite identificar de forma adequada os efeitos de microescala da rugosidade da superfície e de obstáculos no local, mas a informação disponível do relevo pode ser utilizada para indicar o comportamento geral dos ventos na região e assim apontar áreas com boa probabilidade de existência de ventos. O uso de técnicas de análise espacial e de modelagem de superfície em um modelo digital de elevação permite caracterizar vários aspectos do terreno a partir da extração de medidas objetivas. O DEM da STRM na resolução aproximada de 92 m x 92 m de todo o território brasileiro está disponível publicamente e pode ser usado para esse fim (WEBER, et al., 2004). Portanto, para compensar a falta de informações adequadas sobre o recurso eólico foi proposta uma estratégia de avaliação do local em função de características do terreno consideradas favoráveis a energia eólica. Os critérios de avaliação do relevo propostos são: exposição, declividade, complexidade, índice de complexidade do relevo (RIX) e sombreamento de relevo.

O critério de *exposição* está associado ao grau de exposição ao vento considerando a influência do relevo na vizinhança. Esse critério é avaliado em função da proximidade dos topos de morros elevados acima da média da região e em áreas de gradiente de inclinação menor ou igual a 10% (BERRY, 2007).

O critério da *declividade* considera que os sítios adequados tecnicamente para construção de parques eólicos devem ter gradientes de inclinação em média menores do que 10% para permitir a montagem do aerogerador no local e reduzir custos com obras civis (LACTEC, 2007). A declividade também está associada à complexidade do terreno, onde em geral se considera que para gradientes maiores do que 30% (ou 17°) acontece o descolamento do escoamento causando perdas na velocidade do vento e aumento da turbulência no local.

O critério de *complexidade* avalia o grau de irregularidade (suavidade) da superfície e o grau de aproximação do terreno ao plano (inclinação) usando técnicas de caracterização das condições do micro terreno. A complexidade do micro terreno pode ser avaliada utilizando diferente métricas que resultam em mapas similares, mas com algumas diferenças que devem ser consideradas na análise final. Aplicativos SIG normalmente

possuem funções específicas de análise espacial de terreno que podem ser utilizadas para avaliar a complexidade do micro terreno. Assim, o critério de complexidade do terreno é avaliado como uma medida de aspereza ou irregularidade do terreno aonde quanto mais áspero for o terreno maior tende ser a ocorrência de turbulência no local. Além disso, terrenos mais irregulares resultam em custos adicionais de obras civis para construção de vias de acesso e das fundações dos aerogeradores.

O critério de *RIX* é uma medida objetiva da declividade ou irregularidade do relevo do terreno ao redor do sítio definida como a percentagem do terreno mais íngreme do que uma inclinação crítica (um gradiente de inclinação de 30% ou 17°) (BOWEN e MORTENSEN, 2004). Ele é avaliado nesse trabalho como o percentual da área vizinha ao local em um raio de 3,5km com gradiente de inclinação maior ou igual a 30%. Uma diferença fundamental desse critério em relação critério de complexidade apresentado anteriormente consiste na extensão da área vizinha considerada no cálculo, que no caso anterior considera somente as células adjacentes (o que equivale a uma distância de aproximadamente 92 metros no DEM utilizado). Desse modo o critério de RIX considera a influência das áreas vizinhas no comportamento do vento experimentado pelo sítio.

Por último, o critério de sombreamento de relevo proposto aqui nesse trabalho é uma abordagem diferente de avaliação do relevo não vista na literatura conhecida de modelos de localização de parque eólicos. Esse critério estende o princípio de sombreamento causado por obstáculos ao relevo vizinho. Nessa condição, um morro mais elevado a montante em relação ao sentido de fluxo do vento pode vir a perturbar o escoamento do vento no local. Caso a gradiente de inclinação da encosta de descida do morro em relação ao fluxo do vento for superior a 30%, um descolamento do fluxo do vento deverá ocorrer nesse ponto e se estender a uma distância no plano de 40 vezes a altura relativa entre o ponto de descolamento e o local avaliado. Essa hipótese do modelo de sombreamento do relevo baseada no princípio de sombreamento de obstáculos parece coerente, mas ainda precisa ser validada usando programas de simulação do vento baseados em técnicas computacionais de dinâmica dos fluídos.

Além do recurso eólico, outros critérios técnico-econômicos que influenciam diretamente a localização de um parque eólico são: *área disponível* para o desenvolvimento, *conexão à rede* elétrica para o despacho e comercialização da energia, *acesso ao local* para a construção e a *ocupação e uso da terra* compatível.

Os critérios de *conexão à rede* elétrica e *acesso ao local* em geral não costumam ser utilizados em modelos de localização ou são modelados na forma de restrições com a definição de distâncias máximas aceitáveis, e não como fatores que podem melhorar ou piorar a adequação do sítio a implantação de um parque eólico. Esses critérios refletem considerações de caráter técnico e econômico que podem tornar um sítio com ventos promissores inviável.

A conexão à rede, além de ser uma exigência técnica para permitir o despacho e a comercialização da eletricidade gerada, é o segundo item de maior custo na implantação de um parque eólico. O custo de construção da linha de transmissão é o que apresenta maior variação entre os custos de conexão à rede, sendo diretamente proporcional ao seu comprimento. Desse modo, a distância até um ponto de conexão à rede pode resultar em custos significativos ao empreendimento em função da distância entre o sítio com recurso eólico e o ponto de conexão à viável. Assim, a distância ao ponto de conexão à rede pode ser considerada como um fator importante no problema de localização de sítios eólicos, do ponto de vista técnico e econômico. Entretanto estimar a distância efetiva para a conexão do parque eólico até o ponto de conexão é considerado um problema de decisão espacial tão complexo como a localização do sítio eólico que envolve a localização da linha de transmissão no espaço.

A estratégia mais apropriada para modelar o critério da conexão à rede no problema de localização de sítios eólicos se baseia no método do *caminho de mínimo custo* usado para solucionar o problema de localização de uma linha de transmissão no espaço. Alguns modelos de localização de linhas de transmissão baseados no método do mínimo custo podem ser encontrados em(BAGLI, *et al.*, 2011) (HOUSTON e JOHNSON, 2006) (SCHMIDT, 2009).

O critério de *acesso ao local* pode ser avaliado em função da distância efetiva da rodovia mais próxima levando em consideração as condições do terreno e obstáculos no

trajeto utilizando o mesmo método usado para a avaliação do critério de conexão à rede. Entretanto, para simplificar o estudo de caso apresentado no presente trabalho, esses dois critérios foram avaliados através de uma medida de proximidade das subestações na região e das rodovias principais e secundárias. A análise de proximidade é uma função comum programada na maioria das ferramentas SIG disponíveis.

O critério de *ocupação e uso da terra* avalia o grau de compatibilidade da ocupação e uso da terra com a energia eólica. Locais onde existem atividades econômicas que não influenciem demasiadamente no comportamento dos ventos, como a pecuária e certos tipos de agricultura, são os mais adequados. Entretanto, dificilmente as informações de ocupação e uso da terra encontram-se atualizadas e na resolução adequada para problema de identificação de sítios eólicos. Para obtenção desse tipo de informação a visita ao local é fundamental.

A maioria dos modelos de localização de parque eólicos encontrados considera um critério de ocupação e uso da terra. Em geral, esse critério é avaliado por uma função de valor ou modelo de pontuação utilizado para a reclassificação dos mapas disponíveis de ocupação e uso da terra em relação à compatibilidade da ocupação ou atividade desenvolvida com a implantação de parques eólicos. Entretanto, em virtude da pobreza dos dados disponíveis e da demanda cognitiva necessária para avaliar as diversas paisagens existentes em relação à sensibilidade a energia eólica e capacidade de instalação de parques eólico suportada, esse critério não foi avaliado no modelo de identificação de sítios eólicos.

A metodologia para a localização de sítios eólicos proposta é dividida em quatro etapas: (1) definição da região de estudo; (2) levantamento e definição das restrições; (3) identificação de sítios eólicos e (4) seleção de sítios eólicos promissores. A etapa inicial de definição da região de estudo se apoia em um processo racional de decisão que favorece uma escolha mais consistente e uniforme, e justifica a delimitação da região de estudo.

O *levantamento e a definição das restrições* da região de estudo são realizados a partir de pesquisa em escritório e consultas com especialistas e outros agentes envolvidos. Dessa etapa, é obtido um modelo de restrições que aplicado sobre a região de interesse resulta em um mapa de restrição que identifica os locais inadequados para implantação de

parques eólicos. Em geral, o método *Conjuntivo* é utilizado na criação desse mapa e pode ser facilmente implementado em SIG usando operações *Booleanas*.

A etapa de identificação de sítios eólicos pode ser dividida em duas fases: análise de adequação e busca de sítios. A análise de adequação compreende a aplicação de um método de decisão multicritério a um conjunto de mapas de atributo e resulta em um único mapa de adequação. O método de combinação linear ponderada ou WLC normalmente é o mais utilizado em função da sua facilidade de implementação em SIG e por ser de fácil entendimento e intuitivamente atrativo para os tomadores de decisão. Porém outros métodos de decisão multicritério também podem ser utilizados como a Teoria da Utilidade Multiatributo, também conhecida por MAUT (Multi-Attribute Utility Theory). Os mapas de adequação e de restrição são dados de entrada para o algoritmo de busca de sítios que irá identificar um conjunto de sítio eólico promissores que atenda as restrições impostas pelo problema. Essas duas fases também podem ser implementadas diretamente no algoritmo de busca de sítio, entretanto a criação de um mapa de adequação intermediário pode auxiliar o tomador de decisão a conhecer a região de estudo e entender as relações de compensação entre os critérios.

A etapa final de *seleção de sítios eólicos promissores* é somente indicada na metodologia e não foi considerada no estudo de caso, pois, dado que um número reduzido de alternativas de sítios eólicos já foi identificado, o problema seleção dos sítios eólicos mais promissores se torna um problema de decisão multicritério comum para o qual existe uma grande variedade de métodos de decisão multicritério aplicáveis.

A metodologia proposta foi aplicada a um estudo de caso na região que compreende o sul da Bahia e parte do Nordeste de Minas Gerais. Essa região foi escolhida em função da experiência e conhecimento obtidos pelo autor em atividades de prospecção de sítios eólicos realizadas na região. Desse modo, foi possível avaliar os resultados obtidos levando em consideração o conhecimento prévio dos locais mais promissores assim como dos menos promissores.

Os resultados obtidos se mostraram coerentes com situação real da região e inclusive identificam alguns sítios eólicos em áreas promissores inspecionados em campo pelo autor. Os sítios mais promissores foram identificados em locais mais elevadas e com

relevo mais plano e, em muitos casos, próximos de áreas com ventos promissoras de acordo com *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Já os sítios menos promissores identificados se concentraram principalmente em uma região previamente considerada desfavorável para a implantação de parques eólicos, pois apresenta um relevo bastante acidentado, terrenos muito íngremes e velocidades médias anuais de vento baixas consideradas antieconômicas para empreendimentos eólicos de grande porte. Assim, podemos dizer que o conjunto de critérios de avaliação selecionado parece bastante promissor, porém ainda são necessários mais testes e experimentos em outras regiões com intuito de avaliar a sua efetividade e abrangência. Além disso, existe uma dificuldade associada à definição das relações de compensação (pesos) entre os critérios. Apesar de existirem técnicas de apoio multicritério a decisão que auxiliam na definição desses pesos, essa tarefa é complexa e exige um elevado esforço cognitivo.

Os critérios de topografia propostos, apesar de bastante intuitivos, devem ser avaliados individualmente e em conjunto em relação a sua capacidade de discriminar sítios eólicos promissores, possivelmente usando programas profissionais de simulação númerica de vento. Além disso, o efeito da direção do vento na definição espacial do sítio não foi considerado no modelo de decisão, mas é um fator importante que influencia diretamente o espaçamento e a disposição do aerogeradores e desse modo afeta o tamanho da área ocupada, a forma espacial e a orientação preferencial do sítio.

### 5.1 Proposta de trabalhos futuros

As propostas de trabalhos futuros identificadas nesse trabalho podem ser divididas em pontos de melhoria da metodologia e propostas para adequação do modelo ao contexto regulatório brasileiro. Os pontos de melhoria propostos para metodologia são:

• Desenvolver um método multiobjetivo para a geração de alternativas baseado no princípio da não dominância de *Pareto* (GOLDBERG, 1989)(FONSECA e FLEMING, 1995)(SRINIVAS e DEB, 1995) (XIAO, *et al.*, 2002). Tal método deverá ser capaz de gerar um número limitado de alternativas promissoras para auxiliar os tomadores de decisão a explorar o espaço de solução e a estabelecer suas

prioridades. Essas alternativas poderiam auxiliar os tomadores de decisão a entender melhor a natureza concorrente dos objetivos e as relações de compensação entre as alternativas e assim contribuir para a melhoria da qualidade do processo de tomada de decisão.

- Testar e programar técnicas de nicho e especiação no algoritmo modSITE-EA proposta a fim de gerar um conjunto de soluções promissoras distintas a fim de explorar melhor o espaço de busca.
- Implementação do procedimento de crescimento de sítio proposto por Church et al.
   (2003) com objetivo de tentar explorar melhor a forma espacial da solução do algoritmo modSITE-EA.
- Integrar o algoritmo modSITE-EA em uma plataforma SIG usando uma interface transparente ao usuário a fim potencializar a capacidade de modelagem e análise do SIG.
- Avaliar melhor a coerência e a relevância do conjunto de critérios topográficos proposto para localização de sítios eólicos promissores. A validade do critério topográfico de sombreamento de relevo deve ser verificada usando um modelo computacional de dinâmica de fluídos para uma simulação realista do fluxo do vento em relevos complexos onde o descolamento do perfil de escoamento do vento ocorre.
- Identificar o conjunto de critérios e o método de decisão multicritério mais adequado para a seleção dos sítios eólicos mais promissores identificados pela metodologia proposta.

No contexto regulatório brasileiro alguns estudos são propostos para ajustar o modelo de decisão à realidade nacional:

Conhecer a legislação junto ao órgão ICMBio associada ao grupo de Unidades de Conservação federais de uso sustentável para identificar as oportunidades e restrições ao desenvolvimento de parques eólicos, visto que em muitos casos essas UCs estão localizadas em áreas próximas ao litoral onde o vento costuma ser bastante favorável e, além disso, o baixo impacto associado energia eólica e compatibilidade com determinados tipos de ocupação pode auxiliar positivamente a

- preservação da área com a intensificação das atividades monitoramento em função da operação do parque eólico.
- Estudar com mais detalhes o processo regulatório brasileiro associado ao desenvolvimento de um parque eólico no Brasil, principalmente na questão relacionada ao escopo e profundidade da avaliação de impacto ambiental exigida. Nesse contexto avaliar junto aos órgãos regulatórios, planejadores e autoridades locais a viabilidade de uma proposta de um planejamento estratégico regional.
- Identificar fontes de informação seguras e de qualidade para auxiliar o processo de localização de parques eólicos.
- Desenvolvimento de estudos para avaliar a dimensão social da localização de parques eólicos no Brasil.
- O estudo de impactos de parques eólicos na paisagem brasileira em relação à sua sensibilidade e capacidade instalada suportada.

## 6 Referência Bibliográfica

05 Novembro 2012.

ABEEOLICA, 2012, **Declarações do Dr. Maurício Tolmasquim – presidente da EPE - durante abertura do evento BrazilWindPower, 2012**. Rio de Janeiro.

AERTS, J. C. J. H.; EISINGER, E.; HEUVELINK, G. B. M.; STEWART, T., 2003, Integer Programming for Multi-Site Land-Use Allocation. **Geographical Analysis**, n. 35. 148–169.

AMARANTE, O. A. C. D.; SCHULTZ, D. J.; BITTENCOURT, R. M.; ROCHA, N. A., 2001, Complementaridade Sazonal dos Regimes Hidrológico e Eólico no Brasil. **DEWI Magazin**, n. 19, (Agosto).

ANEEL, 2008, **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª. ed. Brasília: Agêngia Nacional de Energia Elétrica, 236 p. ISBN 978-85-87491-10-7. Disponível em: <a href="http://www.aneel.gov.br/visualizar\_texto.cfm?idtxt=1687">http://www.aneel.gov.br/visualizar\_texto.cfm?idtxt=1687</a>>. Acesso em: 19 Ago. 2012.

ANEEL, 2012, BIG - Banco de Informações de Geração. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponivel em:

<a href="mailto:http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp">http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp</a>. Acesso em:

AUSTIN, R. F., 1984, "Measuring and comparing two-dimensional shapes". In: GAILE, G. L.; WILLMOTT, C. J. **Spatial statistics and models**. Boston: D. Reidel Publishing Company, p. 17-29.

AUSWEA, 2006, **Best Practice Guidelines for implementation of wind energy projects in Australia**. [S.l.]: [s.n.]. Disponível em: <a href="http://www.cleanenergycouncil.org.au/cec/resourcecentre/reports/Past-Reports/mainColumnParagraphs/0/text">http://www.cleanenergycouncil.org.au/cec/resourcecentre/reports/Past-Reports/mainColumnParagraphs/0/text</a> files/file21/bestpracguidelines06.pdf>.

AWS TRUEPOWER, 2012, Wind Site Assessment Dashboard. **AWS Truepower**. Disponivel em: <a href="https://windnavigator.com/index.php/cms/pages/wind-site-assessment">https://windnavigator.com/index.php/cms/pages/wind-site-assessment</a>. Acesso em: 3 Outubro 2012.

BABAN, S. M. J., 2004, **Developing a Geoinformatics-Based approach to locate Wind Farms in the Caribbean Region, using Trinidad and Tobago as a Case Study**. Proceedings of the Second Caribbean Environmental Forum and Exhibition (GEF-2), Parallel Session 15: Appropriate Environmental Technologies and Systems. Trinid: [s.n.]. p. 10.

BABAN, S. M. J.; PARRY, T., 2001, Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. **Renewable Energy**, 24. 59–71.

BAGLI, S.; GENELETTI, D.; ORSI, F., 2011, Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts. **Environmental Impact Assessment Review**, 31. 234–239.

BAKER, J., 1987, **Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm**. Proc. of the Second International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates. p. 14-21.

BAKER, W. L.; CAI, Y., 1992, The r.le programs for multiscale analysis of landscape structure using the GRASS geographical information system. **Landscape Ecology**, 7, n. 4. 291-302.

BATLLE, C.; BARROSO, L. A., 2011, Review of Support Schemes for Renewable Energy Sources in South America. **MIT CEEPR Working Paper No. WP-2011-001**, (Fevereiro).

BENELLI, S. L.; DORWEILER, R. P.; PROCOPIAK, L. A. J., 2009, **Evolução tecnológica do mapeamento do potencial eólico**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE. Natal, Brasil: [s.n.]. p. 3567-3573. Disponível em: <a href="http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.16.43.59/doc/3567-3573.pdf">http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.16.43.59/doc/3567-3573.pdf</a>>. Acesso em: 12 set 2012.

BENSON, J. F.; SCOTT, K. E.; ANDERSON, C., 2003, Landscape appraisal for onshore wind development. School of Architecture, Planning & Landscape of University of Newcastle. [S.l.], p. 89. Disponível em:. Acesso em: 18 set. 2012.

BERRY, J. K., 2007, **Beyond Mapping III:** Procedures and Applications in GIS Modeling. [S.l.]: Berry & Associates // Spatial Information Systems, Inc.. Disponível em: <a href="http://www.innovativegis.com/basis/MapAnalysis/Default.htm">http://www.innovativegis.com/basis/MapAnalysis/Default.htm</a>. Acesso em: 19 set. 2002.

BOWEN, A. J.; MORTENSEN, N. G., 2004, **WAsP prediction errors due to site orography**. Risø National Laboratory. Roskilde, Denmark.

BREUKERS, S.; WOLSINK, M., 2007, Wind power implementation in changing institutional landscapes: An international comparison. **Energy Policy**, 35, n. 5. 2737–2750.

BROOKES, C. J., 1997, A parameterized region-growing programme for site allocation on raster suitability maps. **International Journal of Geographic Information Science**, n. 11. 375-396.

BROOKES, C. J., 2001, A Genetic Algorithm for Designing Optimal Patch Configurations in GIS. International Journal of Geographical Information Science, 15, n. 6. 539–559.

BRUSA, A.; LANFRANCONI, C., 2006, Guidelines for realization of wind plants and their integration in the territory. EWEC 2006. Milano: Italian Association of Renewable Energy Producers. Disponível em: <a href="http://www.proj6.turbo.pl/upload/file/293.pdf">http://www.proj6.turbo.pl/upload/file/293.pdf</a>>. Acesso em: 16 set. 2012.

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E., 2001, **Wind Energy Handbook**. Chichester, England: John Wiley & Sons. ISBN 0-471-48997-2.

BWEA, 1994, **Best Practice Guidelines for implementation of wind energy projects**. [S.l.]: British Wind Energy Association. Disponível em: <a href="http://www.bwea.com/pdf/bpg.pdf">http://www.bwea.com/pdf/bpg.pdf</a>>..

CEPEL, 2001, Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Brasília: CEPEL.

CHURCH, R. L.; GERRARD, R. A.; GILPIN, M.; STINE, P., 2003, Constructing Cell-Based Habitat Patches Useful in Conservation Planning. **Annals of the Association of American Geographers**, 93, n. 4, (December). 814-827.

COSTA, L., 2012, Aneel vai mudar simulação de geração de parques eólicos somente em 2014. **Jornal da Energia**. Disponivel em: <a href="http://www.jornaldaenergia.com.br/ler\_noticia.php?id\_noticia=9285&id\_tipo=2&id\_seca">http://www.jornaldaenergia.com.br/ler\_noticia.php?id\_noticia=9285&id\_tipo=2&id\_seca o=2>. Acesso em: 13 Março 2012.

COVA, T. J.; CHURCH, R. L., 2000a, Contiguity Constraints for Single-Region Site Search Problems. **Geographical Analysis**, 32, n. 4. 306–329.

COVA, T. J.; CHURCH, R. L., 2000b, Exploratory spatial optimization in site search: a neighborhood operator approach. **Computers, Environment and Urban Systems**, n. 24. 401-419.

CRESESB, 2006, Parques Eólicos do PROINFA entrando em operação. **Informe CRESESB**, Rio de Janeiro, XI, n. 11, (Dezembro). 20. Disponível em: <a href="http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/periodicos/informe11.pdf">http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/periodicos/informe11.pdf</a>>. Acesso em: 08 Out. 2012..

DE JONG, K. A., 1975, **An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems**. Doctoral dissertation, Department of Computer and Communication Sciences, University of Michigan. Ann Arbor, MI.

DEADP, 2006, Strategic Initiative to Introduce Commercial Land Based Wind Energy Development to the Western Cape: Towards a Regional Methodology for Wind Energy Site Selection. Department of Environmental Affairs and Development Planning. Cidade do Cabo. Report Series 1-7.

DENSHAN, P. J., 1991, "Spatial decision support systems". In: MAGUIRE, D. J., et al. **Geographical Information Systems:** Principles and Applications. London: Longman, v. 1. Cap. 26, p. 403-412.

DIAMOND, J. T.; WRIGHT, J. R., 1991, An Implicit Enumeration Technique for the Land Acquisition Problem. **Civil Engineering Systems**, 8. 101–114.

DIBBLE, C.; DENSHAM, J. P., 1993, Generating interesting alternatives in GIS and SDSS using genetic algorithms. Proceedings GISILIS 93, 2-4 November 93. Bethesda: American Congress on Surveying and Mapping. p. 180-189.

DOMÍNGUEZ, J.; AMADOR, J., 2007, Geographical information systems applied in the field of renewable energy sources. **Computers & Industrial Engineering**, n. 52. 322–326.

DUNSFORD, H.; MACFARLANE, R.; TURNER, K., 2003, **The Development of a Regional Geographical Information System for the North East Renewable Energy Strategy 2003**. Centre for Environmental and Spatial Analysis of School of Applied Sciences of University of Northumbria. [S.l.], p. 24. Disponível em: <a href="http://www.strategyintegrationne.co.uk/displaypagedoc.asp?id=400">http://www.strategyintegrationne.co.uk/displaypagedoc.asp?id=400</a>. Acesso em: 10 ago. 2012.

DUTRA, R. M., 2007, **Propostas de Políticas Específicas para Energia Eólica no Brasil após a Primeira Fase do PROINFA**. Tese de D.Sc., Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brazil, p. 415.

DUTRA, R.; SZKLO, A., 2008, Assessing long-term incentive programs for implementing wind power in Brazil using GIS rule-based methods. **Renewable Energy**, n. 33, (10 Fevereiro). 2507 - 2515.

EASTMAN, J. R.; JIN, W.; KYEM, P. A. K.; TOLEDANO, J., 1995, Raster procedures for multi-criteria/multi-objective decisions. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, n. 61. 539–547.

EPE, 2009, Plano Decenal De Expansão De Energia 2008 – 2017. Disponivel em: <a href="http://www.epe.gov.br/PDEE/20090803\_1.pdf">http://www.epe.gov.br/PDEE/20090803\_1.pdf</a>>. Acesso em: 2012 Agosto 19.

EPE, 2010, Plano Decenal De Expansão De Energia 2019. Disponivel em: <a href="http://www.epe.gov.br/PDEE/20100610\_1.pdf">http://www.epe.gov.br/PDEE/20100610\_1.pdf</a>>. Acesso em: 2012 Agosto 19.

EPE, 2011, Plano Decenal De Expansão De Energia 2020. Disponivel em: <a href="http://www.epe.gov.br/PDEE/20120302\_1.pdf">http://www.epe.gov.br/PDEE/20120302\_1.pdf</a>>. Acesso em: 2012 Agosto 19.

ERICKSON, W. P.; JOHNSON, G. D.; YOUNG, D. P., 2005, A summary and comparison of bird mortality from anthropogenic causes with an emphasis on collisions. USDA Forest Gen. Tech. Rep. [S.1.]. Disponível em: <a href="http://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw\_gtr191/Asilomar/pdfs/1029-1042.pdf">http://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw\_gtr191/Asilomar/pdfs/1029-1042.pdf</a>>. Acesso em: 16 Set. 2012.

EWEA, 2002, European Best Practice Guidelines for implementation of wind energy projects. [S.l.]: European Wind Energy Association. Disponível em: <a href="http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/doc/wind\_energy/2002\_best\_practice.pdf">http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/doc/wind\_energy/2002\_best\_practice.pdf</a>.

EWEA, 2005, "Externalities". [S.l.]: European Wind Energy Association. Disponível em: <a href="http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\_documents/documents/projects/rexpansion/050531\_">http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\_documents/documents/projects/rexpansion/050531\_</a> Externalities.pdf>.

EWEA, 2009, **Wind Energy - The Facts**. [S.l.]: European Wind Energy Association. Disponível em: <a href="http://www.wind-energy-the-facts.org/">http://www.wind-energy-the-facts.org/</a>>.

EWEA, 2012, The Myth: "Wind power is expensive". **Wind Energy - The Facts**. Disponivel em: <a href="http://www.wind-energy-the-facts.org/en/mythology.html">http://www.wind-energy-the-facts.org/en/mythology.html</a>>. Acesso em: 19 Agosto 2012.

FOGEL, L. J.; OWENS, A. J.; WALSH., M. J., 1966, Artificial Intelligence through Simulated Evolution. New York: Wiley.

FONSECA, M. C.; FLEMING, J. P., 1995, An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization. **Evolutionary Computation**, 3. 1-16.

GILBERT, K. C.; HOLMES, D. D.; ROSENTHAL, R. E., 1985, A Multiobjective Discrete Optimization Model for Land Allocation. **Management Science**, n. 31. 1509–1522.

GIPE, P., 1995, Wind energy comes of age. New York, US: John Wiley and Sons.

GIPE, P., 2003, Wind Energy "Best Practice" Guides--Wresting Standards from Conflict. **Wind-Works.org**. Disponivel em: <a href="http://www.wind-works.org/articles/BestPractice.html">http://www.wind-works.org/articles/BestPractice.html</a>. Acesso em: 19 Agosto 2012.

GOLDBERG, E. D., 1989, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Boston, MA, USA: Addison-Wesley.

HAGEMANN, K., 2008, **Mesoscale Wind Atlas of South Africa**. Tese de Doutorado, University of Cape Town. [S.l.].

HANSEN, H. S., 2005, **GIS-based Multi-Criteria Analysis of Wind Farm Development**. ScanGis 2005: Proceedings of the 10th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science. [S.l.]: [s.n.]. p. 75-87.

HIESTER, T. R.; PENNELL, W. T., 1981, **The Meteorological Aspects of Siting Large Wind Turbines**. Washington: Pacific Northwest Laboratory.

HOLLAND, J. H., 1975, **Adaptations in Natural and Artificial Systems**. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.

HORN, D. L.; HAMPTON, C. R.; VANDENBERG, A. J., 1993, Practical application of district compactness. **Political Geography**, 12. 103-120.

HOUSTON, G.; JOHNSON, C., 2006, **EPRI-GTC Overhead Electric Transmission Line Siting Methodology**. Final Report, ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. [S.1.].

ICMBIO, 2012, UNIDADES DE CONSERVAÇÃO NOS BIOMAS. **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**. Disponivel em:

<a href="http://www.icmbio.gov.br/portal/biodiversidade/unidades-de-conservacao/biomas-brasileiros.html">http://www.icmbio.gov.br/portal/biodiversidade/unidades-de-conservacao/biomas-brasileiros.html</a>>. Acesso em: 16 Setembro 2012.

JANKOWSKI, P., 1995, Integrating geographical information systems and multiple criteria decision making methods. **International Journal of Geographical Information Systems**, n. 9. 251–273.

KAI, C.; BOA, H., 2010, Comparison of Spatial Compactness Evaluation Methods for Simple Genetic Algorithm Based Land Use Planning. Proceedings of the Joint International Conference on Theory, Data Handling and Modelling in GeoSpatial Information Science. [S.l.]: [s.n.].

KOZA, J. R., 1992, **Genetic Programming:** On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. Cambridge, MA: MIT Press.

LACTEC, 2007, Manual de Avaliação Técnico-Econômica de Empreendimentos Eólio-Elétricos. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, Engenharia Eólica – Camargo Schubert, 112 p. ISBN 978-85-88519-02-2.

MALCZEWSKI, J., 2000, On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common e Best Practice Approaches. **Transactions in GIS**, 4, n. 1. 5-22.

MALCZEWSKI, J., 2006, GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, 20, n. 7, (August). 703–726.

MICHALEWICZ, Z., 1996, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. 3. ed. Berlin: Springer.

MINOR, S. D.; JACOBS, T. L., 1994, Optimal Land Allocation for Solid and Hazardous. **Journal of Environmental Engineering**, 120, n. 5. 1095–1108.

MME, 2007, **Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas**. 2007. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 684 p. ISBN 978-85-7650-137-4.

MME, 2009, PROINFA Programa de incentivo às Fontes Alternativas de energia elétrica.

Ministério de Minas e Energia. Disponivel em:

<a href="http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/galerias/arquivos/apresentacao/PROINFA-ANEXO1-InstitucionalMME.pdf">http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/galerias/arquivos/apresentacao/PROINFA-ANEXO1-InstitucionalMME.pdf</a>. Acesso em: 19 Agosto 2012.

MOILOA, B. H. E., 2009, Geographical Information Systems for Strategic Wind Energy Site Selection. Dissertação de Mestrado, Faculty of Earth and Life Sciences of Vrije Universiteit Amsterdam. Amsterdam, p. 68.

MORTENSEN, N. G.; L. LANDBERG, I. T.; PETERSEN, E. L., 1993, Wind Atlas Analysis and Applicantion Program (WasP). User's Guide, RisØ National Laboratory. Roskilde.

MORTENSEN, N. G.; PETERSEN, E. L., 1997, Influence of topographical input data on the accuracy of wind flow modelling in complex terrain. European Wind Energy Conference & Exhibition 1997. Dublin, Ireland: [s.n.].

MORTENSEN, N. G.; SAID, U. S.; BADGER, J., 2006, **Wind Atlas for Egypt**. Proceedings of the Third Middle East – North Africa Renewable Energy Conference (MENAREC 3). Cairo, Egypt, June 12-14. : [s.n.]. p. 12 pp. Disponível em: <a href="http://www.windatlas.dk/egypt/Download/Wind%20Atlas%20for%20Egypt%20paper%2">http://www.windatlas.dk/egypt/Download/Wind%20Atlas%20for%20Egypt%20paper%2</a> 0(MENAREC3).pdf>. Acesso em: 18 set. 12.

NALLE, D. J.; ARTHUR, J. L.; SESSIONS, J., 2002, Designing Compact and Contiguous Reserve Networks with a Hybrid Heuristic Algorithm. **Forest Science**, 48, n. 1. 59–68.

O GLOBO, 2012, Durban mantém Protocolo de Kyoto, mas não define metas. **O Globo**. Disponivel em: <a href="http://oglobo.globo.com/pais/noblat/posts/2011/12/12/durban-mantem-protocolo-de-kyoto-mas-nao-define-metas-421194.asp">http://oglobo.globo.com/pais/noblat/posts/2011/12/12/durban-mantem-protocolo-de-kyoto-mas-nao-define-metas-421194.asp</a>. Acesso em: 19 Agosto 2012.

PETERSEN, E. L.; MORTENSEN, N. G.; LANDBERG, L.; HÙJSTRUP, J.; FRANK, H. P., 1998, Wind Power Meteorology. Part II: Siting and Models. **Wind Energy**, n. 1. 55-72.

PETIT, C., 1995, Winds of change: GIS help site wind farms in NE France. **GIS Europe**. 16–18.

PORRUA, F.; BEZERRA, B.; BARROSO, L. A.; LINO, P.; RALSTON, F.; PEREIRA, M., 2010, **Wind Power Insertion through Energy Auctions**. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. Minneapolis, MN: [s.n.]. (Julho). p. 8.

RECHENBERG, I., 1965, Cybernetic Solution Path of an Experimental, Problem Library Translation No. 1122. Farnborough, UK: Royal Aircraft Establishment, Ministry of Aviation.

REFOCUS, 2002, Footprints in the wind?: Environmental impacts of wind power development. **Refocus**, v. 3, n. 5, p. 30-33, (September–October). ISSN 1471-0846. Article based on a presentation done by Paul W. Magoha. Disponível em:

<a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147108460280083X">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147108460280083X</a>. Acesso em: 16 set. 2012.

ROCHA, N. D. A.; AMARANTE, O. C. D.; SCHULTZ, D. J.; SUGAI, M. V. B.; BITTENCOURT, R. M., 1999, Estabilização Sazonal da Oferta de Energia Através da complementaridade entre os regimes hidrológico e eólico. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE. Foz do Iguaçu: [s.n.].

RODMAN, L. C.; MEENTEMEYER, R. K., 2006, A geographic analysis of wind turbine placement in Northern California. **Energy Policy**, n. 34. 2137–2149.

SÁ, A. L. D., 2001, Wind Energy ATLAS of Brazil. **DEWI Magazine**, n. 19, (August).

SÁ, A. L. D., 2011, **Prospeção de Sítios**. [S.l.]. Módulo do Curso Básico de Energia Eólica realizado no CEPEL em Nov/2011.

SÁ, A. L. D.; DUTRA, R. M., 2011, **Relatório Técnico da Prospecção de Sítios Eólicos no Estados de Goiás**. Centro de Pesquisas de Energia Eólica. Rio de Janeiro, p. 49. (18026/2011).

SCHLEZ, W.; TINDAL, A., 2012, Wind Farm Siting and Layout Design. Disponivel em: <a href="http://www.wwindea.org/technology/ch02/en/2\_4\_2.html">http://www.wwindea.org/technology/ch02/en/2\_4\_2.html</a>. Acesso em: 12 Agosto 2012.

SCHMIDT, A. J., 2009, Implementing a GIS Methodology for Siting High Voltage Electric Transmission. **Papers in Resource Analysis**, Winona, MN.

SCHORER, T.; SPENGEMANN, P., 2007, Use of STRM Data for Wind Resource and Energy Yield Assessment of Wind Farms. **DEWI MAGAZIN**, n. 31, (Agosto).

SHIRABE, T., 2005, A Model of Contiguity for Spatial Unit Allocation. **Geographical Analysis**, 37, (May). 2–16.

SIMÃO, A.; DENSHAM, P. J.; HAKLAY, M., 2009, Web-based GIS for collaborative planning and public participation: An application to the strategic planning of wind farm sites. **Journal of Environmental Management**, n. 90. 2027–2040.

SIMÃO, A.; DENSHAM, P. J.; RODRIGUES, J. M. C., 2004, Um Sistema Internet-GIS para a Promoção da Participação Pública e Apoio à Decisão - Aplicação à Localização de Parques Eólicos. **Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra - INESC-Coimbra**, Coimbra, n. 12.

SIMÃO, A.; HAKLAY, M., 2005, **Zooming to the study area in GIScience research:** a three stage approach. Proceedings of the 13th Annual Conference GIS Research UK (GISRUK 05). [S.l.]: [s.n.]. Disponível em: <a href="http://discovery.ucl.ac.uk/16791/1/16791.pdf">http://discovery.ucl.ac.uk/16791/1/16791.pdf</a>>. Acesso em: 10 ago. 2012.

SPARKES, A.; KIDNER, D., 1996, **A GIS for the Environmental Impact Assessment of Wind Farms**. 11th ESRI European User Conference. [S.l.]: [s.n.]. Disponível em: <a href="http://proceedings.esri.com/library/userconf/europroc96/PAPERS/PN26/PN26F.HTM">http://proceedings.esri.com/library/userconf/europroc96/PAPERS/PN26/PN26F.HTM</a>. Acesso em: 9 ago. 2012.

SRINIVAS, N.; DEB, K., 1995, Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. **Evolutionary Computation**, 2, n. 3. 221-248.

TCU, 2007, **Cartilha de Licenciamento Ambiental**. 2. ed. Brasília: Tribunal de Contas da União. Disponível em: <www.tcu.gov.br>.

TIBA, C.; CANDEIAS, A. L. B.; FRAIDENRAICH, N.; BARBOSA, E. M. D. S.; NETO, P. B. D. C.; FILHO, J. B. D. M., 2010, A GIS-based decision support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil. **Renewable Energy**, n. 35. 2921-2932.

TOMLIN, C. D., 1990, Geographic information systems and cartographic modeling. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

TROEN, I.; E. L. PETERSEN, 1989, **European Wind Atlas**. RisØ National Laboratory. Roskilde.

VANEGAS, P.; CATTRYSSE, D.; ORSHOVEN, J. V., 2010, Compactness in Spatial Decision Support: A Literature Review. **COMPUTATIONAL SCIENCE AND ITS APPLICATIONS – ICCSA 2010**. 414-429.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C. J. S., 2004, Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação. UFRGS Centro de Ecologia. Porto Alegre. (978-85-63843-02-9). Disponível em: <a href="http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo">http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo</a>. Acesso em: 10 Set. 2012.

WENTZ, E. A., 2000, A Shape Definition for Geographic Applications Based on Edge, Elongation, and Perforation. **Geographical Analysis**, 32, n. 1, (January).

WILLIAMS, J. C., 2001, A Linear-Size Zero-One Programming Model for the Minimum Spanning Tree Problem in Planar Graphs. **Networks**, 39, n. 1. 53–60.

WILLIAMS, J. C., 2002, A Zero-One Programming Model for Contiguous Land Acquisition. **Geographical Analysis**, 34, n. 4, (October). 330-349.

WILLIAMS, J. C.; REVELLE, C. S., 1996, A 0–1 Programming Approach to Delineating Protected Reserves. **Environment and Planning B**, 23, n. 5. 607–624.

WILSON, M. F. J.; O'CONNELL, B.; BROWN, C.; GUINAN, J. C.; GREHAN, A. J., 2007, Multiscale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope. **Marine Geodesy**, 30. 3–35. Disponível em: <a href="http://www2.unil.ch/biomapper/Download/Wilson-MarGeo-2007.pdf">http://www2.unil.ch/biomapper/Download/Wilson-MarGeo-2007.pdf</a>>. Acesso em: 12 Set. 2012.

WOLSINK, M., 2000, Wind power and the NIMBY-myth: institutional capacity and the limited significance of public support. **Renewable Energy**, n. 21. 49-64. Disponível em: <a href="http://courses.washington.edu/efuture/Wolsink2000.pdf">http://courses.washington.edu/efuture/Wolsink2000.pdf</a>>. Acesso em: 16 set 2012.

WRIGHT, J.; REVELLE, C.; COHON, J., 1983, A multiobjective integer programming model for the land. **Regional Science and Urban Economics**, 13. 31-53.

WWEA, 2012, **World Energy Report 2011**. World Wind Energy Association. Bonn, Germany.

Disponível

em: <a href="http://www.wwindea.org/webimages/WorldWindEnergyReport2011.pdf">http://www.wwindea.org/webimages/WorldWindEnergyReport2011.pdf</a>>. Acesso em: 19 ago. 2012.

XIAO, N., 2005, **Geographic Optimization Using Evolutionary**. Proceedings of the 8th International Conference on GeoComputation of University of Michigan, US, 31 July - 3 August 2005. [S.l.]: GeoComputation CD-ROM.

XIAO, N., 2006, An Evolutionary Algorithm for Site Search Problems. **Geographical Analysis**, 38. 227–247.

XIAO, N.; BENNETT, D. A.; ARMSTRONG, M. P., 2002, Using evolutionary algorithms to generate alternatives for multiobjective site-search problems. **Environment and Planning A**, 34. 639-656.

### **ANEXO I**

# Orientações e práticas para seleção de sítios eólicos promissores

As orientações e práticas recomendadas para etapa inicial de seleção de sítios eólicos promissores pelo *Guia de "boas práticas" para o desenvolvimento de projetos eólicos* da EWEA (2002) e pelo *Manual de Avaliação Técnico-Econômica de Empreendimentos Eólio-Elétricos*(LACTEC, 2007).

# Guia de "Boas Práticas" para o desenvolvimento da energia eólica da EWEA

A primeira fase de qualquer desenvolvimento de energia eólica é seleção inicial do local mais adequado para o projeto. Em geral, o trabalho começa com a pesquisa em escritório de uma área escolhida, a fim de identificar um ou mais locais que possam ser adequados ao desenvolvimento. A análise inicial deve levar em consideração todos dados técnicos e ambientais publicados prontamente disponíveis. As etapas seguintes vão requerer uma investigação mais detalhada (EWEA, 2002).

O propósito dessa fase é identificar locais adequados e definir qualquer restrição técnica, comercial e ambiental a fim de que somente os locais mais apropriados sejam selecionados para o desenvolvimento das etapas seguintes. O guia de "boas práticas" para desenvolvimento de empreendimentos eólicos europeu (EWEA, 2002) divide os critérios iniciais para avaliação de locais em considerações técnicas e ambientais, que são listados a seguir:

#### Considerações Técnicas/Comerciais

 Potencial eólico: nesse estágio pode haver uma estimativa aproximada das velocidades do vento para um local ou área particular, o empreendedor normalmente irá identificar locais que oferecem um potencial para um recurso eólico adequado pelo uso de uma combinação de mapas da área, resultado de modelagem computacional (Atlas ou Mapas Eólicos), medições de estações anemométricas e aeroportos, ou dados de estudos de universidades. Valores considerados promissores são velocidades médias média anuais acima de 6 m/s (dependendo do porte da aplicação esse valor pode ser mais baixo).

- Conexão a rede elétrica: um exame do sistema de distribuição elétrica local e diálogo com a concessionária local irá indicar se uma conexão elétrica ao local proposto será tecnicamente e comercialmente viável. Informações sobre a rede elétrica na área, mapa de linhas de distribuição e possibilidades de conexão, podem ser obtidos com a concessionária local. A concessionária pode dar uma indicativa do custo provável de conexão do parque a rede elétrica.
- Acesso ao local: um estudo da rede rodoviária local dará uma ideia das prováveis restrições de acesso ao local proposto.
- Dimensão do projeto: para projetos eólicos de grande porte considerações do tamanho provável do sítio irá ajudar a estabelecer se o desenvolvimento se viável comercialmente.
- o Propriedade do local: considerações a respeito do proprietário do sítio.

### • Considerações Ambientais

- Aspecto visual: devem ser avaliadas a visibilidade do sítio proposto e a visibilidade potencial do projeto proposto a partir de mirantes públicos.
- O Proximidade de áreas residências: parques eólicos não deveriam ser localizados tão próximos de áreas residenciais de modo que possam afetar injustificadamente a amenidade de tais propriedades através de ruído, cintilação de sombra<sup>35</sup> (shadow flicker), dominação visual ou luz refletida<sup>36</sup>.

190

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> Sob certas combinações da posição geográfica e hora do dia, o sol pode passar atrás das pás do aerogerador e projetar sombras. Quando as pás estão girando a sombra pisca. O efeito só ocorre dentro de edificações onde a cintilação aparece através da abertura da janela. A intermitência da sombra depende, além do horário do dia, da geometria do aerogerador, da latitude, do relevo do terreno e da estação do ano (EWEA, 2002).

- Ecologia: informações existentes relacionadas à designação ecológica sobre uma área específica e espécies protegidas específicas que são encontradas na área o ano todo ou sazonalmente.
- Patrimônio histórico e arqueológico: a existência de edificações listadas, áreas de conservação e sítios arqueológicos podem afetar a aceitação de um local particular.
- Usos recreativos: qualquer área dentro ou próxima de um sítio identificada nos planos de desenvolvimento para uso recreativo deve ser considerada.
- O Telecomunicações: transmissões de micro-ondas, TV, radar e radio podem ser afetadas pela presença do aerogerador. Considerações devem ser dadas em situações onde isso pode ocorrer. Na maioria dos casos, problemas técnicos podem ser prontamente resolvidos.
- Aeroportos civis e militares: a autoridade aeroportuária relevante deve ser consultada para locais próximos a aeroportos.
- Áreas restritas: pode haver restrições para o desenvolvimento de parques eólicos nas proximidades de áreas de segurança, como instalações militares, instalações de telecomunicações, etc.

Em paralelo com a análise técnica, a aceitabilidade ambiental dos locais potenciais deve ser considerada. Muitas das considerações iniciais sobre a aceitabilidade ambiental pode ser auxiliada pelo estudo de dados existentes. A EWEA (2002) recomenda que uma avaliação do impacto ambiental seja realizada. Além disso, os empreendedores devem considerar as políticas nacionais, regionais e locais existentes e emergentes.

Uma boa pesquisa e consulta com autoridades políticas e ambientais locais nessa fase inicial de seleção do local devem evitar gastos desnecessários de tempo e recursos em locais inadequados. Nessa fase, enquanto as propostas ainda estão em um estágio especulativo, não é recomendado aos empreendedores iniciar um processo de consulta pública local, pois isso pode causar preocupação ou entusiasmo desnecessário sobre uma proposta que pode acabar não sendo viável (EWEA, 2002).

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> Sob certas condições a luz do sol pode ser refletida pelas pás do aerogerador em movimento. A quantidade de luz refletida ira depender do acabamento da superfície das pás e o ângulo do sol (EWEA, 2002).

Essa fase inicial procura abordar as questões que influenciam o desenvolvimento de modo superficial que serão examinadas com mais detalhes nas etapas subsequentes. A elaboração da avaliação do impacto ambiental só é iniciada no estágio seguinte com a escolha do local ou dos locais.

Na segunda fase de análise de viabilidade do projeto o local é sujeito a (EWEA, 2002):

- Avaliação técnica mais detalhada incluindo o monitoramento do vento no local para a determinação de um projeto preliminar e esquema para instalação;
- Avaliação econômica para o estabelecimento da viabilidade do projeto;
- Um exercício de levantamento e avaliação das restrições e oportunidades socioambientais específicas do local antes de realizar, onde relevante, a AIA na terceira fase; e
- Uma avaliação das restrições de planejamento.

É durante essa fase que o diálogo com a comunidade local sobre o projeto deve ser iniciado.

Na segunda fase, ao contrário da primeira que se resume basicamente a pesquisa em escritório, o trabalho técnico envolve a visitação e/ou a inspeção do próprio local para determinar mais a sua adequação e viabilidade. As investigações técnicas serão realizadas em:

- Recurso eólico: estimativas da velocidade do vento podem ser obtidas a partir de base de dados e modelos computacionais, entretanto a sensibilidade da produção de energia em relação à velocidade do vento necessita de uma mais acurada estimativa realizada a partir de medições no local.
- Ocupação e uso da terra: essa questão deve ser discutida cuidadosamente com o
  proprietário, qualquer inquilino e todos aqueles com direitos a ocupação da terra,
  para determinar a possibilidade e a melhor forma de integrar o projeto eólico com os
  usos existentes.
- Condições do solo: as condições do solo no local devem ser examinadas para considerar se a construção de fundações para os aerogeradores, a ereção das

máquinas e a provisão de vias de acesso é prática e econômica. Aspectos que podem não aparecer nos mapas, com cercas, muros, córregos e tubulações deverão ser levados em conta na concepção e esquema do projeto.

- Acesso ao local: a construção de um parque eólico necessita de acesso ao local para veículos pesados. O acesso ao local deve ser avaliado para determinar a adequação das vias públicas e privadas e quais melhoramentos podem ser necessários para permitir o desenvolvimento. A movimentação entre os aerogeradores deve ser prática e, portanto, as rotas das vias de acesso no sítio devem evitar declives acentuados no sítio.
- Conexão a rede elétrica: as rotas possíveis e a natureza da conexão à rede elétrica existente devem ser avaliadas junto com a localização da subestação. Os custos de conexão do parque eólico a rede elétrica pode variar bastante. A distância ao ponto de conexão mais próximo é o fator de determinante.
- Projeto preliminar: todos os fatores considerados até o momento devem ser levados em consideração na determinação da escala do projeto eólico.

As considerações ambientais nessa etapa são baseadas no levantamento das questões ambientais realizadas na etapa anterior, que devem ser revisadas subsequentemente. Para alguns locais, com pouca ou nenhuma informação disponível publicada, pode ser necessário realizar um trabalho de pesquisa preliminar a fim de identificar a sensibilidade do local potencial. Durante a segunda fase o escopo da avaliação ambiental requerida pela autoridade ambiental local deve ser acordado para ser realizado na etapa seguinte, quando o projeto proposto demonstrar que pode ser economicamente e ambientalmente viável. Algumas questões ambientais que podem ser levantadas no escopo da AIA pela autoridade ambiental local, baseadas em fatores como a natureza, dimensão e localização do projeto, são (EWEA, 2002):

- Justificativa da seleção do local
- Avaliação do impacto visual e na paisagem
- Avaliação do ruído acústico
- Avaliação ecológica
- Avaliação histórica e arqueológica

- Avaliação hidrológica
- Interferência com sistemas de telecomunicações
- Segurança das aeronaves
- Avaliação da segurança
- Gerenciamento do tráfego e construção
- Conexão a rede elétrica
- Efeitos na economia local
- Efeitos ambientais globais
- Efeitos no turismo e em atividades recreativas
- Desativação

# Manual de Avaliação Técnico-Ecônomica de Empreendimentos Eólicos da COPEL

O Manual de Avaliação Técnico-Ecônomica de Empreendimentos Eólicos (LACTEC, 2007), resultado de um projeto de pesquisa e desenvolvimento da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) realizado pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com a empresa de consultoria CAMARGO SCHUBERT Engenheiros associados, foi desenvolvido durante a primeira fase do PROINFA propondo uma metodologia de avaliação de empreendimento eólico adaptado ao contexto regulátorio brasileiro. Esse manual, ao contrário do guia de "Boas Práticas" da EWEA que propõe diretrizes gerais para desenvolvimento de projetos eólicos, propõe uma abordagem mais prática e técnica sobre o assunto.

Segundo LACTEC (2007) a fase inicial de seleção do local se inicia com a pesquisa em escritório de uma área com potencial eólico promissor, onde se escolhem os locais para inspeção em campo. A escolha da área deve ter suporte de ferramentas como dados e mapas de vento, imagens de satélite e modelos topográficos, e uma base cartográfica georreferenciada com vias de acesso, sistema elétrico, limites de áreas de preservação ambiental, e etc. Essa fase de pesquisa leva em consideração as seguintes questões (LACTEC, 2007):

- Levantamento do Potencial Eólico: para uma avaliação preliminar do potencial eólico de uma dada região o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (CEPEL, 2001) pode ser usado (já citado e discutido anteriormente na Seção 2.1). LACTEC (2007) apresenta uma lista de inventários de potencial eólico de vários estados do Brasil que podem ser consultados adicionalmente. Independente da existência ou não de estudos anteriores nas áreas de interesse, recomenda-se que a escolha dos melhores locais de projeto seja orientada por software de simulação númerica do vento para avaliar o potencial eólico da área, identificando-se assim, em conjunto com as condicionantes ambientais e de infraestrutura, os melhores locais para aproveitamento e inspeção em campo.
- Definição da Potência: é importante que o empreendedor estime no início do projeto a magnitude do investimento que pretende fazer. Entretanto, cada sítio possui fatores específicos que podem limitar a potência do projeto, como relevo complexo e restrições de acesso às áreas de interesse, questões ambientais, entre outros.
- Conexões Elétricas: o empreendedor é técnica e financeiramente responsável pela conexão do parque até a subestação adequada. Isto pode significar um grande investimento na construção de uma linha de interligação e, eventualmente, até a construção de uma subestação. Ressalta-se que o custo do investimento na construção de uma linha de transmissão (ou distribuição) é diretamente proporcional ao seu comprimento. Sendo assim, a distância entre a usina e o ponto de conexão é um parâmetro importante na escolha do melhor sítio para construção do parque eólico.
- Restrições Ambientais: é necessário fazer uma pesquisa preliminar sobre o impacto no meio ambiente de cada sítio. Flora e fauna podem ser protegidas por lei o ano inteiro ou temporariamente como, por exemplo, em uma unidade de conservação, e assim não permitir instalar um parque eólico. Devem ser analisadas também as áreas protegidas que se encontram nas proximidades do sítio. A interligação elétrica com a subestação não pode ser realizada sem licença ambiental.

- Informações Geográficas: para todas as áreas escolhidas, recomenda-se obter uma visão geográfica geral. Isto inclui informações sobre o acesso e a proximidade de áreas residenciais.
- Comunicação Remota: cada sítio deverá ser observado quanto à possibilidade de comunicação por telefonia móvel. Este recurso agrega uma grande vantagem na operação das torres de medição e telemetria de dados.

Em posse das informações levantadas durante pesquisa em escritório, os locais são avaliados com base nos seguintes critérios:

- Potencial eólio-elétrico dos sítios;
- Distância até a subestação mais próxima;
- Restrições ambientais;
- Condições de telecomunicação;
- Acesso ao sítio;
- Proximidades de áreas residenciais.

Os melhores sítios são então selecionados para serem inspecionados em trabalho de campo. É sugerido que entre três e cinco alternativas de sítios sejam pré-selecionadas. LACTEC (2007) apresenta um checklist em forma de tabela para auxiliar na escolha dos melhores sítios.

#### Referências

EWEA, 2002, European Best Practice Guidelines for implementation of wind energy projects. [S.l.]: European Wind Energy Association. Disponível em: <a href="http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/doc/wind\_energy/2002\_best\_practice.pdf">http://ec.europa.eu/energy/renewables/studies/doc/wind\_energy/2002\_best\_practice.pdf</a>.

CEPEL, 2001, Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Brasília: CEPEL.

LACTEC, 2007, Manual de Avaliação Técnico-Econômica de Empreendimentos Eólio-Elétricos. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, Engenharia Eólica – Camargo Schubert, 112 p. ISBN 978-85-88519-02-2.