

UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL - UNIJUÍ

JOSIANE COSTA DURIGON

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE
SISTEMAS EÓLICOS EM PROPRIEDADES RURAIS**

Ijuí
2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

JOSIANE COSTA DURIGON

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS
EÓLICOS EM PROPRIEDADES RURAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática.

Orientador: Professor Doutor Gideon Villar Leandro

Co-orientador: Professor Doutor Cassiano Rech

Ijuí
2008

“O último esforço da razão é reconhecer que existe uma infinidade de coisas que a
ultrapassam”.

(Blaise Pascal, Filósofo e Matemático Francês, 1623-1662)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Gideon Villar Leandro, orientador deste trabalho, pelos conhecimentos adquiridos e pela competência, dedicação, paciência e amizade demonstrados durante o tempo todo.

Ao Prof. Dr. Cassiano Rech, co-orientador deste trabalho, pelas sugestões e correções no decorrer da pesquisa.

Ao Prof. Ms. José Valdemir Muenchen, pela disponibilidade nas incontáveis solicitações, carinho e amizade demonstrados.

Aos docentes do curso de Mestrado em Modelagem Matemática e colegas de curso, pelos ensinamentos, pelas conversas proveitosas e pelas outras também.

À Geni, secretária do Mestrado em Modelagem Matemática, pela dedicação com que atendeu cada solicitação.

Às empresas que forneceram as informações necessárias para a realização deste trabalho.

À família que soube compreender as ausências.

Ao meu marido Júlio, amor da minha vida, companheiro em todos os momentos.

Enfim, agradeço a Deus, responsável por tudo...

RESUMO

A questão energética tem preocupado o mundo moderno forçando mudanças de paradigmas em toda a sociedade. A ameaça eminente de escassez de recursos naturais bem como os altos índices de poluição e degradação ambiental forçam a busca de alternativas energéticas limpas e renováveis a fim de abastecer as necessidades das gerações atuais sem comprometer as necessidades das gerações futuras. A energia elétrica é um bem público e, como tal, deve ter sua distribuição garantida a todos os setores, propiciando acesso ao controle e acionamento dos processos produtivos e como meio de inclusão social. Dada a tamanha importância do tema, este trabalho apresenta um modelo matemático para estudo da viabilidade econômica da implantação de sistemas eólicos para geração de energia elétrica em propriedades rurais, tendo em vista ser essa uma alternativa renovável promissora. Os fatores econômicos são determinantes na utilização de fontes de energia renováveis, é preciso utilizar os recursos de maneira racional e analisar cada cenário possível. A análise feita neste estudo considera, como possibilidade, a instalação de cinco modelos de aerogeradores fabricados por empresas nacionais. Para a análise dos dados, utilizaram-se os Softwares Excel 2.0 e Matlab 7.4. As despesas relativas à aquisição dos sistemas eólicos, à depreciação total e aos custos totais ao longo da vida útil dos projetos foram fornecidas pelos fabricantes dos aerogeradores e das baterias. Os dados foram processados, considerando-se diferentes cenários onde se variou a velocidade do vento; o tempo de vida útil das baterias; o valor da Taxa de Juros de Longo Prazo; o valor de mercado da energia produzida, entre outros. As variáveis econômicas, financeiras e de rentabilidade calculadas são representadas através do Valor Presente Líquido (*VPL*) da Taxa Interna de Retorno Modificada (*TIRM*) e do Período de Recuperação do Capital (*PRK*). Este estudo revelou que a velocidade do vento é o maior fator impactante na viabilidade econômica da utilização da energia eólica para geração de energia elétrica, inviabilizando projetos onde a velocidade do vento não é muito expressiva. Assim percebe-se que políticas governamentais de apoio à utilização de fontes renováveis podem alavancar a utilização destas fontes de energia em propriedades rurais.

Palavras-chave: Aerogeradores. Energia eólica. Análise econômica. Propriedades rurais.

ABSTRACT

The subject of energy has been concerning the modern world forcing changes of paradigms in the whole society. Therefore, the eminent threat of shortage of natural resources as well as the high pollution indexes and environmental degradation force the search of clean and renewable energy alternatives in order to supply the needs of the current generations without spending the needs of the future generations. Moreover, the electric power is a public property and, as such, it should have its guaranteed distribution to all sections, propitiating access to the control and launching of the productive processes as means of social inclusion. Given the importance of the theme, this work presents a mathematical model for an economical feasibility study for the implantation of eolic systems for electric power generation in rural properties being a promising renewable alternative. However, the economical factors are decisive in the use of renewable sources of energy, it is necessary to use the resources in a rational way and to analyze each possible location. Thus, the analysis accomplished in this study considers, as possibility, the installation of five aerogenerators models manufactured by national companies. For the analysis of the data, software Excel 2.0 and Matlab 7.4 were used. The relative expenses to the acquisition of the eolic systems, to the total depreciation and the total costs along the useful life of the projects were supplied by the manufacturers of the aerogenerators and of the batteries. The data were processed, being considered different locations where the speed of the wind was varied; the time of useful life of the batteries; the value of the Long-Term Interest rate; the market value according to the produced energy, among others. The economical, financial and profitability variables calculations are represented through the Net Present Value (*NPV*), of the Modified Internal Rate of Return (*MIRR*) and of the Capital Recovery Period (*PRK*). This study revealed that the wind speed is the most important factor in the economical viability of the use of the eolic energy for electric power generation, rejecting unfeasible projects where the wind speed is not much expressive. Therefore, it is noticed that supporting government policies concerning the use of renewable sources can promote the use of these sources of energy in rural properties.

Keywords: Aerogenerators. Eolic energy. Economical analysis. Rural properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Vista panorâmica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional.....	29
Figura 1.2: Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, localizada na região de Angra dos Reis (RJ).....	32
Figura 1.3: Média anual de insolação diária no Brasil (horas).....	35
Figura 2.1: Circulação atmosférica: energia solar, temperaturas médias anuais, campos de pressão, rotação da Terra.....	41
Figura 2.2: Aerogerador <i>Savonius</i>	44
Figura 2.3: Aerogerador <i>Darrieus</i>	44
Figura 2.4: Aerogerador de três pás.....	44
Figura 2.5: Aerogerador de pás múltiplas ou cata-ventos.....	45
Figura 2.6: Gráfico da curva de potência de um aerogerador.....	46
Figura 2.7: Exemplos de aerogeradores (da esquerda para a direita: pequeno, médio e grande).....	48
Figura 2.8: Distribuição da capacidade instalada no mundo de energia eólica.....	52
Figura 2.9: Velocidade média anual do vento a 50 m de altura no Brasil.....	53
Figura 2.10: Mapa do Rio Grande do Sul com potencial eólico anual a 75 m de altura.....	55
Figura 4.1: Curva de geração de energia.....	84
Figura 5.1: Fluxograma de um Algoritmo Genético simples.....	94
Figura 5.2: Representação esquemática de um cromossomo na forma binária.....	95
Figura 6.1: Curva de geração de energia dos Aerogeradores Gerar246, Verne550, Turbo 500, Turbo 2000 e Turbo 5000.....	105
Figura 6.2: Descrição do Investimento Inicial (II), Depreciação Total (DT) e Custos Totais (CT).....	107
Figura 6.3: Valor Presente Líquido (VPL) Aerogerador Gerar246.....	107

Figura 6.4: Taxa Interna de Retorno Modificada (<i>TIRM</i>) Aerogerador Gerar246	108
Figura 6.5: Período de Recuperação do Capital (<i>PRK</i>) Aerogerador Gerar246	108
Figura 6.6: Descrição do Investimento Inicial (<i>II</i>), Depreciação Total (<i>DT</i>) e Custos Totais (<i>CT</i>)	109
Figura 6.7: Valor Presente Líquido (<i>VPL</i>) Aerogerador Verne550	110
Figura 6.8: Taxa Interna de Retorno Modificada (<i>TIRM</i>) Aerogerador Verne550.....	110
Figura 6.9: Período de Recuperação do Capital (<i>PRK</i>) Aerogerador Verne550.....	110
Figura 6.10: Descrição do Investimento Inicial (<i>II</i>), Depreciação Total (<i>DT</i>) e Custos Totais (<i>CT</i>)	111
Figura 6.11: Valor Presente Líquido (<i>VPL</i>) Aerogerador Turbo 500.....	112
Figura 6.12: Taxa Interna de Retorno Modificada (<i>TIRM</i>) Aerogerador Turbo 500.....	112
Figura 6.13: Período de Recuperação do Capital (<i>PRK</i>) Aerogerador Turbo 500.....	112
Figura 6.14: Descrição do Investimento Inicial (<i>II</i>), Depreciação Total (<i>DT</i>) e Custos Totais (<i>CT</i>)	113
Figura 6.15: Valor Presente Líquido (<i>VPL</i>) Aerogerador Turbo 2000.....	114
Figura 6.16: Taxa Interna de Retorno Modificada (<i>TIRM</i>) Aerogerador Turbo 2000.....	114
Figura 6.17: Período de Recuperação do Capital (<i>PRK</i>) Aerogerador Turbo 2000.....	114
Figura 6.18: Descrição do Investimento Inicial (<i>II</i>), Depreciação Total (<i>DT</i>) e Custos Totais (<i>CT</i>)	115
Figura 6.19: Valor Presente Líquido (<i>VPL</i>) Aerogerador Turbo 5000.....	115
Figura 6.20: Taxa Interna de Retorno Modificada (<i>TIRM</i>) Aerogerador Turbo 5000.....	116
Figura 6.21: Período de Recuperação do Capital (<i>PRK</i>) Aerogerador Turbo 5000.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Estimativas do potencial eólico mundial	51
Tabela 2.2: Centrais eólicas em operação no Brasil. Situação em setembro de 2003.....	54
Tabela 2.3: Regimes diurnos e sazonais do vento para distintas regiões do Rio Grande do Sul.....	58
Tabela 6.1: Características Técnicas dos Aero geradores Gerar246, Verne550, Turbo 500, Turbo 2000 e Turbo 5000	104
Tabela 7.1: Cenários gerados comparando a escolha otimizada pelo programa e diferentes alternativas supostas	119
Tabela 7.2: Cenários gerados considerando diferentes velocidades de vento.....	121
Tabela 7.3 – Cenários gerados considerando a utilização e a não utilização de banco de baterias.....	123
Tabela 7.4: Cenários gerados considerando diferentes tempos de vida útil das baterias	124
Tabela 7.5: Cenários gerados considerando diferentes valores cobrados pelo kWh de energia fornecida	126
Tabela 7.6: Cenários gerados considerando diferentes taxas de juros e diferentes Taxas Mínimas de Atratividade Financeira	128

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A:	139
----------------	-----

NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA

<i>a</i>	Limite inferior do universo de soluções
<i>a.a.</i>	Ao ano
<i>a.C.</i>	Antes de Cristo
<i>AG_s</i>	Algoritmos Genéticos
<i>Ah</i>	Ampére-hora
<i>AIE</i>	Agência Internacional de Energia
<i>AM</i>	Amortização
<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>b</i>	Limite superior do universo de soluções
<i>BIG</i>	Banco de Informações de Geração
<i>BNDES</i>	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
<i>C</i>	Capital
<i>CBEE</i>	Centro Brasileiro de Energia Eólica
<i>CE</i>	Ceará
<i>CEEE</i>	Companhia Estadual de Energia Elétrica
<i>CEPEL</i>	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
<i>CERPCH</i>	Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas
<i>CH₄</i>	Metano
<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>CRESESB</i>	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
<i>CT</i>	Custos Totais
<i>°C</i>	Graus Celsius
<i>D</i>	Depreciação

<i>DNA</i>	Ácido desoxirribonucleico
<i>DT</i>	Depreciação Total
<i>E_G</i>	Energia produzida pelo aerogerador Gerar246 na velocidade de vento especificada
<i>ELETROBRÁS</i>	Centrais Elétricas Brasileiras S. A.
<i>E_P</i>	Energia produzida
<i>E_{T500}</i>	Energia produzida pelo aerogerador Turbo 500 na velocidade de vento especificada
<i>E_{T2000}</i>	Energia produzida pelo aerogerador Turbo 2000 na velocidade de vento especificada
<i>E_{T5000}</i>	Energia produzida pelo aerogerador Turbo 5000 na velocidade de vento especificada
<i>E_V</i>	Energia produzida pelo aerogerador Verne550 na velocidade de vento especificada
<i>EWEA</i>	European Wind Energy Association
<i>FC</i>	Fluxo de Caixa
<i>FEPAM</i>	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler
<i>FLC</i>	Fluxo Líquido de Caixa
<i>GW</i>	Gigawatt
<i>h</i>	Horas
<i>HNO₃</i>	Ácido nítrico
<i>H₂SO₄</i>	Ácido sulfúrico
<i>I</i>	Investimento
<i>II</i>	Investimento Inicial
<i>J_G(t)</i>	Valor dos Juros cobrados, aerogerador Gerar246, em função do tempo de financiamento
<i>J_{T500}(t)</i>	Valor dos Juros cobrados, aerogerador Turbo 500, em função do tempo de financiamento
<i>J_{T2000}(t)</i>	Valor dos Juros cobrados, aerogerador Turbo 2000, em função do tempo de financiamento

$J_{T5000}(t)$	Valor dos Juros cobrados, aerogerador Turbo 5000, em função do tempo de financiamento
$J_V(t)$	Valor dos Juros cobrados, aerogerador Verne550, em função do tempo de financiamento
k	Taxa Mínima de Atratividade Financeira
kg / m^3	Quilograma por metro cúbico
km	Quilômetro
km^2	Quilômetro quadrado
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
m	Metros
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MME	Ministério de Minas e Energia
m / s	Metros por segundo
MW	Megawatt
N_A	Número de aerogeradores
nt	Número de trocas de baterias
NO_x	Óxidos de nitrogênio
P	Tamanho da população
PA_G	Preço do aerogerador Gerar246
PA_{T500}	Preço do aerogerador Turbo 500
PA_{T2000}	Preço do aerogerador Turbo 2000
PA_{T5000}	Preço do Aerogerador Turbo 5000
PA_V	Preço do aerogerador Verne550
$PbGV$	Preço das baterias utilizadas pelos aerogeradores Gerar246 e Verne550
$PbGV(t)$	Valor das baterias utilizadas nos aerogeradores Gerar246 e Verne550 substituídas em tempos especificados
PbT	Preço das baterias utilizadas pelos aerogeradores Turbo 500, Turbo 2000 e Turbo 5000
$PbT(t)$	Valor das baterias utilizadas nos aerogeradores Turbo 500, Turbo 2000 e Turbo 5000 substituídas em tempos especificados

P_C	Valor de mercado da energia produzida
p_c	Probabilidade de cruzamento
PCH_S	Pequenas Centrais Hidroelétricas
$Pdes$	Potência desejada
PE	Pernambuco
$p(i)$	Probabilidade de seleção
PL	Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
$PLIB$	Programação Linear Inteira Binária
$PLIM$	Programação Linear Inteira Mista
$PLIP$	Programação Linear Inteira Pura
p_m	Probabilidade de mutação
P_N	Potência nominal
PPL	Problema de Programação Linear
$PotA_G$	Potência nominal do aerogerador Gerar246
$PotA_{T500}$	Potência nominal do aerogerador Turbo 500
$PotA_{T2000}$	Potência nominal do aerogerador Turbo 2000
$PotA_{T5000}$	Potência nominal do aerogerador Turbo 5000
$PotA_V$	Potência nominal do aerogerador Verne550
PRK	Período de Recuperação do Capital
$PROINFA$	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
q	Taxa unitária de reprodução do cromossomo mais apto
r	Número gerado aleatoriamente entre 0 e 1
$rank(i)$	Posição do cromossomo ao ser enfileirado em ordem decrescente de fitness
$r(i)$	Valor randômico
RGE	Rio Grande Energia
RL	Receita Líquida
RN	Rio Grande do Norte
RS	Rio Grande do Sul
$R\$$	Reais

$R\$/kWh$	Reais por quilowatt-hora
RT	Receita Total
SAC	Sistema de Amortizações Constantes
$SEMC$	Secretaria de Energia, Minas e Comunicações
SIN	Sistema Interligado Nacional
SO_x	Óxidos de enxofre
SO_2	Dióxido de enxofre
SW	Sudoeste
t	Duração de um período em anos
T	Total de horas do período analisado
TER	Taxa Externa de Retorno
TIR	Taxa Interna de Retorno
$TIRM$	Taxa Interna de Retorno Modificada
TJ	Taxa de Juros
$TJLP$	Taxa de Juros de Longo Prazo
TTR	Taxa Terminal de Retorno
TWh	Terawatt-hora
$UFPE$	Universidade Federal de Pernambuco
UPS	Uninterrupted Power Supply
V	Volts
V_E	Velocidade de entrada do vento
V_N	Velocidade nominal do vento
V_C	Velocidade de corte do vento
V_I	Valor inicial dos equipamentos
VIA_G	Valor inicial do aerogerador Gerar246
VIA_{T500}	Valor inicial do aerogerador Turbo 500
VIA_{T2000}	Valor inicial do aerogerador Turbo 2000
VIA_{T5000}	Valor inicial do aerogerador Turbo 5000
VIA_V	Valor inicial do aerogerador Verne550
$VibatA_G$	Valor inicial do banco de baterias do aerogerador Gerar246
$VibatA_{T500}$	Valor inicial do banco de baterias do aerogerador Turbo 500

$V_{ibatA_{T2000}}$	Valor inicial do banco de baterias do aerogerador Turbo 2000
$V_{ibatA_{T5000}}$	Valor inicial do banco de baterias do aerogerador Turbo 5000
V_{ibatA_v}	Valor inicial do banco de baterias do aerogerador Verne550
VF	Valor Futuro
VP	Valor Presente
VPL	Valor Presente Líquido
V_R	Valor Residual dos Equipamentos
V_U	Vida Útil dos Equipamentos
VUb	Vida Útil das baterias
VUP	Vida Útil do Projeto
W	Watts
x_1	Número de aerogeradores Gerar246
x_2	Número de aerogeradores Verne550
x_3	Número de aerogeradores Turbo 500
x_4	Número de aerogeradores Turbo 2000
x_5	Número de aerogeradores Turbo 5000
$X e Y$	Pais
$x e y$	Filhos gerados

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	21
1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	27
1.1 Introdução.....	27
1.2 Sistemas Hidroelétricos para Geração de Energia Elétrica	28
1.2.1 Vantagens	29
1.2.2 Desvantagens	30
1.3 Sistemas Termelétricos para Geração de Energia Elétrica.....	30
1.3.1 Centrais a Diesel.....	30
1.3.2 Centrais Nucleares	31
1.3.3 Centrais a Gás.....	32
1.4 Sistemas Solares para Geração de Energia Elétrica	32
1.4.1 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos	33
1.4.1.1 Vantagens	33
1.4.1.2 Desvantagens	33
1.4.2 Sistemas Termossolares.....	34
1.5 Sistemas Híbridos para Geração de Energia Elétrica	35
1.6 Sistemas Eólicos para Geração de Energia Elétrica	36
1.6.1 Vantagens	36
1.6.2 Desvantagens	37
2 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE FONTE EÓLICA	38
2.1 Introdução.....	38
2.2 Histórico da Energia Eólica.....	40

2.3 O Vento	41
2.4 Partes Componentes de uma Instalação Eólica	42
2.5 Aerogeradores.....	43
2.6 Fatores de Influência no Desempenho dos Sistemas Eólicos.....	48
2.6.1 Topografia	49
2.6.2 Barreiras Naturais	49
2.6.3 Superfície.....	50
2.7 Energia Eólica no Mundo	50
2.8 Energia Eólica no Brasil	52
2.9 Energia Eólica no Rio Grande do Sul.....	54
2.9.1 Ventos no Rio Grande do Sul.....	57
3 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	59
3.1 Introdução.....	59
3.2 Dimensões do Desenvolvimento Sustentável.....	60
3.2.1 Sustentabilidade Social.....	60
3.2.2 Sustentabilidade Econômica.....	61
3.2.3 Sustentabilidade Ecológica.....	61
3.2.4 Sustentabilidade Técnica	61
3.3 Energia e Meio Ambiente.....	61
3.3.1 Poluição do Ar Urbano	62
3.3.2 Chuva Ácida	62
3.3.3 Efeito Estufa e as Mudanças Climáticas	62
3.3.4 Desflorestamento e Desertificação	63
3.3.5 Degradação Marinha e Costeira	63
3.3.6 Alagamento.....	63
3.4 Energia na Propriedade Rural.....	63
3.5 Fontes de Energia na Propriedade Rural	67
3.5.1 Hidroelétrica	67
3.5.2 Termoelétrica.....	67
3.5.3 Gás e biodigestor	67
3.5.4 Eólica.....	68
3.5.5 Solar.....	68

4 FERRAMENTAL MATEMÁTICO E DESCRIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO.....	69
4.1 Introdução	69
4.2 Modelagem Matemática	69
4.3 Modelo Matemático.....	70
4.4 Pesquisa Operacional.....	71
4.5 Programação Linear e Programação Linear Inteira	74
4.6 Descrição do Modelo Matemático Proposto	76
4.6.1 Função Objetivo	77
4.7 Avaliação Econômica de Projetos	82
4.7.1 Influência das Receitas	83
4.7.2 Influência dos Custos	85
4.8 Avaliação da Rentabilidade de Projetos	87
4.8.1 Valor Presente Líquido (<i>VPL</i>).....	87
4.8.2 Taxa Interna de Retorno (<i>TIR</i>)	88
4.8.2.1 Taxa Interna de Retorno Modificada (<i>TIRM</i>)	90
4.8.3 Período de Recuperação do Capital (<i>PRK</i>)	90
4.9 Avaliação Financeira de Projetos	90
4.9.1 Fluxo Líquido de Caixa (<i>FLC</i>).....	91
5 ALGORITMOS GENÉTICOS.....	92
5.1 Introdução.....	92
5.2 Representação dos Cromossomos	94
5.3 Inicialização da População	96
5.4 Função de Avaliação	96
5.5 Operadores Genéticos.....	96
5.6 Seleção.....	97
5.6.1 Método <i>Ranking</i> Geométrico Normalizado.....	98
5.6.2 Método Elitista	99
5.7 Cruzamento ou <i>Crossover</i>	99
5.7.1 Cruzamento Aritmético	100
5.8 Mutação	100
5.8.1 Mutação Uniforme.....	101

5.9 Critério de Parada	101
5.10 Aplicações de Algoritmos Genéticos	102
6 AVALIAÇÃO DOS AEROGERADORES SELECIONADOS	103
6.1 Introdução	103
6.2 Critérios Considerados para o Cálculo dos Cenários	105
6.3 Resultados obtidos com o Aerogerador Gerar246	107
6.4 Resultados obtidos com o Aerogerador Verne550	109
6.5 Resultados obtidos com o Aerogerador Turbo 500	111
6.6 Resultados obtidos com o Aerogerador Turbo 2000	113
6.7 Resultados obtidos com o Aerogerador Turbo 5000	115
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO DO MODELO MATEMÁTICO NA GERAÇÃO DE CENÁRIOS	118
7.1 Introdução	118
7.2 Apresentação e Análise dos Cenários Construídos	119
7.2.1 Primeira situação	119
7.2.2 Segunda situação	121
7.2.3 Terceira situação	122
7.2.4 Quarta situação	124
7.2.5 Quinta situação	125
7.2.6 Sexta situação	127
CONCLUSÃO	130
REFERÊNCIAS	133
ANEXOS	138

INTRODUÇÃO

A energia, nas suas mais diversas formas, é indispensável à sobrevivência humana. E mais do que sobreviver, o homem sempre buscou evoluir, descobrir fontes e maneiras alternativas para adaptar-se ao ambiente em que vive conforme foram surgindo suas necessidades (ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, 2005).

Dessa forma, recursos naturais são descobertos, utilizados e até, algumas vezes, extintos, exigindo, então, a descoberta de outros ou novas formas de utilização.

O consumo de energia no mundo, em sua grande maioria, está vinculado às fontes de energia tradicionais, como petróleo, carvão mineral e gás natural. Como essas fontes são poluentes e não-renováveis, essa é uma questão que angustia quem se preocupa com o crescimento meteórico da emissão de poluentes na atmosfera.

Os dados da Agência Internacional de Energia - AIE mostram que o uso dos combustíveis fósseis vem aumentando 1,5 % ao ano. Em tempos de grande atividade econômica, o incremento é bem superior. Nos dias de hoje, o consumo desses combustíveis é cinco vezes maior do que foi em 1950. Além do petróleo, que polui bastante, muitos países utilizam intensamente o carvão mineral, que polui ainda mais (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2006).

No Brasil, a indústria de energia responde pelo abastecimento de 89,8 % do consumo nacional, os 10,2 % restantes são importados, principalmente nas formas de carvão mineral, gás natural e energia elétrica. As principais fontes energéticas utilizadas no país são: petróleo e derivados, gás natural, energia elétrica, carvão mineral, lenha e produtos da cana-de-açúcar (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2006).

Outro fator importante é o Brasil poder contar com uma fartura de energéticos não-poluentes, como a água para a eletricidade e a cana-de-açúcar para o álcool.

Já no Rio Grande do Sul, os energéticos mais demandados são o óleo diesel e a gasolina, no transporte de cargas e passageiros; a lenha nos seus usos agrícola (secagem de grãos e fumo), industrial (geração de calor e vapor) e residencial; a eletricidade em seus múltiplos usos e o carvão mineral. Os derivados secundários da biomassa utilizados no Estado são: o carvão vegetal, o bagaço de cana-de-açúcar, a lixívia, o álcool etílico anidro, o álcool etílico hidratado e o biogás.

Como fontes alternativas de energia, a Secretaria de Energia, Minas e Comunicações - SEMC - do Estado vem promovendo o aproveitamento de energia solar, eólica, biomassa e hidráulica (SILVEIRA, 2006).

Na maioria das vezes, a energia extraída da natureza não se encontra na forma mais adequada para os usos finais, necessitando passar por processos em centros de transformação, tais como refinarias, que transformam o petróleo em óleo diesel e gasolina; usinas hidrelétricas, que aproveitam a energia mecânica da água para produção de energia elétrica; carvoarias, que transformam a lenha em carvão vegetal, etc.

A eletricidade se tornou uma das formas mais versáteis e convenientes de energia passando a ser um recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de muitos países e regiões. Atualmente a produção de energia elétrica em grande escala é baseada na conversão controlada de várias formas de energia que podem ser renováveis ou não.

Perceber a energia elétrica como um bem comum, cuja garantia de universalização ao acesso constitui fator estratégico de inclusão e desenvolvimento, é primordial para o desenvolvimento econômico e social do país. Hoje, a energia elétrica constitui um insumo básico, está presente no cotidiano das pessoas, das empresas... Enfim, de uma maneira ou de outra, faz parte da vida de todos.

Diante desse cenário, as fontes de energia renováveis, de origem do movimento dos ventos, das marés, da energia solar e da geração por biomassa são as que vêm recebendo maior atenção e investimentos devido às questões ambientais que envolvem um uso mais consciente dos recursos energéticos causando o menor impacto ambiental possível. Muitos estudos já voltam suas pesquisas ao aproveitamento de recursos renováveis, como o vento e o sol, a fim de garantir o abastecimento energético e a qualidade de vida na Terra.

Esta realidade cerca de empolgação a utilização do vento como fonte de energia, foco de estudo deste trabalho, por ser uma forma de energia alternativa, limpa, renovável e inesgotável.

A possibilidade de inserção da fonte eólica ao sistema elétrico brasileiro, bem como no Estado do Rio Grande do Sul, vem ocorrendo de maneira relativamente significativa, com a implantação de alguns parques eólicos como o de Osório no Rio Grande do Sul e inúmeros projetos para construção de outros.

Isso se deve em muito ao crescimento significativo dos investimentos em projetos de geração eólica em nível mundial nos últimos anos, já que a instalação de aerogeradores para produção de energia elétrica tem crescido substancialmente, contando hoje com mais de 30 mil aerogeradores já em operação.

As estimativas apontam que, em 2020, o mundo terá 12 % da energia gerada pelo vento, com uma capacidade instalada de mais de 1.200 GW (*WINDPOWER; EWEA; GREENPEACE; WIND FORCE apud ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, 2005*).

No Brasil, a tendência observada também é de crescimento em investimentos de geração de energia elétrica utilizando fonte eólica. O país conta com um vasto potencial de ventos que permitem a utilização desta fonte renovável para o fornecimento de energia tanto em comunidades afastadas dos grandes centros quanto para as regiões próximas aos grandes centros produtores e consumidores do país (MME, 2007).

Os primeiros aerogeradores instalados no país foram na Ilha de Fernando de Noronha; hoje, o cenário energético nacional conta com parques eólicos em diversos estados, como Ceará, Pernambuco, Paraná, Rio Grande do Sul, entre outros.

Seguindo a tendência nacional, o Estado do Rio Grande do Sul também tem incorporado em sua matriz energética a produção de energia elétrica através de fonte eólica. Estudos que culminaram com a publicação do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul apontaram um grande potencial de ventos no Estado, o que gerou dezenas de projetos visando à utilização dessa fonte de energia. Como maior investimento no setor eólico, o estado conta com o Parque Eólico de Osório, instalado na Cidade de Osório, que já torna realidade a intenção de inserir a fonte eólica na matriz energética estadual.

Até pouco tempo, o custo de geração mais elevado e a maior possibilidade de risco inibiam os investimentos de empreendedores na geração elétrica através de fontes renováveis, como Biomassa, Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH_s) e, notadamente, Eólica e Solar.

Porém, nos últimos anos, vários fatores têm contribuído para a redução do custo da energia eólica, tais como: os avanços tecnológicos, o aumento de investimentos no setor, a crescente preocupação com o meio ambiente, a divulgação dessa tecnologia, a pressão da

sociedade com relação às fontes convencionais altamente poluentes e, principalmente, as políticas governamentais de incentivos à geração de energia elétrica e ao desenvolvimento dessa tecnologia.

Além disso, incentivar o uso de fontes alternativas para produção de energia não é mais uma simples decisão com fins puramente sociais e ambientais, mas, sim, representa compromissos de governo, inclusive do governo brasileiro, em acordos internacionais de substituição progressiva de combustíveis fósseis, redução de CO_2 e outros fatores ligados à questão ambiental, como a diminuição da emissão de gases causadores do efeito estufa.

Nesse contexto, insere-se a importância do meio ambiente sobre a vida do homem, o que vem, com o passar dos anos, aumentando a preocupação com a proteção e o uso adequado dos ecossistemas naturais. É necessário que haja uma política voltada à participação e divisão de responsabilidades entre os interesses governamentais, privados e comunitários quanto ao uso dos recursos naturais e da biodiversidade que conservam.

Essa idéia se funde com o pensamento referente ao desenvolvimento sustentável em que a capacidade de um recurso natural suportar a utilização humana é levada em consideração concomitantemente com a possibilidade de oferta dos mesmos recursos às gerações futuras, ou seja, é preciso fazer um uso racional dos recursos naturais hoje para que amanhã eles ainda existam. É preciso atender às necessidades presentes sem comprometer a possibilidade de que as gerações futuras satisfaçam as suas próprias necessidades. Da utilização consciente dos recursos naturais depende não só a existência humana e a diversidade biológica, como o próprio crescimento econômico.

Discussões recentes também demonstram a preocupação relativa à sustentabilidade energética como sendo uma das questões presentes no debate atual sobre a agricultura, motivo pelo qual o foco central deste trabalho volta-se para a área rural (BITTENCOURT, 2005).

Dentre os desafios colocados pela sociedade aos sistemas de produção agropecuária, estão incluídos os relacionados à necessidade de produção de alimentos e outras matérias-primas em quantidade e qualidade adequadas.

Também, exige-se que essa produção não contamine o meio ambiente nem utilize os recursos naturais de maneira irresponsável, além de levar em consideração os aspectos relacionados à equidade social (BITTENCOURT, 2005).

Portanto, exige-se que seja estabelecido um padrão de tecnologia sustentável ao longo do tempo.

Tomando como base essas premissas, esta dissertação tem como foco o estudo da viabilidade econômica da utilização de aerogeradores para produção de energia elétrica em

propriedades rurais, bem como em locais de difícil acesso onde fatores econômicos e/ou físicos ainda impedem o acesso da população à mesma. Para tal, construiu-se um modelo matemático de otimização linear inteira pura utilizando ferramental da matemática e da economia.

Tendo em vista que as reformas do setor elétrico brasileiro vêm promovendo uma significativa alteração do contexto econômico-institucional em que operam as empresas de energia elétrica e também a urgência em se tratar temas como o desenvolvimento sustentável em função dos elevados índices de degradação ambiental, busca-se confirmar a hipótese de que os investimentos em geração de energia elétrica através de fontes limpas e renováveis, apesar de serem socialmente desejáveis, nem sempre são suficientemente atrativos para o capital privado, tornando necessária uma ação interventiva do governo a fim de viabilizar os projetos.

Partindo dessa hipótese, o **Capítulo 1** aborda, com uma revisão histórica e conceitual, as características básicas da geração de energia elétrica em nível mundial, nacional e estadual.

O **Capítulo 2** aborda o histórico da energia eólica, bem como o desenvolvimento dos aerogeradores. Disserta sobre as características básicas da geração de energia utilizando o recurso natural vento, tais como: fatores que influenciam o desempenho dos sistemas eólicos e os impactos do uso da energia eólica. Por fim, situa a energia eólica no contexto atual no mundo, no Brasil e no Estado do Rio Grande do Sul.

O **Capítulo 3** faz referência ao desenvolvimento sustentável elencando aspectos energéticos relacionados à energia elétrica na propriedade rural.

No **Capítulo 4**, são tratados os elementos conceituais que se referem às ferramentas matemáticas utilizadas como embasamento teórico no decorrer da pesquisa. Nele é apresentado o modelo matemático proposto neste trabalho, construído com o ferramental da Programação Linear Inteira Pura (*PLIP*). Também são elencados aspectos referentes à avaliação econômica, de rentabilidade e financeira de projetos.

O **Capítulo 5** descreve a Metaheurística Algoritmos Genéticos (AG_s) utilizada como ferramenta para resolução do problema de Programação Linear Inteira Pura (*PLIP*) formulado, devido a esta ter como característica uma exploração do espaço de soluções potenciais mais amplo do que métodos convencionais.

No **Capítulo 6**, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da implementação das metodologias desenvolvidas considerando a instalação unitária e isolada dos aerogeradores em estudo.

O **Capítulo 7** apresenta as simulações de cenários considerando o modelo matemático proposto.

Na seqüência, são apresentadas algumas considerações finais, expondo as conclusões obtidas de todo o estudo realizado.

1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

1.1 Introdução

A principal fonte de energia da Terra é o Sol; da energia solar incidente, decorrem os combustíveis fósseis e vegetais, a biomassa, as energias hidráulica, eólica, entre outras.

Nas suas mais diversas formas, a energia é indispensável à sobrevivência da espécie humana. E mais do que sobreviver, o homem procurou sempre evoluir, descobrindo fontes e maneiras alternativas de adaptação ao ambiente em que vive e de atendimento às suas necessidades. Dessa forma, a exaustão, a escassez ou a inconveniência de um dado recurso tendem a ser compensadas pelo surgimento de outro(s).

A demanda por energia cresce mundialmente, numa velocidade acentuada, devido, principalmente, ao acesso de um maior número de pessoas a eletrodomésticos e, ainda, ao fato de a maioria das máquinas industriais ser alimentada por energia elétrica. Com isso, a necessidade de encontrar novas fontes de geração de energia é muito grande, pois as fontes atuais não comportam sozinhas acréscimos de demanda (SILVA; SERAPHIM; TEIXEIRA, 2000).

As fontes de energia classificam-se em duas, basicamente, as renováveis e as não-renováveis.

Fontes renováveis são aquelas em que os recursos vão se renovando continuamente, a reposição feita através da natureza é mais rápida que a utilização energética dos recursos, como as águas dos rios, marés, sol e ventos ou aquelas cujo manejo se mostre compatível com as necessidades de sua utilização energética, como no caso da biomassa (lenha, cana-de-açúcar, resíduos animais, humanos e industriais).

Já as fontes não-renováveis são aquelas cujo aproveitamento é finito, os recursos vão se extinguindo ou não se repõem na mesma velocidade de sua utilização. São assim o petróleo, o gás natural, os combustíveis nucleares, o carvão mineral, entre outros.

Considera-se como a produção de energia a quantidade de energia primária extraída de jazidas minerais, de florestas, de uma turbina hidráulica ou captada por um moinho ou aerogerador e, também, a quantidade de energia secundária originada em um centro de transformação.

A energia desempenha um papel fundamental na vida humana, compõe a infraestrutura necessária para a sobrevivência e desenvolvimento das sociedades.

1.2 Sistemas Hidroelétricos para Geração de Energia Elétrica

Energia hidráulica é a energia obtida a partir da energia potencial de uma massa de água. Ela se manifesta na natureza em fluxos de água, como rios e lagos, e pode ser aproveitada por meio de desníveis naturais, como quedas de água, ou artificiais, produzidos pelo desvio do curso original do rio.

Pode ser convertida na forma de energia mecânica (rotação de um eixo) através de turbinas hidráulicas ou moinhos de água. As turbinas, por sua vez, podem ser usadas como acionamento de um equipamento industrial, como um compressor, ou de um gerador elétrico, com a finalidade de prover energia elétrica para uma rede de energia.

É necessário que haja um fluxo de água para que a energia seja gerada de forma contínua no tempo. As represas (barragens) são lagos artificiais, construídos num rio, permitindo a geração contínua e constante de energia.

A determinação do potencial hidrelétrico de uma bacia hidrográfica estabelece a melhor divisão de queda, identificando os aproveitamentos que, no conjunto, propiciem um máximo de energia ao menor custo e com um mínimo de efeitos sobre o meio ambiente. Isso é fruto de uma análise que permite verificar a vocação de bacias hidrográficas, principalmente quanto aos aspectos topográficos, hidrológicos e geológicos para geração de energia elétrica (SILVEIRA, 2006).

A produção de energia elétrica de uma central hidrelétrica depende, dentre outros fatores, da vazão de água efetivamente usada para produzir a energia mecânica que acionará o

gerador elétrico. Em uma central hidrelétrica, a água utilizada pode ser totalmente liberada pelo aproveitamento, com reservatório de acumulação ou não, ou liberada apenas em parte.

Seu funcionamento, conceitualmente, é bastante simples: é o mesmo princípio da roda d'água que, movimentada pela água, faz girar um eixo mecânico. O gerador elétrico tem seu rotor acionado por acoplamento mecânico com a turbina e transforma energia mecânica em elétrica devido às interações eletromagnéticas ocorridas em seu interior (REIS, 2003).

As usinas hidrelétricas são classificadas, em geral, quanto ao uso das vazões naturais, à potência, à forma de captação da água e à função no sistema. Seu uso apresenta algumas vantagens e desvantagens, listadas a seguir.

A Figura 1.1 mostra uma vista panorâmica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, a maior em produção de energia elétrica no mundo hoje.



Figura 1.1: Vista panorâmica da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional.
Fonte: ITAIPU (2001).

1.2.1 Vantagens

- É um tipo de energia mais barata do que outras, como a energia nuclear.
- É menos agressiva ambientalmente do que a energia proveniente do petróleo ou do carvão.

1.2.2 Desvantagens

- Geram impactos ambientais, como o alagamento das áreas vizinhas e aumento no nível dos rios.
- Algumas vezes, podem mudar o curso do rio represado.
- Alterações na fauna e flora da região.
- Deslocamento de populações ribeirinhas.
- A decomposição da vegetação submersa dá origem a gases como o metano, o gás carbônico e o óxido nitroso, que causam mudanças no clima da terra.

1.3 Sistemas Termelétricos para Geração de Energia Elétrica

Em centrais termelétricas, o processo fundamental de funcionamento se baseia na conversão de energia térmica em energia mecânica e esta em energia elétrica.

A energia térmica é convertida em mecânica com o uso de um fluido que produzirá em seu processo de expansão, trabalho em turbinas térmicas; já o acionamento mecânico de um gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina converte a energia mecânica em elétrica (REIS, 2003).

A grande diversidade da geração termelétrica está, principalmente, nos diferentes tipos de combustível utilizados. Os principais tipos de centrais termelétricas são: centrais a diesel, centrais a vapor (não nucleares), centrais nucleares, centrais a gás e centrais geotérmicas.

1.3.1 Centrais a Diesel

As centrais a diesel são muito utilizadas em potências de até 40 MW para alimentação de sistemas isolados. Têm uso disseminado em regiões longínquas sem outra fonte de geração, como nos estados brasileiros do Amazonas e de Rondônia, entre outros.

Apresentam, como vantagem, a rápida entrada em carga, a simplicidade de operação e o fácil plano de manutenção. No entanto, apresentam limitações relacionadas com potência,

ruído e vibração, além de problemas, como dificuldade de aquisição e transporte de peças de reposição e altos custos dos combustíveis, principalmente em locais distantes.

1.3.2 Centrais Nucleares

Centrais nucleares são instalações industriais empregadas para produzir eletricidade a partir de energia nuclear. A energia nuclear é a energia liberada por uma reação denominada fissão nuclear: no reator nuclear, os núcleos dos átomos são bombardeados uns contra os outros, provocando o rompimento dos núcleos e a liberação de energia. Esse processo resulta em radiação e calor que, por sua vez, transforma a água em vapor. A pressão resultante é usada para produzir eletricidade.

A matéria-prima empregada na produção de energia nuclear é o urânio, um metal pesado radioativo. Seu uso é muito questionado, tanto pelos problemas de contaminação resultantes da extração do urânio, como pelas dificuldades de depósito final dos dejetos radioativos.

As instalações nucleares são construções muito complexas devido às diversas tecnologias industriais empregadas e ao elevado grau de segurança que é adotado. As reações nucleares, por suas características, são altamente perigosas. A perda do controle durante o processo pode elevar a temperatura a um valor que leve à fusão do reator, e/ou ocorrer vazamento de radiações nocivas para o exterior, comprometendo a saúde dos seres vivos.

Além disso, assim como em outros tipos de usinas termelétricas, freqüentemente a água empregada nos sistemas de refrigeração, quando lançada nos corpos d'água, aumenta a temperatura e prejudica a biodiversidade local. No caso das usinas nucleares do Brasil, o rejeito de calor é lançado ao mar.

As usinas nucleares também estão sujeitas a acidentes, como aconteceu nas usinas de *Three Miles Island*, nos Estados Unidos, em 1979, e *Chernobyl*, na Ucrânia, em 1986. O vazamento de radiação tem o poder de provocar alterações genéticas e câncer por várias gerações, além dos danos ambientais com conseqüências incalculáveis a longo prazo.

A Figura 1.2 mostra a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, localizada na região de Angra dos Reis no Estado do Rio de Janeiro.



Figura 1.2: Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, localizada na região de Angra dos Reis (RJ).

Fonte: AGÊNCIA REUTERS (1999).

1.3.3 Centrais a Gás

A geração de energia elétrica a partir de gás natural é feita pela queima do gás combustível em turbinas a gás, cujo desenvolvimento é relativamente recente, após a Segunda Guerra Mundial.

As principais razões para o baixo grau de difusão dessa tecnologia no âmbito do setor elétrico foram, durante muito tempo, restrições de oferta de gás natural, o baixo rendimento térmico das turbinas e os custos de capital relativamente altos (ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, 2005).

Nos últimos anos, esse quadro tem se modificado substancialmente, na medida em que o gás natural surge como uma das principais alternativas de expansão da capacidade de geração de energia elétrica em vários países, inclusive no Brasil.

1.4 Sistemas Solares para Geração de Energia Elétrica

A transmissão da energia a Terra pelo Sol se dá por meio de radiação eletromagnética de ondas curtas e os sistemas baseados no uso deste tipo de energia podem ser divididos basicamente em dois (REIS, 2003).

1.4.1 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos

Estes sistemas efetuam a transformação da energia solar em elétrica diretamente. Um sistema fotovoltaico de produção de energia elétrica compreende o agrupamento de módulos em painéis fotovoltaicos e de outros equipamentos relativamente convencionais que transformam ou armazenam a energia elétrica. Seu uso apresenta algumas vantagens e desvantagens, que são listadas a seguir (LEVA et al., 2004):

1.4.1.1 Vantagens

- Gera energia mesmo em dias nublados.
- Possui grande vida útil, acima de 25 anos.
- Gera energia de 12 V (corrente contínua).
- É compatível com qualquer bateria.
- Seu funcionamento é silencioso.
- Possui um sistema modular levíssimo de simples instalação, com fácil manuseio e transporte.
- Pode ser ampliado conforme a necessidade.
- A manutenção é quase inexistente.
- Não possui partes móveis que possam se desgastar.
- Não produz contaminação ambiental.

1.4.1.2 Desvantagens

- As células fotovoltaicas necessitam de tecnologia sofisticada para sua fabricação.
- O custo de investimento é elevado.
- O rendimento real de conversão de um módulo é reduzido face ao custo do investimento (o limite teórico máximo numa célula de silício cristalino é cerca de 28 %).

- Necessita de um armazenador de energia.
- Seu rendimento é dependente do índice de radiação, temperatura, quantidade de nuvens, dentre outros.

Suas principais aplicações são: eletrificação de residências, telecomunicações, suprimento de água, subestações energéticas, refrigeração medicinal, iluminação pública, sinalização/bóias marítimas, proteção catódica contra corrosão em tubulações e cercas elétricas (LEVA et al., 2004).

1.4.2 Sistemas Termossolares

São sistemas em que a energia solar é usada para produzir o vapor que acionará uma termelétrica a vapor. É um processo que converte a energia solar em energia térmica e esta, por sua vez, em energia elétrica.

Outra maneira também eficiente de aproveitamento da energia solar incidente é através do uso de coletores térmicos, dispositivos capazes de transformar a luz do sol em calor, que pode ser utilizado diretamente no aquecimento de água para consumo.

A radiação solar incidente varia de acordo com a localização na superfície da Terra e esse potencial deve ser levado em conta para a utilização deste recurso energético. A Figura 1.3 mostra a média anual de insolação diária no Brasil em horas.

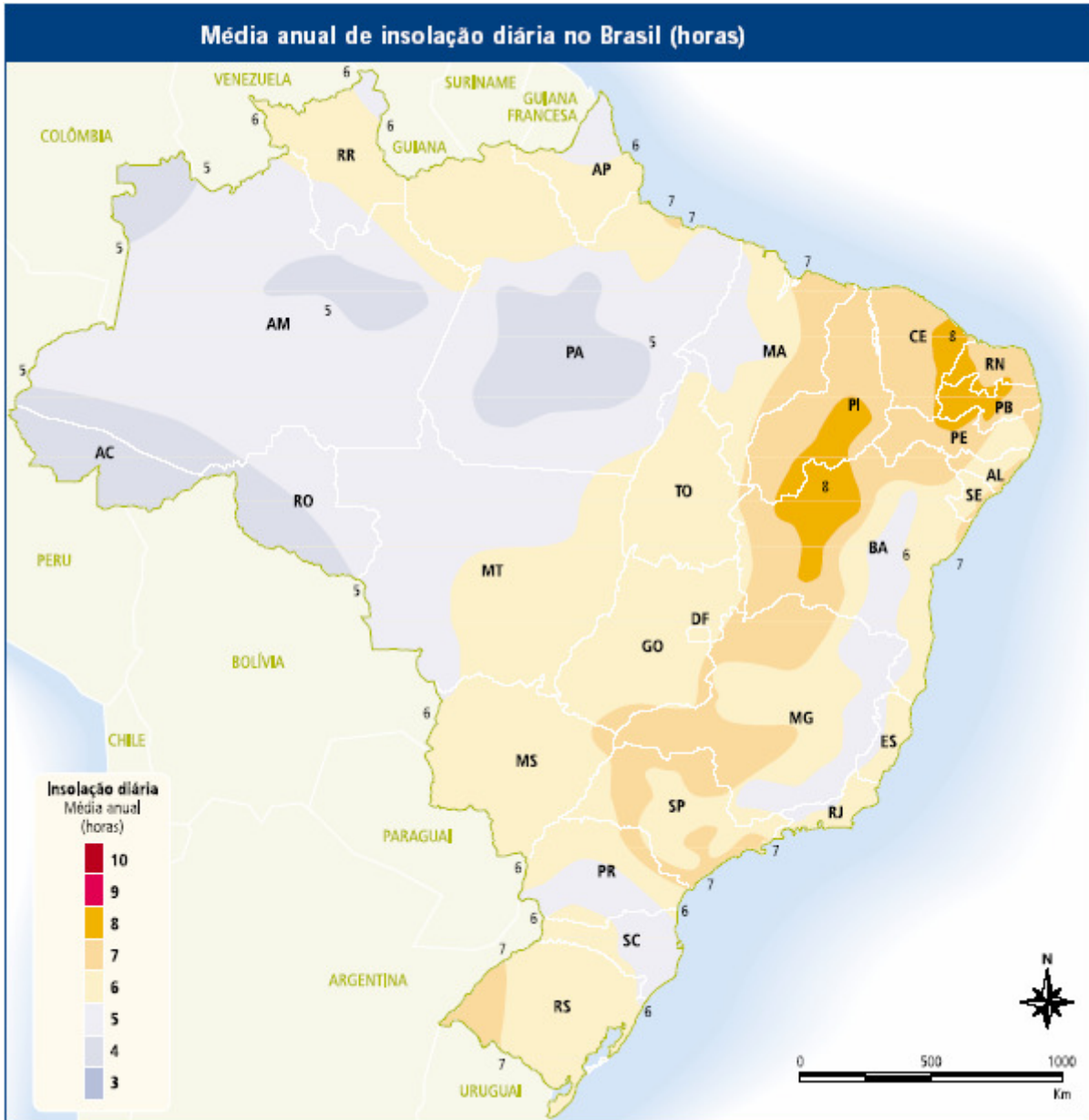


Figura 1.3: Média anual de insolação diária no Brasil (horas).
 Fonte: ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL (2000).

1.5 Sistemas Híbridos para Geração de Energia Elétrica

Sistemas híbridos são sistemas para geração de energia elétrica que combinam diversas fontes de energia renováveis ou não para aplicação no planejamento descentralizado e no suprimento energético de localidades isoladas.

Representam uma forma importante de utilização racional dos recursos energéticos dependendo da estrutura regional e das condições climáticas. Existem diferentes possibilidades de combinações: solar-diesel, eólico-diesel, solar-eólico, diesel-eólico-solar, biogás-eólico-solar entre outros.

1.6 Sistemas Eólicos para Geração de Energia Elétrica

O uso da energia cinética dos ventos para a realização de trabalho e a produção de energia elétrica tem se mostrado uma alternativa promissora no campo energético.

Os sistemas eólicos constituem uma alternativa para diversos níveis de demanda. As pequenas centrais podem suprir localidades menores, distantes da rede, contribuindo para o processo de universalização do atendimento. Já as centrais de grande porte têm potencial para atender uma significativa parcela do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O uso da energia eólica apresenta algumas vantagens e desvantagens, listadas a seguir:

1.6.1 Vantagens

- Há reduzida emissão de poluentes atmosféricos.
- Trata-se de fonte de energia limpa e renovável.
- Pode ser complementar às redes tradicionais.
- O tempo de construção de suas instalações é rápido.
- Possui instalações móveis.
- Não consome combustíveis.
- É abundante.
- Permite que o terreno ocupado pelos parques eólicos seja utilizado para outros fins, por exemplo, agrícolas.
- Está entre os sistemas de produção de energia elétrica mais seguros.
- Causa baixo impacto ambiental.
- Oferece boa vida útil dos aparelhos (20 anos em média).

1.6.2 Desvantagens

- Instável, está sujeita a variações do vento e calmarias.
- Os equipamentos são caros.
- Produz impactos sonoros devido ao ruído dos rotores.
- Causa impactos visuais decorrentes do agrupamento de torres e turbinas eólicas gerando efeito de sombras em movimento e reflexões intermitentes.
- Existem interferências eletromagnéticas que podem causar perturbações nos sistemas de comunicação e transmissão de dados.
- Ocorrem efeitos sobre as aves do local.

Apesar de efeitos negativos, já listados anteriormente, como alterações na paisagem natural, parques eólicos tendem a atrair turistas, gerando renda, emprego, arrecadações e promovendo o desenvolvimento regional.

2 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE FONTE EÓLICA

2.1 Introdução

A utilização do vento como fonte de energia é uma prática utilizada há milênios pela humanidade possibilitando o deslocamento de barcos a vela, irrigações, drenagens, moagem de grãos, entre outros.

Hoje, a energia eólica é considerada uma das mais promissoras fontes naturais de energia, principalmente porque é renovável e limpa. Além disso, as turbinas eólicas podem ser utilizadas tanto em conexão com redes elétricas como em lugares isolados, tornando-se estratégica para o desenvolvimento sustentável.

A energia eólica pode ser convertida em energia útil por dois tipos de sistemas bem distintos: um de construção simples, o moinho-de-vento, para produzir energia mecânica, e o outro, o aerogerador, que serve para produção de eletricidade e para o qual a experiência atual é bastante limitada, mas que, em contrapartida, atrai muito interesse para o futuro (SILVA; SERAPHIM; TEIXEIRA, 2000).

Os aerogeradores são a evolução natural dos cata-ventos, possuem alto rendimento aerodinâmico e uma drástica redução das perdas mecânicas, uma vez que toda transmissão é feita eletricamente, por um fenômeno conhecido como acoplamento elétrico direto (EÓLICA RIO, 2007, p. 01).

Nos últimos anos, o interesse pela energia eólica aumentou, principalmente com o disparo do preço do petróleo. Mesmo com o preço elevado de alguns aerogeradores, o

investimento é atraente devido a o vento ser uma fonte inesgotável de energia, enquanto o petróleo, não.

Para a instalação de parques eólicos, é interessante observar as características do local, para que a eficiência energética do sistema seja a maior possível. A determinação do potencial eólico fornece informações necessárias ao planejamento e utilização dessa fonte natural de energia de uma forma racional. Essa avaliação deve ser realizada através de um estudo das velocidades e da variação da direção dos ventos por um período mínimo de um ano. Deve-se saber o quanto de energia está disponível e até que ponto pode ser convertido em energia mecânica ou elétrica (SILVA; SERAPHIM; TEIXEIRA, 2000).

Geralmente, uma avaliação rigorosa requer levantamentos específicos, mas dados coletados em aeroportos, estações meteorológicas e outras aplicações similares podem fornecer uma primeira estimativa do potencial bruto ou teórico de aproveitamento da energia eólica (ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, 2005).

A quantidade de eletricidade que pode ser gerada pelo vento depende diretamente de quatro fatores: da quantidade de vento que passa pela hélice, do diâmetro da hélice, da dimensão do gerador e do rendimento de todo o sistema (ARAUJO, 2004).

Melhorar a eficiência na produção de eletricidade significa melhorar o aproveitamento da energia disponível nos ventos.

Sistemas eólicos de produção de energia elétrica podem ser uma alternativa para complementar ou fornecer energia onde não há rede de distribuição ou o fornecimento é deficitário.

A energia eólica também pode ser utilizada para aquecimento de água, calefação, carregamento de baterias, congelamento de produtos perecíveis, secagem de grãos, bombeamento de água, irrigação, dessalinização, entre outras atividades.

Isso promove uma redução no consumo de energia elétrica utilizada para estes fins e um desenvolvimento sócio-econômico-ambiental sustentável, descentralizado e diversificado, importante para o desenvolvimento nacional, em contraposição à utilização de energia fornecida por fontes não-renováveis ou pelas renováveis tradicionais que provocam grandes impactos ambientais.

O uso da energia cinética dos ventos para a realização de trabalho e a produção de energia elétrica é hoje uma alternativa das mais importantes dado o seu baixíssimo impacto sócio-ambiental e sua característica renovável. Paralelamente aos ganhos ambientais decorrentes do uso da energia eólica, saliente-se que esta atividade é perfeitamente compatível com os principais usos do solo, em especial a agropecuária, atividade econômica predominante em muitas das regiões que apresentam os melhores potenciais (ROUSSEF, 2002).

Outro fator importante a ser considerado é a possibilidade de reduzir-se a emissão de milhões de toneladas de gás carbônico/ano, com a utilização de fonte eólica para produção de eletricidade, ampliando as possibilidades de negócios de Certificação de Redução de Emissão de Carbono, nos termos do Protocolo de *Kyoto* (MME, 2007).

2.2 Histórico da Energia Eólica

Uma das primeiras formas de energia conhecida, o vento, já era empregada por volta de 3500 a.C., para impulsionar embarcações com velas feitas de tecido que transportavam mercadorias ao longo do rio Nilo, no antigo Egito.

Já no século V, os persas construíram os primeiros moinhos-de-vento para bombear água até as áreas de irrigação e moer grãos. Durante os séculos XI e XII, os moinhos foram projetados de acordo com as condições geográficas para obter o melhor aproveitamento do sentido predominante dos ventos, mantendo o eixo motor numa direção fixa. No século XV, na Holanda, começaram a surgir moinhos com cúpula giratória, que permitia posicionar o eixo das pás na direção dos ventos (BITTENCOURT, 2005).

Com a Revolução Industrial, os moinhos de vento sofreram modificações para se adaptar à velocidade constante necessária para manter o ritmo de produção, sendo, então, nesse período, que foram criados os primeiros sistemas de controle e de potência que permitiram aperfeiçoar e integrar os moinhos-de-vento a essas unidades produtivas (BITTENCOURT, 2005).

A descoberta da eletricidade e a instalação de geradores e redes de transmissão em larga escala, no final do século XIX, originaram um declínio na utilização de moinhos-de-vento.

Somente um século depois, com a crise internacional do petróleo, na década de 1970, é que novamente se retomou o interesse pela energia eólica e houve investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos eólicos em escala comercial.

Com a descoberta de novas tecnologias e o aperfeiçoamento dos sistemas já existentes, os moinhos-de-vento evoluíram até chegar aos aerogeradores atuais que vêm sendo empregados em larga escala nos países desenvolvidos desde o início da década de 1990, normalmente com subsídios governamentais.

As pesquisas atuais concentram-se em novos materiais que permitam desenvolver aerogeradores de maior porte, com potência maior que os existentes (BITTENCOURT, 2005).

2.3 O Vento

O vento é uma forma de energia cinética resultante do aquecimento desigual da superfície da Terra pelos raios do Sol e de seus movimentos de rotação e translação (CAMPOS, 2004). Apesar de sua aparente imprevisibilidade, traduz uma contínua movimentação da atmosfera.

A Figura 2.1 mostra a circulação atmosférica: energia solar, temperaturas médias anuais e os campos de pressão e rotação da Terra.

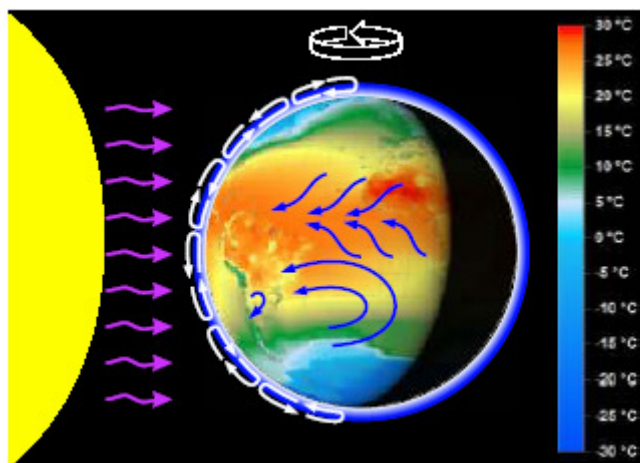


Figura 2.1: Circulação atmosférica: energia solar, temperaturas médias anuais, campos de pressão e rotação da Terra.

Fonte: AMARANTE et al. (2002).

Ele pode ser considerado como o ar em movimento, sendo que o ar quente se movimenta mais que o frio, torna-se menos denso e tende a subir; é, então, substituído por ar mais frio e denso.

Existem locais no globo terrestre onde os ventos jamais param de “soprar”, pois os mecanismos que os produzem, aquecimento no Equador e resfriamento nos pólos, estão sempre presentes na natureza; são chamados de ventos planetários ou constantes.

Também as variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos em qualquer local da superfície terrestre; como resultado, surgem os ventos continentais ou periódicos.

Já os ventos locais são originados por outros mecanismos específicos, são ventos que sopram em determinadas regiões e são resultantes das condições locais que os tornam bastante individualizados.

As características do vento são fortemente influenciadas pela topografia, pelo clima, pela localização geográfica, pela vegetação e pela época do ano em que ocorrem.

A velocidade do vento é medida com aparelhos chamados anemômetros. Esses aparelhos normalmente possuem três ou mais pás girando ao redor de um pólo vertical. Quanto mais rápido for esse giro, maior é a velocidade do deslocamento do ar.

2.4 Partes Componentes de uma Instalação Eólica

Um sistema eólico é constituído por vários componentes que devem trabalhar em harmonia de forma a propiciar um maior rendimento final. As principais partes componentes de uma instalação eólica são (CARVALHO, 2003):

- Pás: na maioria dos casos, o conjunto de pás é igual a três, sendo denominado rotor. As pás devem conciliar uma série de características como leveza, fortaleza e bom rendimento aerodinâmico. Na maior parte das aplicações, são produzidas assumindo contornos retangulares ou trapezoidais;
- Cubo: elemento de conexão das pás, transmitindo forças, conjugados e vibrações atuantes sobre as pás para o eixo do rotor;
- Eixo do rotor: em unidades que não possuem engrenagens, o eixo do rotor representa o próprio eixo do gerador elétrico; caso contrário, a caixa de engrenagem realiza o casamento entre o eixo do rotor e o eixo do gerador;

- Caixa de engrenagens: está presente na maioria das instalações interligadas à rede elétrica e funciona como elemento de ligação entre a baixa rotação das pás e a elevada rotação do gerador elétrico. Algumas unidades dispensam o uso de engrenagens através do uso de gerador elétrico com elevado número de pares de pólos;
- Gerador elétrico: elemento responsável pela geração de eletricidade. Em geral, são empregadas máquinas de indução ou síncronas convencionais para unidades de média e grande potência; já em unidades de pequena potência, são empregadas também máquinas síncronas com excitação via ímãs permanentes;
- Unidades de controle: são responsáveis por diferentes tarefas como o acionamento do deslocamento angular das pás em torno do eixo e do acompanhamento da direção do vento pela nacela;
- Circuitos eletrônicos: são responsáveis por diversas tarefas, como o desacoplamento elétrico entre o gerador e a rede através de circuitos retificadores e a entrega de eletricidade dentro das exigências de qualidade de energia;
- Torre: constitui o elemento de sustentação da nacela.

2.5 Aero geradores

O uso da energia do vento para geração elétrica vem se expandindo no mundo a taxas crescentes. Esta rapidez na expansão se deve em grande parte ao ciclo de sua efetivação, que envolve escala industrial em todas as principais etapas, sendo fundamental ressaltar que, para a expansão eólica, tem influência decisiva sua característica de energia limpa, o que usualmente simplifica e acelera o licenciamento ambiental.

No início da utilização da energia eólica, surgiram aerogeradores de vários tipos: eixo horizontal, eixo vertical, com apenas uma pá, com duas e três pás, gerador de indução, gerador síncrono, etc.

Aerogeradores de eixo vertical possuem um eixo vertical e aproveitam o vento que vem de qualquer direção. São mais indicados para moagem de grãos, recargas de baterias e irrigação. Os aerogeradores com eixo vertical mais usados são o *Savonius*, Figura 2.2 e o *Darrieus*, Figura 2.3.



Figura 2.2: Aerogerador *Savonius*.
Fonte: CERPCH (2007).



Figura 2.3: Aerogerador *Darrieus*.
Fonte: CERPCH (2007).

Aerogeradores de eixo horizontal são utilizados para bombeamento de água e geração de eletricidade. Dependem da direção do vento e podem ter uma, duas, três ou quatro pás. A figura 2.4 mostra um dos aerogeradores mais utilizados na geração de energia elétrica, o aerogerador de três pás.



Figura 2.4: Aerogerador de três pás.
Fonte: CERPCH (2007).

Aerogeradores de pás múltiplas ou cata-ventos possuem de 16 a 32 pás e chegam a ter 15 m de altura. São mais usados para o bombeamento de água e produzem baixa potência devido ao número elevado de pás, Figura 2.5.



Figura 2.5: Aerogerador de pás múltiplas ou cata-ventos.
Fonte: CERPCH (2007).

Com o passar do tempo, consolidou-se o projeto de aerogeradores com as seguintes características: eixo de rotação horizontal, três pás, alinhamento ativo, gerador de indução e estrutura não-flexível, como ilustrado na Figura 2.4.

Sendo uma das fontes emergentes com maior taxa de expansão na área energética, as máquinas eólicas se encontram em franco desenvolvimento tecnológico, tendo como tendência principal o aumento das dimensões e capacidade unitária das turbinas.

Aerogeradores com capacidade de até 2000 kW podem ser considerados como tecnologicamente consolidados, devido à quantidade de máquinas já operacionais no mundo. Aerogeradores maiores, apesar de já disponíveis no mercado e com unidades instaladas, ainda podem ser considerados como na etapa de consolidação tecnológica (AMARANTE et al., 2002).

Em relação aos níveis de ruído, os aerogeradores satisfazem os requisitos ambientais, mesmo quando instalados a distâncias da ordem de 300 m de áreas residenciais. Esses aspectos contribuem para que a tecnologia eólio-elétrica apresente o mínimo impacto ambiental, entre as fontes de geração aptas à escala de Gigawatts (*GW*) (AMARANTE et al., 2002).

A geração elétrica, usualmente, se inicia com velocidades de vento da ordem de 2,5 m/s - 3,0 m/s; abaixo desses valores, o conteúdo energético do vento não justifica aproveitamento.

Velocidades superiores a aproximadamente 12 m/s - 15 m/s ativam o sistema automático de limitação de potência da máquina, que pode ser por controle de ângulo de

passo das pás ou por estol aerodinâmico, dependendo do modelo de aerogerador, que permite que, mesmo em velocidades maiores de vento, o equipamento continue produzindo energia com segurança.

A potência gerada por um aerogerador é função direta da densidade do ar que impulsiona o rotor. As curvas de potências fornecidas pelos fabricantes são usualmente dadas para condições padrão da atmosfera (15 °C, nível do mar, densidade do ar 1.225 kg/m³) (AMARANTE et al., 2002). Logo, o desempenho das máquinas deve ser corrigido para diferentes condições de operação, levando em consideração a variação da densidade com a altitude e a temperatura local.

Recentes desenvolvimentos tecnológicos (sistemas avançados de transmissão, melhor aerodinâmica, estratégias de controle e operação das turbinas, etc.) têm reduzido custos e melhorado o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos.

O custo dos equipamentos, que era um dos principais entraves ao aproveitamento comercial da energia eólica, reduziu-se significativamente nas últimas duas décadas.

A Figura 2.6 descreve a curva de potência típica da operação normal de um aerogerador com controle por passo variável (REIS, 2003).

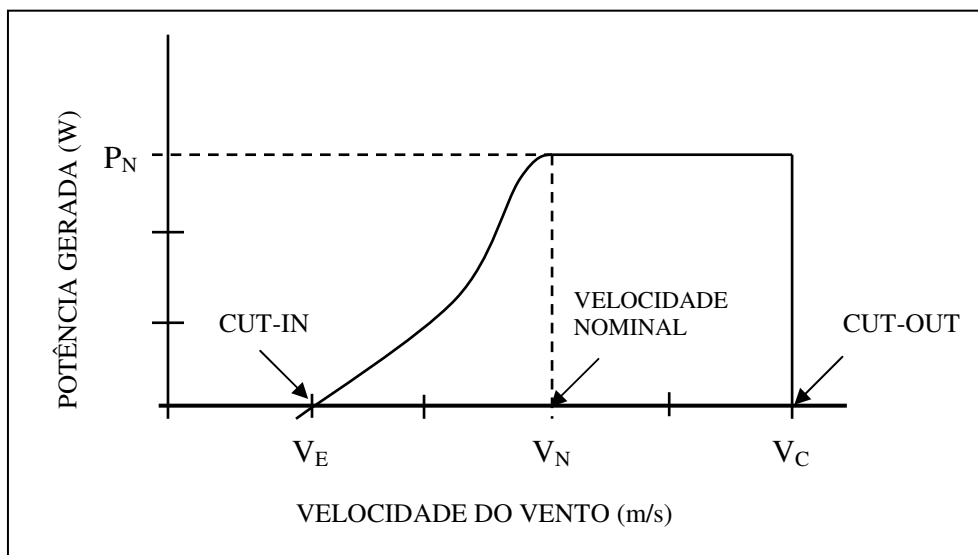


Figura 2.6: Gráfico da curva de potência de um aerogerador.

Fonte: REIS (2003).

Da figura 2.6, tem-se que:

- Velocidade de entrada do vento (V_E): velocidade do vento na altura do cubo a partir da qual o aerogerador inicia a geração de energia elétrica;
- Velocidade nominal do vento (V_N): velocidade do vento na altura do cubo a partir da qual o aerogerador fornece a potência nominal (P_N); velocidades superiores ativam o sistema automático de limitação da potência da máquina, que pode ser por controle de ângulo de passo das pás ou por estol aerodinâmico;
- Velocidade de corte do vento (V_C): velocidade do vento na altura do cubo a partir da qual o aerogerador é retirado de operação via sistema automático de proteção por motivo de segurança.

Outro fator muito importante para o cálculo da produção estimada de eletricidade é o uso de um histograma ou diagrama de frequência de ocorrência da velocidade do vento no local da instalação obtido a partir de medições realizadas. No histograma, os valores medidos de velocidade do vento são agrupados por intervalos de valores denominados classes (CARVALHO, 2003).

Também de grande importância é o período de medição das velocidades do vento, quanto maior, melhor. Através de longas séries de medições de alta qualidade, podem ser verificados aspectos importantes, como a variação sazonal e variação, ano a ano, da velocidade do vento. De maneira geral, recomendam-se medições de dados eólicos por um período mínimo de um ano. É importante salientar que quaisquer erros no levantamento do histograma de frequência da velocidade do vento, além de influenciarem negativamente a avaliação da produção de energia elétrica, irão refletir-se na análise econômica do projeto (CARVALHO, 2003).

Quanto à capacidade de geração elétrica, os primeiros aerogeradores desenvolvidos em escala comercial tinham potências nominais entre 10 kW e 50 kW. No início da década de 1990, a potência das máquinas aumentou para a faixa de 100 kW a 300 kW. Em 1995, a maioria dos fabricantes de grandes aerogeradores ofereciam modelos de 300 kW a 750 kW. Em 1997, foram introduzidos comercialmente os aerogeradores de 1 MW e 1,5 MW, iniciando a geração de máquinas de grande porte.

Em 1999, surgiram os primeiros aerogeradores de 2 MW e hoje existem protótipos de 3,6 MW e 4,5 MW, sendo testados na Espanha e Alemanha (BOYLE; BTM; WINDPOWER; WIND FORCE *apud* ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, 2005).

Quanto ao porte, os aerogeradores podem ser classificados da seguinte forma, (Figura 2.7):

- Pequenos: potência nominal menor que 500 kW;
- Médios: potência nominal entre 500 kW e 1000 kW;
- Grandes: potência nominal maior que 1 MW.



Figura 2.7: Exemplos de aerogeradores (da esquerda para a direita: pequeno, médio e grande).

Fonte: CBEE / UFPE *apud* ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL (2005).

Quanto à aplicação, os aerogeradores podem ser conectados à rede elétrica ou destinados ao suprimento de eletricidade a comunidades ou sistemas isolados. A instalação pode ser feita em terra firme, como exemplos, aerogerador de médio porte ou *off-shore* e aerogeradores de grande porte da Figura 2.7.

2.6 Fatores de Influência no Desempenho dos Sistemas Eólicos

A tecnologia presente nos sistemas eólicos vem evoluindo de forma crescente, sendo considerável a contribuição dos aerogeradores que geram eletricidade em quantidades comerciais ou auxiliando outras fontes de geração. Em alguns casos, a energia eólica acaba se

tornando a única fonte de eletricidade para suprir a demanda de energia elétrica de comunidades.

No entanto, para que a geração de eletricidade a partir do movimento do ar seja possível e atraente, tanto técnica quanto economicamente, alguns fatores são determinantes.

O valor da energia produzida varia com o cubo da velocidade dos ventos, o que significa que a potência de saída é altamente sensível a este fator. Na produção de energia eólica, são adotados fatores de utilização de 30 %, considerando-se que este é um valor típico do fator de capacidade de usinas eólicas (SEMC, 2007).

Dessa forma, a velocidade dos ventos é o fator mais crítico na determinação da energia que pode ser obtida de um aerogerador e também seu custo. Além desses, outros fatores, como altura da torre, altitude, superfície, entre outros, também são importantes e são apresentados a seguir (TERCIOTE, 2002):

2.6.1 Topografia

Normalmente o ar é mais frio durante a noite e tende a ocupar as regiões próximas ao solo e produzir pouca quantidade de vento, um dos motivos do posicionamento da torre em áreas mais elevadas. Para a escolha desses locais, devem ainda ser observados aspectos, como: facilidade de locomoção até a instalação, proximidade ao ponto de consumo, espaço necessário para manutenções, evitando-se áreas muito frias (geadas, neve), pois condições climáticas adversas podem prejudicar e danificar o aerogerador.

2.6.2 Barreiras Naturais

São consideradas barreiras naturais prédios, árvores, plantações e construções elevadas que, quando estão na direção do vento que passa pelo aerogerador, causam uma diminuição da velocidade do vento e turbulência, danificando o equipamento.

2.6.3 Superfície

A altura de posicionamento dos aerogeradores também depende do tipo de vegetação encontrada, quanto mais acidentado o terreno (maior rugosidade), com plantações, construções, árvores, etc., mais alta a torre deve ser. Os dados de velocidade do vento normalmente vêm acompanhados com a altura na qual ocorreu a medição. Quando esta não vem especificada, a velocidade refere-se à altura padrão internacional de 10 metros acima do solo ou à altura em que cada aerogerador está operando.

2.7 Energia Eólica no Mundo

Com a crescente preocupação em torno das questões ambientais e devido aos impactos causados pelas formas tradicionais de geração de energia, vários países vêm investindo na complementação e transformação de seus parques energéticos com a introdução de fontes alternativas de energia.

As questões ambientais alavancaram em muito esses investimentos, principalmente devido aos impactos causados pelas formas tradicionais de geração de energia. O desenvolvimento da energia eólica no mundo apresenta-se como uma das mais importantes e promissoras tecnologias na geração complementar de energia limpa.

Atualmente, existem mais de 30 mil aerogeradores em operação no mundo. O primeiro aerogerador comercial ligado à rede elétrica pública foi instalado em 1976, na Dinamarca. Em 1991, a Associação Européia de Energia Eólica estabeleceu como metas a instalação de 4.000 MW de energia eólica na Europa até o ano 2000 e 11.500 MW até o ano 2005. Essas e outras metas foram cumpridas muito antes do esperado, 4.000 MW em 1996 e 11.500 MW em 2001, (ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, 2005).

As metas atuais são de 40.000 MW na Europa até 2010. Nos Estados Unidos, o parque eólico existente é da ordem de 4.600 MW instalados e com um crescimento anual em torno de 10 %. Estima-se que, em 2020, o mundo terá 12 % da energia gerada pelo vento, com uma capacidade instalada de mais de 1.200 GW (*WINDPOWER; EWEA; GREENPEACE; WIND FORCE apud ATLAS DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, 2005*).

Estima-se que o potencial eólico bruto mundial seja da ordem de 500.000 TWh por ano. Devido, porém, a restrições sócio-ambientais, como existência de áreas densamente povoadas e/ou industrializadas e outras restrições naturais, como regiões muito montanhosas, por exemplo, apenas 53.000 TWh (cerca de 10 %) são considerados tecnicamente aproveitáveis. Ainda assim, esse potencial líquido corresponde a cerca de quatro vezes o consumo mundial de eletricidade. A Tabela 2.1 mostra as estimativas do potencial eólico mundial.

Tabela 2.1: Estimativas do potencial eólico mundial.

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

Fonte: GRUBB; MEYER *apud* ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL (2005).

(*) Em relação ao potencial bruto;

(**) Excluindo-se Groenlândia, Antártida, a maioria das ilhas e os recursos *off-shore*.

Em 1990, a capacidade instalada no mundo era inferior a 2.000 MW. Em 1994, ela subiu para 3.734 MW, divididos entre Europa (45,1 %), América (48,4 %), Ásia (6,4 %) e outros países (1,1 %). Quatro anos mais tarde, chegou a 10.000 MW e, no final de 2002, a capacidade total instalada no mundo ultrapassou 32.000 MW. O mercado tem crescido substancialmente nos últimos anos, principalmente na Alemanha, Estados Unidos, Dinamarca e Espanha, onde a potência adicionada anualmente supera 3.000 MW (BTM; EWEA; GREENPEACE *apud* ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, 2005).

De fato, em alguns países e regiões, a energia eólica já representa uma parcela considerável da eletricidade produzida. Na Dinamarca, por exemplo, a energia eólica representa 18 % de toda a eletricidade gerada e a meta é aumentar essa parcela para 50 % até 2030. Na região de *Schleswig- Holstein*, na Alemanha, cerca de 25 % do parque de energia elétrica instalado é de origem eólica. Na região de Navarra, na Espanha, essa parcela é de 23

%. Em termos de capacidade instalada, estima-se que, até 2020, a Europa já terá 100.000 MW (*WIND FORCE apud ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, 2005*).

A Figura 2.8 apresenta a distribuição da capacidade instalada no mundo. Alemanha, Estados Unidos, Espanha e Dinamarca são responsáveis por quase 80 % da capacidade instalada no mundo.

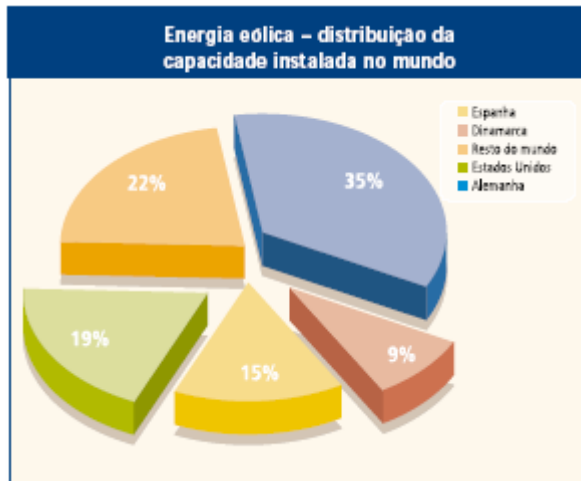


Figura 2.8: Distribuição da capacidade instalada no mundo de energia eólica.
Fonte: KNEBEL *apud* ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL (2005).

2.8 Energia Eólica no Brasil

Embora existam divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores extremamente consideráveis. Até poucos anos, as estimativas eram da ordem de 20.000 MW; hoje, a maioria dos estudos indica valores maiores que 60.000 MW. Essas divergências decorrem principalmente da falta de informações e das diferentes metodologias empregadas.

No entanto, os diversos levantamentos e estudos realizados e em andamento locais, regionais e nacionais têm dado suporte e motivado à exploração comercial da energia eólica no país.

No Brasil, a tecnologia eólica se apresenta bastante interessante na solução para fornecimento de energia tanto para as comunidades afastadas dos centros produtores, como o Norte, Nordeste e extremo Sul, quanto para as regiões próximas aos grandes centros produtores e consumidores do Sul e Sudeste (MME, 2005). A Figura 2.9 mostra a velocidade média anual do vento no país a 50 m de altura.

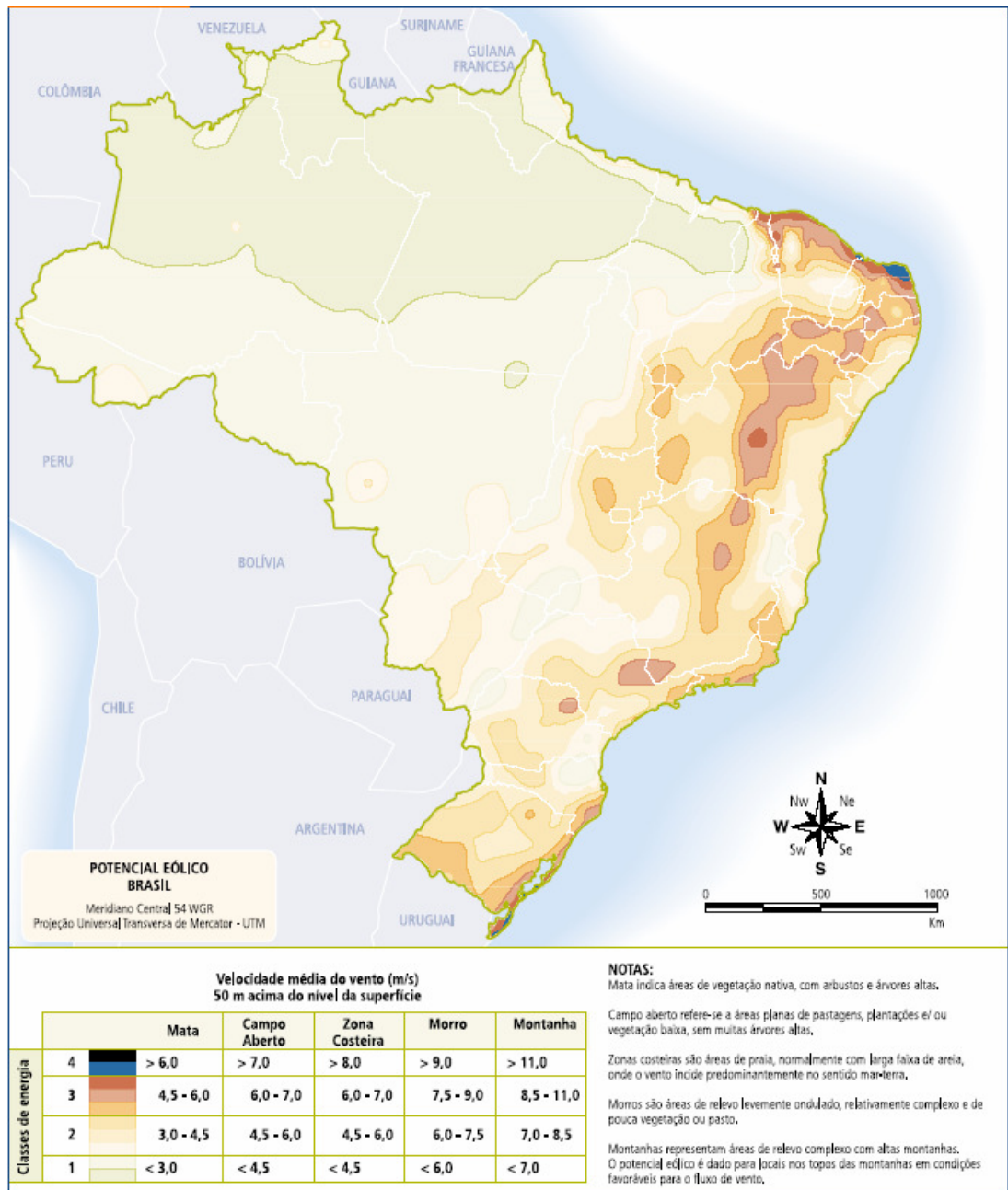


Figura 2.9: Velocidade média anual do vento a 50 m de altura no Brasil.
Fonte: FEITOSA et al. *apud* ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL (2005).

Devido a todas as vantagens no uso da energia eólica, já apresentadas, vários estudos surgiram no Brasil para o aproveitamento do potencial eólico, culminando com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, realizado pela parceria entre Ministério de Minas e Energia (MME), ELETROBRÁS, CEPEL, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), Camargo Schubert Engenharia Eólica e *TueWind Solutions*.

Os primeiros anemógrafos computadorizados e sensores especiais para energia eólica foram instalados no país no estado do Ceará e em Fernando de Noronha (PE), no início dos

anos 1990. Os resultados dessas medições possibilitaram a determinação do potencial eólico local e a instalação dos primeiros aerogeradores do Brasil na ilha de Fernando de Noronha, para garantir o fornecimento de energia para a ilha que antes só contava com um gerador movido a diesel (ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL, 2005). As centrais eólicas em operação no Brasil em setembro de 2003 são listadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Centrais eólicas em operação no Brasil. Situação em setembro de 2003.

Centrais eólicas em operação no Brasil – situação em setembro de 2003				
Nome da Usina	Potência (kW)	Município - UF	Destino da Energia	Proprietário
Eólica	75	Fernando de Noronha - PE	SP	Companhia Energética de Pernambuco
Eólica de Bom Jardim	600	Bom Jardim da Serra - SC	PIE	Parque Eólico de Santa Catarina Ltda.
Eólica de Fernando de Noronha	225	Fernando de Noronha - PE	PIE	Centro Brasileiro de Energia Eólica - FADE/URPE
Eólica de Prainha	10.000	Aquiraz - CE	PIE	Wobben Wind Power Indústria e Comércio Ltda.
Eólica de Taíba	5.000	São Gonçalo do Amarante - CE	PIE	Wobben Wind Power Indústria e Comércio Ltda.
Eólica Olinda	225	Olinda - PE	PIE	Centro Brasileiro de Energia Eólica - FADE/URPE
Eólica-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho	1.000	Gouveia - MG	SP	Companhia Energética de Minas Gerais
Eólico - Elétrica de Palmas	2.500	Palmas - PR	PIE	Centrais Eólicas do Paraná Ltda.
Mucuripe	2.400	Fortaleza - CE	PIE	Wobben Wind Power Indústria e Comércio Ltda.

Fonte: ANEEL; BIG *apud* ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL (2005).

A energia eólica brasileira teve um grande impulso com a Lei 10.438, de 26 de abril de 2002 que criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) do Governo Federal. Esse programa possibilitará a instalação de novas usinas em diversas localidades brasileiras, principalmente no litoral nordestino e no litoral sul do Brasil.

Nos últimos 7 anos, foram instaladas as usinas de Mucuripe (Fortaleza - CE), Central Eólica de Prainha (Aquiraz - CE), o Parque Eólico de Osório (Osório - RS), o maior, atualmente, em operação no país, e a Usina de Rio do Fogo (Rio do Fogo - RN).

2.9 Energia Eólica no Rio Grande do Sul

O Estado do Rio Grande do Sul, através da Secretaria de Energia, Minas e Comunicações (SEMC), tem demonstrado grande interesse na implantação de parques eólicos em seu território e em atrair para sua cadeia produtiva investimentos referentes às respectivas indústrias decorrentes de empreendimentos eólicos.

A implantação da energia eólica no Estado consiste em algumas diretrizes: diversificar a matriz energética; promover o desenvolvimento sustentável e o meio ambiente, internalizar a produção de equipamentos e absorver a tecnologia (SILVEIRA, 2006).

A elaboração do Atlas Eólico do Estado do Rio Grande do Sul, publicado em agosto de 2002, é parte integrante deste empenho. O Atlas Eólico foi realizado a partir de medições em 21 pontos do Estado e com dados de vento obtidos em 12 meses ou mais; as medições realizaram-se através de parcerias institucionais entre a Secretaria de Energia, Minas e Comunicações, CEEE, e as empresas ELEC NOR, ELEBRÁS, ERB, GAMESA, RAIKO e WOB BEN (SILVEIRA, 2006).

Em seus dados, o Atlas revelou um elevado potencial de ventos adequados à geração de energia elétrica no Estado como pode ser visto na Figura 2.10, o que demonstra o quanto o Estado pode contribuir para a consolidação da energia eólica. As medições foram realizadas com o uso de anemômetros do tipo concha, calibrados e certificados, instalados em torres com alturas que vão de 40 m a 100 m, situadas em locais especialmente selecionados (SILVEIRA, 2006).

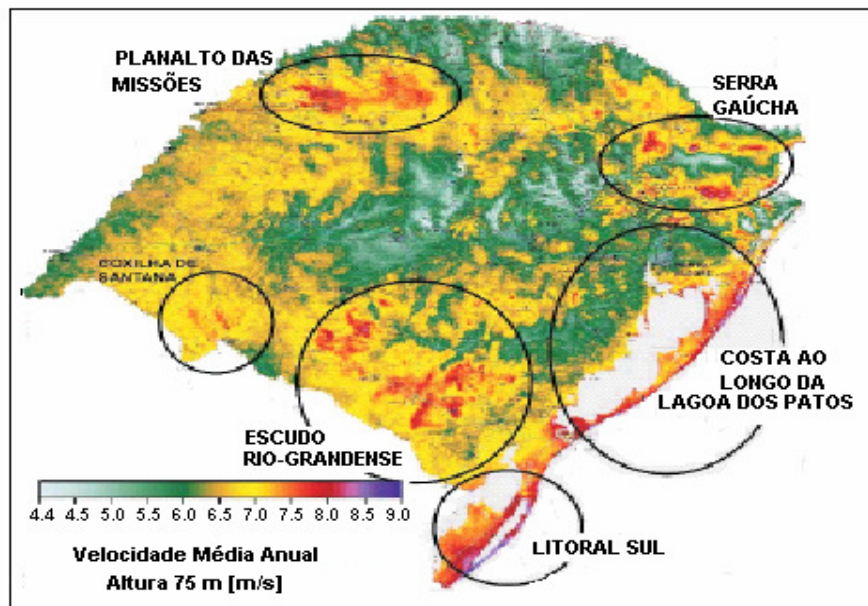


Figura 2.10: Mapa do Rio Grande do Sul com potencial eólico anual a 75 m de altura. Fonte: SILVEIRA (2006).

A partir das medições realizadas, foram elaborados trinta e três projetos de parques eólicos, por oito empresas (Ecoprojeto, Elebrás, Elecnor/Enerfin, ERB, Gamesa, Petrobrás, PróWind e Wobben); dentre esses projetos, quatorze conseguiram credenciamento para

concorrerem ao PROINFA, dos quais cinco foram selecionados pelo Programa (227,6 MW) e nove foram habilitados para participarem da próxima etapa (SILVEIRA, 2006).

A Secretaria de Energia, Minas e Comunicações tem desenvolvido algumas ações que justificam o interesse na utilização da Energia Eólica, tais como (SEMC, 2007):

- criação do programa Ventos do Sul;
- publicação do Atlas Eólico do RS;
- apoio e incentivo à implantação e ao desenvolvimento de parques eólicos;
- acompanhamento, junto às empresas, sobre o andamento dos projetos;
- medição da velocidade e direção dos ventos, em conjunto com a CEEE, e as empresas ELECNOR, ELEBRÁS, ERB, GAMESA, RAIKO e WOBEN, em 27 pontos espalhados pelo Estado;
- estímulo à produção industrial de peças, máquinas e equipamentos e instalações voltadas à energia eólica;
- fomento ao desenvolvimento de tecnologia, pesquisa e formação profissional relacionados com a energia eólica;
- desenvolvimento de ações junto à FEPAM, acompanhando e assessorando as ações daquela Fundação quanto à liberação das licenças de instalação dos empreendimentos eólicos no Estado;

O Rio Grande do Sul apresenta algumas vantagens para a implantação da energia eólica, tais como (SEMC, 2007):

- possibilidade, em vários locais, de empreendimentos com elevados fatores de capacidade e facilidade de acesso à rede elétrica;
- acesso ao maior mercado consumidor de energia elétrica do país: Sul/Sudeste – 80 % do mercado brasileiro;
- complementaridade entre os ventos do Rio Grande do Sul e o período seco no Sudeste;
- ótima infra-estrutura (estradas, acessos, logística...);
- indústria do RS com possibilidades de fornecimento de equipamentos;
- incentivos fiscais e materiais do Estado.

A mais recente novidade na matriz energética estadual é o ingresso da energia eólica, através do Parque Eólico de Osório, projeto subdividido em três parques - Osório,

Sangradouro e Índios -, com 75 aerogeradores (25 por parque) e uma potência instalada de 150 MW, constituindo o maior parque eólico da América Latina (SILVEIRA, 2006).

2.9.1 Ventos no Rio Grande do Sul

As velocidades e direções de vento no Estado do Rio Grande do Sul apresentam tendências diurnas e sazonais dentro de seu caráter estocástico, podendo-se afirmar que os regimes de ventos e parâmetros atmosféricos são bastante distintos nas diferentes regiões do Estado do Rio Grande do Sul, que alterna extensas áreas litorâneas e planícies do pampa às serras e planaltos interiores.

O caráter dinâmico das circulações sobre o Rio Grande do Sul, em especial as intermitentes passagens de frentes frias, se intensificam no inverno e primavera, trazendo o célebre Minuano, vento forte, frio e cortante que sopra de SW sobre a campanha, com duração aproximada de três dias a cada passagem de massa polar (AMARANTE et al., 2002).

Ao longo dos 630 km de extensão do litoral do Estado do Rio Grande do Sul, existem 986 km² de areia e dunas, sopradas por ventos intensos e constantes. Também no interior do Estado, na baixa rugosidade e aceleração orográfica das coxilhas da campanha, muitos ventos se unem ao Minuano que, apesar de não ser predominante, agrega uma contribuição importante ao potencial eólico do Rio Grande do Sul, para compor um dos potenciais eólicos mais promissores do Brasil onde há uma grande complementaridade sazonal entre os regimes naturais eólico e hidráulico.

Quanto à sazonalidade, no RS, têm-se ventos mais intensos na segunda metade do ano, ocorrendo em todas as regiões, com pequenas defasagens na ocorrência dos picos entre os extremos leste e oeste do Estado.

No Estado, ventos superiores a 7 m/s poderão ser encontrados nas elevações mais favoráveis do continente, sempre associados à baixa rugosidade da campanha. Outra grande área com velocidades superiores a 7 m/s está ao longo do extenso litoral que se estende a partir de Imbé até o extremo sul do Estado, onde os ventos predominantes de leste-nordeste são acentuados pela ação diurna das brisas marinhas, ao longo dos meses de primavera, verão e início de outono (AMARANTE et al., 2002).

Os meses de ocorrência de médias mais elevadas de velocidade de vento também podem ser distintos para os extremos geográficos do Estado onde pode-se notar que o pico

sazonal de velocidades de vento na parte oeste do Rio Grande do Sul ocorre durante o inverno, enquanto que, no litoral, ocorre durante a primavera (AMARANTE et al., 2002).

A Tabela 2.3 apresenta um resumo dos regimes diurnos e sazonais do vento para distintas regiões do Rio Grande do Sul.

Tabela 2.3: Regimes diurnos e sazonais do vento para distintas regiões do Rio Grande do Sul.

Região	Vento
Campanha e serras do centro e oeste	Velocidades de vento se intensificam durante o período noturno, essas velocidades se amainam durante as horas do dia, especialmente nos meses de verão e outono.
No alto das maiores elevações das serras ao nordeste do Estado	Os ventos tendem a ser mais fracos nos meses de verão e no início das noites.
Ao longo do litoral	A ação das brisas marinhas aumenta as velocidades de vento das 11 h às 18 h ao longo da primavera e se estendendo pelos meses de verão, possuindo bom sincronismo com a demanda no sistema elétrico estadual. Essa situação chega a se reverter nos meses mais frios do inverno.

Fonte: AMARANTE et al. (2002).

3 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

3.1 Introdução

O desenvolvimento sustentável pode ser compreendido como um desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender às necessidades das futuras gerações; não é um estado fixo de harmonia, mas um processo de mudança no qual a exploração dos recursos, a direção dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional são coerentes com o futuro, assim como as necessidades presentes. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro.

Sua definição surgiu na Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada pelas Nações Unidas para discutir e propor meios de harmonizar dois objetivos: o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental.

Porém, para ser alcançado, o desenvolvimento sustentável depende de planejamento e, principalmente, do entendimento de que os recursos naturais são finitos.

Esse conceito representou uma nova forma de desenvolvimento econômico que leva em consideração o meio ambiente, pois a preocupação com a conservação dos recursos naturais é crescente em todo mundo.

No mundo todo, cada vez mais, buscam-se soluções que permitam o aproveitamento das potencialidades das comunidades sem comprometer os recursos e as possibilidades das gerações futuras. Entidades têm proposto metodologias que promovam os desenvolvimentos econômico, tecnológico e social, buscando aproveitar o potencial existente de uma forma sustentável, ou seja, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprirem as suas próprias necessidades.

Embora o conceito de desenvolvimento sustentável seja claro em sua concepção, quando se trata de sua implementação prática emergem desafios para a sociedade como um todo. Esses desafios estão ligados ao entendimento dos fatores que promovem o desenvolvimento sustentável.

Para que se consiga o desenvolvimento sustentável, é necessário conjugar esforços de toda a sociedade, sem a exclusão de nenhum de seus segmentos onde temas importantes, como explosão demográfica, controle da natalidade, desenvolvimento industrial e depredação, nova política educacional, recursos energéticos, entre outros, devem ser discutidos.

O desenvolvimento sustentável sugere qualidade em vez de quantidade, propõe uma redução do uso de matérias-primas e produtos e o aumento da reutilização e da reciclagem, pois todo desenvolvimento alicerçado no consumo crescente de energia e de recursos naturais tende a ser insustentável, devido a levar ao esgotamento dos recursos naturais dos quais a humanidade depende.

3.2 Dimensões do Desenvolvimento Sustentável

O processo de desenvolvimento sustentável compreende quatro dimensões que são a sustentabilidade social, a sustentabilidade econômica, a sustentabilidade ecológica e a sustentabilidade técnica (RIBEIRO, 2008). Esses pressupostos serão analisados no enfoque do uso da energia no meio rural nos subitens listados abaixo.

3.2.1 Sustentabilidade Social

O pressuposto da sustentabilidade social depende da disposição de reconhecer igualmente o direito de cada indivíduo. Dessa forma, o processo de desenvolvimento rural sustentado deve garantir a todos os segmentos da população uma distribuição equitativa da riqueza e acesso aos meios de produção e aos recursos naturais, acesso e controle dos processos de tomada de decisão, igualdade de acesso aos serviços sociais, como saúde, educação e energia, respeito à cultura e ao território.

3.2.2 Sustentabilidade Econômica

A sustentabilidade econômica implica o desenvolvimento das forças produtivas da sociedade. Pressupõe-se o crescimento da produção, da produtividade e das capacidades produtivas. As fontes de energia adequadas são imprescindíveis para a eficiência econômica. A eletrificação rural tem impacto positivo na maioria dos processos econômicos, tendendo a aumentar esse impacto devido à disseminação de novas tecnologias.

3.2.3 Sustentabilidade Ecológica

A sustentabilidade ecológica pressupõe que o processo de desenvolvimento rural garanta a equidade entre as gerações de hoje e as futuras, no que se relaciona com o uso dos recursos naturais. Ela está muito ligada aos processos de produção de energia e valoriza a utilização de fontes renováveis para produção de energia elétrica.

3.2.4 Sustentabilidade Técnica

A sustentabilidade técnica requer, para a população local, equidade no acesso e no controle da tecnologia, ou seja, apropriação das técnicas e da capacidade de gerar inovações por parte de todos os envolvidos no desenvolvimento rural, inclusive os menos favorecidos.

A essência está no acesso ao conhecimento, bem como no uso de tecnologias viáveis, a fim de fomentar o desenvolvimento rural e agregar valor aos bens produzidos.

3.3 Energia e Meio Ambiente

A questão energética tem um significado muito importante no contexto ambiental, pois produz impactos ambientais em toda sua cadeia de desenvolvimento, desde a captura dos

recursos naturais básicos para seus processos de produção até seus usos finais pelos diversos tipos de consumidores.

Assim, a energia tem participação relevante nos principais problemas ambientais da atualidade. Os principais são listados a seguir (REIS, 2003).

3.3.1 Poluição do Ar Urbano

Este é um problema bastante visível e se deve, em grande parte, ao transporte e à produção industrial; também a produção de eletricidade a partir de combustíveis fósseis é fonte de óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), monóxido de carbono (CO) e partículas.

3.3.2 Chuva Ácida

A chuva ácida é resultado do efeito de poluição causado por reações ocorridas na atmosfera com o dióxido de enxofre (SO_2) e os óxidos de nitrogênio (NO_x), que levam a concentração de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e ácido nítrico (HNO_3) na chuva; logo que esses ácidos se depositam no solo, têm efeitos bastante negativos na vegetação e ecossistemas. Um dos grandes causadores da chuva ácida é o carvão mineral.

3.3.3 Efeito Estufa e as Mudanças Climáticas

Tais problemas se devem à modificação na intensidade da radiação térmica emitida pela superfície da Terra em função do aumento da concentração dos gases-estufa na atmosfera. O mais preocupante e significativo entre os gases emitidos é o dióxido de carbono (CO_2), cujas emissões estão principalmente ligadas ao uso de combustíveis fósseis.

3.3.4 Desflorestamento e Desertificação

A destruição de florestas está relacionada à poluição do ar, urbanização, expansão da agricultura, exploração de produtos florestais e regeneração inadequada; já a degradação da terra está relacionada ao cultivo e práticas agrícolas inadequadas bem como ao desflorestamento, que influi no aquecimento global, tendo em vista que as florestas concentram grande poder de absorção dos gases estufa.

3.3.5 Degradação Marinha e Costeira

A degradação marinha e costeira, bem como a de lagos e rios, está relacionada à enorme quantidade de materiais poluentes descarregados nos cursos das águas e na atmosfera.

3.3.6 Alagamento

Os problemas com alagamentos estão intimamente ligados à construção de barragens e reservatórios, levando à perda de terras agricultáveis ou de valor histórico, cultural e biológico. Esses alagamentos causam problemas sociais com o reassentamento de populações.

3.4 Energia na Propriedade Rural

Considera-se como propriedade rural toda área de terreno pertencente à zona rural de propriedade privada. As atividades mais desenvolvidas nas mesmas são a agricultura e a pecuária. Dependendo da destinação e da área ocupada, a propriedade rural tem várias denominações que variam conforme a região.

Hoje, o grande desafio enfrentado em relação à produção agropecuária é manter um equilíbrio sadio entre crescimento sócio-econômico e proteção ambiental, levando em

consideração a necessidade da produção de alimentos e insumos em larga escala e o equilíbrio ecológico.

Em 1987, os delegados da Comissão Mundial para o Meio Ambiente e Desenvolvimento tiveram de admitir a urgência na adoção de mudanças importantes na política agrícola, ambiental e macroeconômica – tanto em nível nacional como internacional – visando criar condições que possibilitem uma agricultura e um desenvolvimento rural viáveis localmente e num contexto de equilíbrio técnico, econômico, social e ambiental [...] (DAROLT *apud* CERVEIRA, 2002, p. 01).

Diante deste cenário, insere-se a questão energética na propriedade rural, elemento de extrema importância por promover desenvolvimento e renda.

O desenvolvimento rural sustentável está presente como um dos temas centrais das agendas políticas dos governos dos países em desenvolvimento, pois é entendido universalmente como um dos meios mais adequados de se alcançar o crescimento econômico.

Porém os programas de eletrificação rural, que tradicionalmente são implementados, têm se mostrado restritos e excludentes, atendendo principalmente aos produtores de médio e grande porte e deixando às escuras as propriedades de menor porte (RIBEIRO, 2008).

Nunca foi fácil introduzir, onde quer que seja, formas inovadoras e criativas de agir e de pensar. É mais difícil ainda passar da agenda à ação. O conceito de “desenvolvimento sustentável” é inteiramente novo, e sua prática, ainda controvertida e discutível. Aplicar à realidade local os princípios abstratos da Agenda 21 tem sido um grande desafio político, que exige ousadia, convicção e persistência (CAMARGO *apud* RIBEIRO, 2008, p. 02).

O gerenciamento das matrizes energéticas dentro da propriedade rural transcende a eletrificação, é antes, um aspecto indispensável para propriedades que buscam modelos de desenvolvimento mais sustentáveis, tendo em vista que discussões recentes também demonstram a preocupação relativa à sustentabilidade energética como sendo uma das questões presentes no debate atual sobre a agricultura (BITTENCOURT, 2005).

Dentre os desafios colocados pela sociedade aos sistemas de produção agropecuária, estão incluídos os relacionados à necessidade de produção de alimentos e outras matérias-primas em quantidade e qualidade adequadas. Também, exige-se que essa produção não contamine o meio ambiente nem utilize os recursos naturais de maneira irresponsável, além

de levar em consideração os aspectos relacionados à equidade social (BITTENCOURT, 2005).

Portanto, exige-se que seja estabelecido um padrão de tecnologia sustentável ao longo do tempo.

Dentre as propriedades rurais, existe um universo ainda inexplorado, em sua grande maioria, em relação ao aproveitamento e à integração das fontes energéticas renováveis disponíveis. É importante aproveitar as fontes disponíveis dentro da propriedade criando uma integração das mesmas, pois, dessa forma, há um aumento na eficiência de aproveitamento dentro dos recursos disponíveis.

Pode-se dizer que a matriz energética em uma propriedade rural é compreendida por diferentes elementos, que são classificados e divididos em três grandes grupos. O primeiro é o das fontes e corresponde à origem da energia dentro da propriedade; o segundo são os modelos e tecnologias de processamento de energia e o terceiro é o grupo dos sistemas de conservação de energia (BITTENCOURT, 2005).

As fontes renováveis de energia mostram-se como uma alternativa interessante para minimizar o problema do suprimento energético, principalmente em locais remotos onde as dificuldades de distribuição das linhas de eletrificação e o baixo consumo, sobretudo no aspecto econômico, tornam inviável a distribuição de energia elétrica.

Além da importância da utilização de fontes renováveis para produção de energia elétrica dentro das propriedades, também há de se prestar atenção ao gasto energético para obtenção do produto dentro da propriedade rural, para que se alcance a sustentabilidade. Quanto menores forem as perdas energéticas, mais eficiente e sustentável é o processo.

Entre os elementos consumidores de energia na propriedade rural, podem-se listar: iluminação, beneficiamento e conservação de alimentos, agroindústria, aquecimento, trabalho e lazer.

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos visando ao dimensionamento de recursos energéticos renováveis isolados ou integrados. Dimensionamento de sistemas energéticos híbridos solar e eólico, com ênfase no custo e/ou desempenho do sistema, foram apresentados por BEYER & LANGER (1996), PROTOGEROPOULOS et al. (1997) e CELIK (2003). Modelos de otimização de sistemas utilizando programação linear foram propostos por RAMAKUMAR et al. (1986), KHELLA (1997) e CORMIO et al. (2003). Cálculos probabilísticos envolvendo a probabilidade de perda de fornecimento de energia à carga foram utilizados por BOROWY & SALAMEH (1996) e OFRY & BRAUNSTEIN (1983), como medida da confiabilidade do suprimento de energia. Estudos de sistemas integrados, em

que diferentes fontes energéticas são combinadas, foram realizados por ROZAKIS et al. (1997), BASSAM (2001) e NAKATA et al. (2005) (NOGUEIRA; ZÜRN, 2005).

Para um dimensionamento energético seguro, é necessário analisar as condições dos recursos energéticos de cada local em particular, de modo a se estabelecer uma base de dados confiáveis. As características individuais de cada local, em termos da disponibilidade dos recursos naturais e da demanda de energia elétrica, vão determinar quais as melhores fontes a serem utilizadas na propriedade.

Outra vantagem importante oferecida pela exploração dos recursos energéticos locais é a produção de pequenos blocos de energia através de fontes renováveis, tais como pequenas centrais hidrelétricas (PCH_s), geradores eólicos, células combustíveis, células fotovoltaicas, etc.

Também o proprietário, além de gerar energia para o consumo próprio, pode vender a energia gerada excedente, tornando-se, assim, a geração de energia uma fonte de recursos financeiros na propriedade.

O aproveitamento de energia, obtida através da transformação direta de recursos naturais, como a força do vento, a energia hidráulica, a biomassa e a energia solar são uma importante opção na atual conjuntura mundial onde a crescente demanda global por energia e a importância do impacto das políticas energéticas sobre a sociedade e o meio ambiente forçam a opção por fontes de energia que possam abastecer a demanda de forma eficiente e não agridam o meio ambiente, formando assim a base para um desenvolvimento sustentável.

Outro fator que deve ser levado em consideração é que a pobreza em áreas rurais impede o acesso à eletricidade que está associada à comunicação moderna e à tecnologia da informação, reprimindo também a aplicação produtiva da energia, especialmente nos setores secundário e terciário de incremento de valor agregado aos insumos produzidos.

O acesso à energia elétrica pode ser considerado fator fundamental para a aceleração do desenvolvimento de áreas rurais na agricultura, inclusive com eletricidade para o bombeamento de água, irrigação, substituição das fontes de energia mais caras e qualitativamente inferiores, para a melhoria do padrão de vida da população rural mais carente e para a diminuição da migração das áreas rurais para as áreas urbanas.

Assim, a conversão dos recursos naturais locais em energia elétrica é cada dia mais cotada como meio de substituição aos métodos convencionais de geração de eletricidade, pois, na época atual, em que problemas ambientais se agravam e as matérias primas se esgotam, torna-se insustentável a exploração continuada dos combustíveis fósseis.

3.5 Fontes de Energia na Propriedade Rural

Além da rede pública de distribuição, quando existe, outras fontes para produção de energia elétrica podem ser utilizadas na propriedade rural. Dentre elas, podem-se citar:

3.5.1 Hidroelétrica

Quedas d'água, mesmo que pequenas, podem produzir eletricidade instalando-se nas mesmas uma roda d'água para movimentar um gerador. Esta é uma fonte limpa e renovável de energia que não polui nem causa grandes impactos ambientais.

3.5.2 Termoelétrica

Pode-se produzir energia elétrica na propriedade rural, utilizando uma pequena caldeira a vapor, com o emprego de combustíveis sólidos obtidos na propriedade, como lenha e resíduos (bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, etc.) para mover um grupo gerador. Porém, a queima desses materiais emite gases de efeito estufa sendo esta a principal desvantagem desse sistema de geração de energia.

3.5.3 Gás e biodigestor

O gás, desde que obtido economicamente, pode ser de grande utilidade em uma propriedade rural. A maneira mais econômica de produzi-lo na propriedade é através de um biodigestor, aparelho muito simples e de construção barata.

As matérias-primas para a produção de energia são facilmente encontradas em qualquer propriedade rural, pois são matérias orgânicas fermentáveis, como esterco de animais, restos de roçadas, bagaço de cana-de-açúcar, etc. Esse material, depois de utilizado,

transforma-se em um excelente adubo orgânico para qualquer plantação. O gás obtido pode ser utilizado para iluminação, aquecimento, para acionar motores, entre outros.

3.5.4 Eólica

O aproveitamento da energia dos ventos, através de cata-ventos ou aerogeradores, serve para acionar bombas d'água, dínamos ou geradores de energia elétrica. É uma boa alternativa, desde que instalados em regiões sujeitas a ventos constantes. Além de não poluir, tem apenas o custo dos aparelhos utilizados para captá-la. Esses aparelhos, no entanto, dependendo de suas características, podem ter valor econômico bastante elevado. Esta é a alternativa que está sendo considerada neste trabalho.

3.5.5 Solar

A energia solar pode ser utilizada com o uso de placas de captação de energia, sendo possível a geração de energia elétrica e a sua armazenagem em baterias. É uma fonte de energia limpa e renovável, no entanto, o investimento para a geração desse tipo de energia ainda é bastante elevado, em comparação a outras formas alternativas, como as citadas anteriormente.

4 FERRAMENTAL MATEMÁTICO E DESCRIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

4.1 Introdução

O homem sempre desejou compreender o mundo que o cerca, porém, na impossibilidade de lidar diretamente com a complexidade do mundo, tem-se mostrado cada vez mais hábil na criação de metáforas para a representação e solução de sua relação com esse mesmo mundo.

O processo de busca de uma visão estruturada da realidade é fundamentalmente um fenômeno da modelagem.

Os modelos são representações simplificadas da realidade que preservam, para determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada. Dentro da abordagem sistêmica, modelar significa representar a realidade ou os sistemas originais através de outros sistemas de substituição, estruturados e comparáveis, denominados modelos.

A confiabilidade da solução obtida através de um modelo depende da validação do mesmo na representação do sistema real, o qual ele está representando. A diferença entre a solução real e a solução proposta pelo modelo depende diretamente da precisão do modelo em descrever o comportamento original do sistema.

4.2 Modelagem Matemática

A Modelagem Matemática consiste na arte de transformar problemas da realidade em problemas matemáticos e resolvê-los, interpretando suas soluções na linguagem do mundo

real. Ela permite a realização de previsões e tendências e é eficiente a partir do momento em que se toma consciência de que se está trabalhando sobre representações de um sistema ou parte dele. É um processo dinâmico em que, partindo-se de um problema real, associado a um conjunto de hipóteses, é obtido um modelo que forneça possíveis soluções para o problema.

Conforme Bassanezi (2002, p. 24), “a Modelagem Matemática é um processo dinâmico utilizado para a obtenção e validação de modelos matemáticos. É uma forma de abstração e generalização com a finalidade de previsões e tendências”. Em seu entendimento, “a Matemática Aplicada Moderna pode ser considerada como a arte de aplicar matemática a situações problemáticas, usando como processo comum a modelagem matemática”. (BASSANEZI, 2002, p. 32).

Também, segundo Bassanezi (2002), quando os resultados parciais não estão corretamente inter-relacionados, o modelo do todo se torna impossível.

Nesse sentido, pode-se dizer que Modelagem Matemática é o processo que envolve a obtenção de um modelo que tenta descrever matematicamente um fenômeno da nossa realidade para tentar compreendê-lo e estudá-lo, criando hipóteses e reflexões sobre tais fenômenos.

Na visão de Bassanezi (2002, p. 20), “Modelo Matemático é um conjunto de símbolos e relações matemáticas que representam de alguma forma o objeto estudado e sua importância consiste em ser uma linguagem concisa que expressa nossas idéias de maneira clara e sem ambigüidades”.

O interesse mundial em Modelagem Matemática tem sido crescente devido a ela ser uma ferramenta que propicia a compreensão e o desenvolvimento de novas tecnologias.

4.3 Modelo Matemático

Em qualquer situação que exija uma decisão, o passo fundamental para compreender a natureza do problema é a identificação de todos os fatores envolvidos, que fornecem elementos para análise e conclusão.

No processo de construção de um modelo, esses fatores são chamados variáveis do problema, tendo em vista que usualmente podem assumir valores diversos durante o desenvolvimento da solução e podem ser classificadas em três categorias:

- a) Variáveis de Decisão: são as variáveis que foram definidas pelo analista como fornecedoras das informações que servirão de base para se chegar à decisão.
- b) Variáveis Controláveis ou Endógenas: são variáveis geradas pelo próprio modelo durante o processo de solução, sendo dependente dos dados fornecidos, das hipóteses estabelecidas e da própria estrutura do modelo.
- c) Variáveis Não Controláveis ou Exógenas: são fatores ou dados externos fornecidos ao modelo e que representam as hipóteses assumidas ou as condições que devem ser respeitadas.

Dependendo da forma como o processo de decisão é abordado e da própria natureza da decisão, podem-se identificar diversos tipos de modelo, tais como:

- a) Modelos Conceituais: relacionam, de forma seqüencial e lógica, às informações e às fases do processo de decisão, de forma a permitir o desenvolvimento controlado e consistente com os objetivos em mente.
- b) Modelos Simbólicos ou Matemáticos: são baseados na pressuposição de que todas as informações e variáveis relevantes do problema de decisão podem ser quantificadas. Isso leva a utilizar símbolos matemáticos para representá-las e a usar funções matemáticas para descrever as ligações entre elas e a operação do sistema.
- c) Modelos Heurísticos: são construídos quando a complexidade do problema é de tal ordem que a utilização de relações matemáticas torna-se impraticável ou extremamente dispendiosa.

Esses modelos são baseados em regras empíricas ou intuitivas que, dada determinada solução do problema, permitem o avanço para outra solução mais aprimorada.

4.4 Pesquisa Operacional

A Pesquisa Operacional é um ramo da ciência que fornece instrumentos para a análise de decisões. Ela surgiu durante a Segunda Guerra Mundial, quando equipes de pesquisadores procuraram desenvolver métodos para resolver determinados problemas de operações militares.

Com o fim da guerra, a utilização de técnicas de pesquisa operacional atraiu o interesse de diversas outras áreas. Atualmente, com o aumento da velocidade de processamento e quantidade de memória dos computadores, houve um grande progresso na Pesquisa Operacional.

Uma característica importante da pesquisa operacional e que facilita o processo de análise e de decisão é a utilização de modelos que permitem a experimentação da solução proposta. “Os principais modelos de Pesquisa Operacional são denominados de Programação Matemática e constituem uma das mais importantes variedades dos modelos quantitativos”.(GOLDBARG; LUNA, 2000, p. 13).

O campo da programação matemática é enorme e suas técnicas são de grande utilidade na solução de problemas de otimização. Ela estuda a minimização ou maximização de funções em problemas com ou sem restrições.

A programação matemática é fortemente direcionada ao apoio da tomada de decisão no gerenciamento de sistemas de grande porte, especialmente no tratamento de variáveis quantificadas (GOLDBARG; LUNA, 2000).

Na fase de formulação de um modelo matemático de otimização são incluídos três conjuntos principais de elementos.

- a) Variáveis de Decisão e Parâmetros: variáveis de decisão são as incógnitas a serem determinadas pela solução do modelo, compõem tanto a função objetivo como as restrições. Parâmetros são valores fixos no problema. A função objetivo é uma expressão onde cada variável de decisão é ponderada por algum parâmetro.
- b) Restrições: de modo a levar em conta as limitações físicas do sistema, o modelo deve incluir restrições que limitam as variáveis de decisão a seus valores possíveis (ou viáveis).
- c) Função Objetivo: é uma função matemática que define a qualidade da solução em função das variáveis de decisão.

O modelo deverá ser adequado à natureza dos dados de entrada e de saída. A formulação será completada com o estabelecimento das hipóteses de representação que irão orientar a escolha e a possível utilização de modelos já existentes e de técnicas de solução (exatas, heurísticas, etc.) para o caso.

Na fase de validação do modelo, deve-se comparar seu comportamento com a realidade e, se necessário, atuar sobre os elementos buscando aproximar ao máximo o comportamento do sistema modelado ao do sistema real.

A utilização de modelos fornece algumas facilidades, como:

- a) visualização da estrutura do sistema real em análise;
- b) representação das informações e suas inter-relações;
- c) sistemática de análise e avaliação do valor de cada alternativa;
- d) instrumento de comunicação e discussão com outras pessoas.

A formulação de um modelo depende diretamente do sistema que se deseja representar. A função objetivo e as funções de restrições podem ser lineares ou não-lineares. As variáveis de decisão podem ser contínuas ou discretas e os parâmetros podem ser determinísticos ou probabilísticos.

O resultado da diversidade de representações de sistemas é o desenvolvimento de diversas técnicas de otimização, de modo a resolver cada tipo de modelo existente. Estas técnicas incluem, principalmente: programação linear, programação inteira, programação dinâmica, programação estocástica e programação não-linear.

A programação linear é utilizada para analisar modelos em que as variáveis são contínuas e apresentam comportamento linear tanto em relação às restrições como à função objetivo. Muitos trabalhos são desenvolvidos nessa área, cabendo citar, entre os autores brasileiros, Barroso e Ellenrieder (1971), Puccini (1975), Maculan e Pereira (1980), Humes e Humes (1987) e Gonzaga (1989) (GOLDBARG; LUNA, 2000).

A programação inteira se aplica a modelos em que qualquer variável não possa assumir valores contínuos, ficando condicionada a assumir valores discretos.

A programação dinâmica é utilizada em modelos em que o problema completo pode ser decomposto em subproblemas menores.

A programação estocástica é aplicada a uma classe especial de modelos cujos parâmetros são descritos por funções de probabilidade.

A programação não-linear é utilizada em modelos que exibem qualquer tipo de não-linearidade, seja na função objetivo ou em qualquer de suas restrições (GOLDBARG; LUNA, 2000).

Uma característica presente em quase todas as técnicas de programação matemática é que a solução ótima do problema não pode ser obtida em um único passo, devendo ser obtida iterativamente.

4.5 Programação Linear e Programação Linear Inteira

A Programação Linear (PL) é uma ferramenta para tomada de decisão ótima cuja função-objetivo é uma função linear e as restrições do problema de decisão são igualdades e desigualdades lineares. Seu objetivo é maximizar ou minimizar a função-objetivo, que está sujeita a restrições.

Já Programação Linear Inteira (PLI) é o nome dado aos problemas de Programação Linear (PL) que possuem a restrição adicional de que alguma ou mesmo todas as variáveis devem ser inteiras em intervalos pré-definidos. Quando todas as variáveis estão sujeitas à condição de integralidade, estamos perante um problema de Programação Linear Inteira Pura (PLIP); se apenas algumas o estão, trata-se de um problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Existe um caso especial de variáveis inteiras: as variáveis binárias que apenas podem tomar os valores 0 (zero) ou 1 (um). Quando todas as variáveis de um modelo são binárias, o modelo diz-se de Programação Linear Inteira Binária (PLIB). As variáveis binárias são muito úteis para exprimirem situações dicotômicas (sim ou não, fazer ou não fazer, etc.).

Os modelos de Programação Linear Inteira serão então do tipo dos modelos de Programação Linear, sujeitos a restrições adicionais indicando que algumas ou todas as variáveis são discretas.

Num problema de programação inteira limitado, o espaço de soluções pode ser considerado finito, ou seja, existe um número limitado de soluções viáveis (HILLIER; LIEBERMAN, 1988). A forma mais simples para otimizar um problema desse tipo seria enumerar todos esses pontos e escolher a melhor solução entre eles. Porém, para problemas reais, o número de pontos a ser investigado pode ser extremamente elevado, demandando tempos de processamento inviáveis mesmo com as atuais capacidades computacionais.

De uma maneira formal, diz-se que um problema de programação linear (PPL) é um programa matemático que, a partir de uma função-objetivo e um conjunto de restrições lineares, procura:

$$\text{Max/Min } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n = \sum_{i=1}^n c_i x_i = f(x_1, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

sujeita a

$$A_{m \times n} = \begin{cases} a_{1,1}x_1 + a_{1,2}x_2 + \dots + a_{1,n}x_n \leq b_1, \\ a_{2,1}x_1 + a_{2,2}x_2 + \dots + a_{2,n}x_n \leq b_2, \\ \vdots \\ a_{m,1}x_1 + a_{m,2}x_2 + \dots + a_{m,n}x_n \leq b_m, \end{cases}$$

$$x_j \geq 0, \quad 1 \leq j \leq n,$$

em que c_i , b_i e a_{ij} são números reais, x_i são variáveis de decisão, n é o número de variáveis de decisão, m é o número de restrições e Max/Min são abreviaturas para Maximizar/Minimizar.

Para um melhor entendimento dos conceitos, algumas definições tornam-se necessárias. Qualquer atribuição particular de valores numéricos para as variáveis x_1, \dots, x_n é chamada de solução para o problema.

As equações e/ou desigualdades descritas em $A_{m \times n}$ são as restrições, sendo que uma solução é dita admissível se ela satisfaz cada uma das restrições; caso alguma restrição não seja satisfeita, diz-se que é impossível encontrar uma solução.

A função Z a ser otimizada é denominada função-objetivo (ou simplesmente objetivo). Uma solução possível também é chamada de solução ótima se ela produz um valor da função-objetivo que é tão bom ou mesmo melhor que o valor produzido por qualquer outra solução considerada possível, ou seja, uma solução ótima é sempre possível. Porém, a solução ótima para um determinado problema não necessariamente é única, mas o valor ótimo da função-objetivo deve ser.

O objetivo de se resolver um problema de programação linear é identificar uma solução ótima. Pode acontecer, entretanto, que não existam valores para as variáveis que atendam a todas as restrições impostas. Quando esta situação ocorre, diz-se que o problema é insolúvel ou impossível. Existe, também, a possibilidade de um problema possuir uma solução em que o valor da função-objetivo seja positivo ou negativamente infinito. Neste caso, o problema é dito não-limitado ou tem uma solução ótima não-limitada, e a região das soluções possíveis é não-limitada (SIMMONS *apud* ZSCHORNACK, 2004).

Existem vários métodos utilizados na resolução de um *PPL*. Para sua utilização, alguns deles exigem que o problema seja primeiro convertido para a forma padrão, a qual é expressa em (4.1) (WIKLICKY *apud* ZSCHORNACK, 2004).

Na notação de matriz/vetor, também denominada notação compacta, a forma padrão do problema de programação linear é escrita na seguinte forma:

$$\begin{cases} \text{Max } Z = c^T x \\ \text{sujeito a } Ax = b \\ e \quad x \geq 0, \end{cases} \quad (4.2)$$

Neste caso, A é uma matriz $m \times n$ que contém os coeficientes das restrições e é denominada de matriz de restrições; b é uma matriz $m \times 1$, que contém os limites máximos ou mínimos associados a cada restrição; x é uma matriz $n \times 1$, que contém as variáveis de controle ou decisão; e c é uma matriz $1 \times n$, formada pelos coeficientes da função objetivo, representadas da seguinte maneira:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \quad c^T = [c_1, \dots, c_n]$$

A representação matricial do problema de programação matemática oferece a grande vantagem da brevidade notacional.

4.6 Descrição do Modelo Matemático Proposto

O modelo matemático proposto neste trabalho foi construído com o ferramental da Programação Linear Inteira Pura (*PLIP*). Nele são consideradas cinco variáveis relacionadas ao número específico de aerogeradores selecionados.

A resolução do problema consiste em determinar os valores das variáveis x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 (número de aerogeradores) de tal forma que maximize o Valor Presente

Líquido (*VPL*) expresso na função objetivo, pois o melhor projeto de investimento a ser escolhido é aquele cujo *VPL* é maior (LAPPONI, 2000).

4.6.1 Função Objetivo

Max

$$VPL = -II + \sum_{t=1}^n \left[\begin{array}{l} (T * P_C * E_G - J_G(t) - 4 * PbGV(t)) * x_1 + \\ (T * P_C * E_V - J_V(t) - 10 * PbGV(t)) * x_2 + \\ (T * P_C * E_{T500} - J_{T500}(t) - 2 * PbT(t)) * x_3 + \\ (T * P_C * E_{T2000} - J_{T2000}(t) - 6 * PbT(t)) * x_4 + \\ (T * P_C * E_{T5000} - J_{T5000}(t) - 10 * PbT(t)) * x_5 \end{array} \right] / (1+k)^t$$

Cada valor x_i com $i = 1, 2, \dots, 5$ representa um aerogerador e n representa a data terminal do projeto.

Os coeficientes 4, 10, 2 e 6 representam a quantidade de baterias utilizadas em cada modelo de aerogerador.

As variáveis que serão determinadas no modelo são:

- x_1 - número de aerogeradores Gerar246;
- x_2 - número de aerogeradores Verne550;
- x_3 - número de aerogeradores Turbo 500;
- x_4 - número de aerogeradores Turbo 2000;
- x_5 - número de aerogeradores Turbo 5000;

Os coeficientes da função objetivo são:

a) Coeficientes constantes:

II - Investimento Inicial

T - total de horas do período analisado;

P_C - valor de mercado da energia produzida;

E_G - energia produzida pelo aerogerador Gerar246 na velocidade de vento especificada;

E_V - energia produzida pelo aerogerador Verne550 na velocidade de vento especificada;

E_{T500} - energia produzida pelo aerogerador Turbo 500 na velocidade de vento especificada;

E_{T2000} - energia produzida pelo aerogerador Turbo 2000 na velocidade de vento especificada;

E_{T5000} - energia produzida pelo aerogerador Turbo 5000 na velocidade de vento especificada;

k - Taxa Mínima de Atratividade Financeira requerida;

Os coeficientes do modelo T e P_C possuem os respectivos valores: 8,64 (total de horas no ano dividido por 1000) e R\$ 0,24189 por kWh de energia fornecido.

b) Coeficientes variáveis:

$J_G(t)$ - valor dos Juros cobrados, aerogerador Gerar246, em função do tempo de financiamento;

$J_V(t)$ - valor dos Juros cobrados, aerogerador Verne550, em função do tempo de financiamento;

$J_{T500}(t)$ - valor dos Juros cobrados, aerogerador Turbo 500, em função do tempo de financiamento;

$J_{T2000}(t)$ - valor dos Juros cobrados, aerogerador Turbo 2000, em função do tempo de financiamento;

$J_{T5000}(t)$ - valor dos Juros cobrados, aerogerador Turbo 5000, em função do tempo de financiamento;

$PbGV(t)$ - valor das baterias utilizadas nos aerogeradores Gerar246 e Verne550 substituídas em tempos especificados;

$PbT(t)$ - valor das baterias utilizadas nos aerogeradores Turbo 500, Turbo 2000 e Turbo 5000 substituídas em tempos especificados;

t - duração de um período em anos.

O valor dos juros é calculado pela multiplicação do Capital (C) pela Taxa de Juros (TJ) cobrada; é feito durante o período de tempo em que o Capital (C) foi financiado, anulando-se para os anos seguintes até o término da vida útil do projeto. Portanto ele é variável ao longo do período analisado (t).

Os coeficientes $PbGV(t)$ e $PbT(t)$ também variam ao longo do período analisado no projeto devido às trocas de baterias ocorridas, com isso, dependendo do ano (t) em que se encontra o projeto, o valor gasto com as trocas de baterias é diferente de zero.

a) Restrições associadas ao tipo das variáveis:

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geq 0 \quad \in \quad N$$

Essa restrição do modelo, relacionada ao tipo das variáveis, indica a necessidade de se obter variáveis do tipo inteiras e maiores ou iguais a zero, tendo em vista se tratar de equipamentos cuja solução admissível deve pertencer ao Conjunto dos Números Naturais.

b) Restrições associadas à geração de energia:

$$PotA_E * x_1 + PotA_V * x_2 + PotA_{7500} * x_3 + PotA_{2000} * x_4 + PotA_{7500} * x_5 \geq Pdes$$

$$PotA_E * x_1 + PotA_V * x_2 + PotA_{7500} * x_3 + PotA_{2000} * x_4 + PotA_{7500} * x_5 \leq \max((\text{int}(1 + PdesPo(i))) * Po(i))$$

As restrições precedentes informam a faixa de valores em que a potência deve estar. A primeira restrição impõe que a potência gerada pelo sistema eólico deve ser, no mínimo, igual à potência desejada. Já a segunda restrição impõe um limite máximo para a potência gerada pelo sistema eólico. O limite está associado à máxima potência gerada pela soma dos aerogeradores de um único modelo.

A parte direita da segunda restrição define o número máximo de cada modelo de aerogerador multiplicado por sua potência nominal. O termo $\text{int}(\dots)$ é o responsável pela determinação do número de aerogeradores de cada modelo.

Assim:

$PotA_G$ - potência nominal do aerogerador Gerar246;

$PotA_V$ - potência nominal do aerogerador Verne550;

$PotA_{T500}$ - potência nominal do aerogerador Turbo 500;

$PotA_{T2000}$ - potência nominal do aerogerador Turbo 2000;

$PotA_{T5000}$ - potência nominal do aerogerador Turbo 5000;

$Pdes$ - potência desejada.

c) Identidades associadas ao capital.

Aerogerador Gerar246

$$-PA_G * x_1 + VIA_G = 0$$

$$-4 * PbGV * x_1 + VibatA_G = 0$$

$$J_G(t) - (VIA_G + VibatA_G) * TJ = 0$$

Aerogerador Verne550

$$-PA_V * x_2 + VIA_V = 0$$

$$-10 * PbGV * x_2 + VibatA_V = 0$$

$$J_V(t) - (VIA_V + VibatA_V) * TJ = 0$$

Aerogerador Turbo 500

$$-PA_{T500} * x_3 + VIA_{T500} = 0$$

$$-2 * PbT * x_3 + VibatA_{T500} = 0$$

$$J_{T500}(t) - (VIA_{T500} + VibatA_{T500}) * TJ = 0$$

Aerogerador Turbo 2000

$$- PA_{T2000} * x_4 + VIA_{T2000} = 0$$

$$- 6 * PbT * x_4 + VibatA_{T2000} = 0$$

$$J_{T2000}(t) - (VIA_{T2000} + VibatA_{T2000}) * TJ = 0$$

Aerogerador Turbo 5000

$$- PA_{T5000} * x_5 + VIA_{T5000} = 0$$

$$- 10 * PbT * x_5 + VibatA_{T5000} = 0$$

$$J_{T5000}(t) - (VIA_{T5000} + VibatA_{T5000}) * TJ = 0$$

As duas primeiras identidades descritas para cada aerogerador definem o valor gasto em equipamentos e com o banco de baterias, respectivamente. Já a terceira identidade define o valor dos juros cobrados em função do tempo de financiamento.

Entende-se aí:

PA_G - preço do aerogerador Gerar246;

VIA_G - valor inicial do aerogerador Gerar246;

$VibatA_G$ - valor inicial do banco de baterias do aerogerador Gerar246;

$PbGV$ - preço das baterias utilizadas pelos Aerogeradores Gerar246 e Verne550;

PA_V - preço do aerogerador Verne550;

VIA_V - valor inicial do aerogerador Verne550;

$VibatA_V$ - valor inicial do banco de baterias do aerogerador Verne550;

PA_{T500} - preço do aerogerador Turbo 500;

VIA_{T500} - valor inicial do aerogerador Turbo 500;

$VibatA_{T500}$ - valor inicial do banco de baterias do aerogerador Turbo 500;

PbT - preço das baterias utilizadas pelos aerogeradores Turbo 500, Turbo 2000 e Turbo 5000;

PA_{T2000} - preço do aerogerador Turbo 2000;

VIA_{T2000} - valor inicial do aerogerador Turbo 2000;

$VibatA_{T2000}$ - valor inicial do banco de baterias do aerogerador Turbo 2000;

PA_{T5000} - preço do aerogerador Turbo 5000;

VIA_{T5000} - valor inicial do aerogerador Turbo 5000;

$VibatA_{T5000}$ - valor inicial do banco de baterias do aerogerador Turbo 5000;

TJ - Taxa de Juros.

Após a adequação do modelo matemático aos objetivos propostos, foi possível a realização de simulações através dos Softwares Excel 2.0 e Matlab 7.4, nas quais foram obtidos os resultados referentes às melhores escolhas considerando a maximização do Valor Presente Líquido (VPL). Esses resultados serão apresentados e analisados no Capítulo 7.

4.7 Avaliação Econômica de Projetos

O estudo da viabilidade econômica consiste em se fazer estimativas do investimento inicial, operação e manutenção, custos e receitas geradas para o desenvolvimento de um projeto durante um determinado período de tempo (AZEVEDO; SÁ JÚNIOR, 2001), sendo fundamental para um dimensionamento correto do empreendimento.

No caso de geradores eólicos, sabe-se, em relação ao seu custo, que quanto maior for a capacidade de produção de energia, maior será o Investimento Inicial (II). Em contrapartida, menor será o custo da energia produzida (CARVALHO; OLIVEIRA JÚNIOR; REIS, 2006).

Todo Investimento (I) pode ser compreendido como uma aplicação de recurso (monetário, bens ou quaisquer utilidades que possam ser expressas monetariamente), a que se chama Capital (C), cuja finalidade seja obter o retorno deste capital acrescido do lucro desejado (CARVALHO, 2002).

O custo dos geradores eólicos é influenciado por diversos fatores, tais como: características do sistema, características dos ventos no local da instalação, local de instalação das empresas fornecedoras dos equipamentos, valor de mercado da energia produzida no local da instalação, entre outros.

O gasto de Investimento (I) está tipicamente em função da tecnologia adotada e do nível de desempenho desejado, é a soma do custo dos diversos equipamentos componentes do projeto, mais os custos de implantação do mesmo.

O maior desafio, hoje, é tornar o preço da energia eólica mais próxima de um valor competitivo no mercado de energia elétrica e divulgar essa tecnologia aos diferentes setores da sociedade, retomando, assim, um aproveitamento do recurso natural vento, que já é feito desde os mais remotos tempos.

Outro fator de grande importância na avaliação econômica de projetos é a determinação do valor agregado ao bem (produto ou serviço) gerado. Valor agregado é o reconhecimento do benefício alcançado pelo consumidor versus o recurso empregado para realizar uma atividade ou, ainda, o incremento de facilidade para atender a uma necessidade ou resolver um problema (BLATTMANN; RADOS; VALERIM, 1999).

No caso da energia elétrica, o valor agregado pode ser definido como a percepção que o consumidor tem da energia fornecida, atendendo a seu conjunto de necessidades e considerando os benefícios obtidos.

4.7.1 Influência das Receitas

A produção de energia elétrica a partir de fonte eólica tem variação de acordo com a velocidade do vento disponível no local da instalação do sistema eólico. Quanto maior a velocidade do vento, levando em consideração os limites operacionais da máquina, maior a geração de energia e, em consequência, maior a receita gerada.

O aerogerador capta uma parte da energia cinética do vento e a transforma em energia elétrica. Cada empresa produtora de aerogeradores possui um tipo de construção diferenciada e essas diferenças determinam a potência do equipamento, nível de rotação, nível de ruído e segurança. A curva de potência, linha sólida, apresentada na Figura 4.1, caracteriza-se de acordo com as diferentes velocidades do vento.

A velocidade de entrada (V_E) é aquela em que usualmente a geração elétrica se inicia (ponto a na Figura 4.1); neste ponto, também inicia a geração de receitas do projeto: a velocidade nominal (V_N) é aquela em que o aparelho atinge sua capacidade nominal (ponto b na Figura 4.1); também neste ponto, obtém-se a produção máxima da turbina e, em consequência, a receita máxima gerada pelo projeto; então, finalizando, tem-se a velocidade de corte do vento (V_C) em que velocidades superiores à capacidade nominal do equipamento ativam o sistema automático de proteção da máquina (CARVALHO, 2003).

O sistema de segurança em velocidades de vento muito altas faz com que o equipamento continue produzindo energia em segurança e com baixo nível de ruído, embora diminua a produção e, em consequência, a receita gerada. O ponto c, na Figura 4.1, evidencia essa queda na produção.

A potência elétrica é função do cubo da velocidade do vento. A linha tracejada na Figura 4.1 mostra a curva de produção de energia do aerogerador sem o acionamento do sistema de segurança do equipamento.

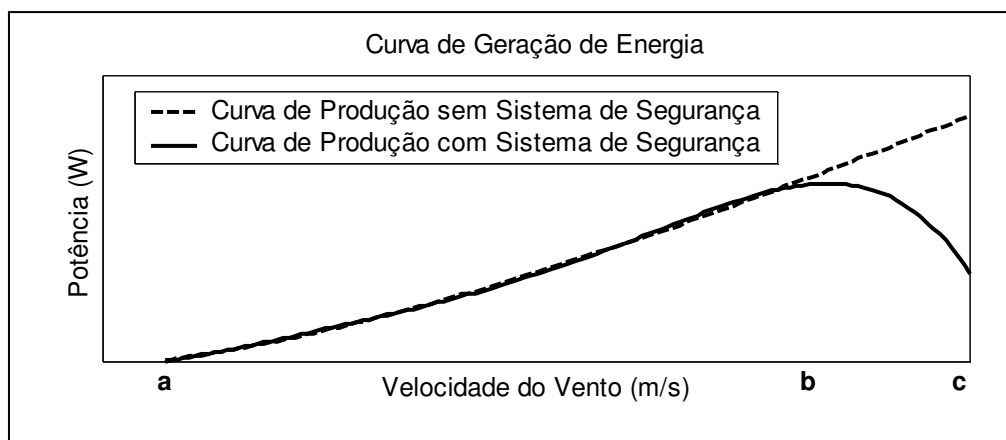


Figura 4.1: Curva de geração de energia.

Fonte: ENERSUD (2006).

A receita total (RT) é obtida pela multiplicação da produção de energia elétrica do aerogerador (E_P) pelo valor de mercado da energia produzida (P_C) e pelo número de aerogeradores (N_A) num período de tempo (T), definida a seguir:

$$RT = E_P * P_C * N_A * T \quad (4.3)$$

Vê-se, assim, que a produção de energia é obtida através das curvas de produção apresentadas na Figura (4.1).

No modelo proposto, E_p representa a produção individual de energia de cada aerogerador selecionado; $(E_G, E_V, E_{T500}, E_{T2000}, E_{T5000})$, N_A são as variáveis x_i .

4.7.2 Influência dos Custos

Os custos de instalação de um sistema eólico para produção de energia elétrica podem ser subdivididos em duas etapas: custos iniciais de investimento e custos anuais de operação e manutenção (CARVALHO; OLIVEIRA JÚNIOR; REIS, 2006).

Como custos iniciais de investimento, podem-se listar o estudo da viabilidade técnica do projeto e despesas com a compra e instalação dos equipamentos. Estes equipamentos são: aerogeradores, torres, baterias, cabos, tubos e inversores.

Já pelos custos anuais de operação e manutenção, respondem principalmente a troca de baterias, elementos utilizados para a acumulação da energia produzida, além da depreciação e pagamento de despesas financeiras, como juros.

Dentre os principais tipos de baterias existentes no mercado, podem ser citadas: alcalinas, chumbo-ácido estacionária ventilada, chumbo-ácido estacionária regulada à válvula (VRLA), chumbo-ácido selada automotiva, níquel-metal hidreto, lítion-íon, níquel-cádmio e prata-zinco.

Cada tipo de bateria possui características específicas que determinam a sua melhor aplicação. As de chumbo ácido são as produzidas há mais tempo, mais baratas e mais usadas no mercado e podem ser divididas em três tipos, conforme sua aplicação (LAZZARIN, 2006). As baterias automotivas usadas em automóveis têm como principal função fazer a ignição ou partida dos veículos. Baterias tracionárias, também conhecidas como de ciclo profundo, são usadas principalmente em empilhadeiras elétricas, veículos de tração e em alimentação de emergência. Baterias estacionárias são projetadas para trabalhar em local fixo e são muito utilizadas em UPS (*Uninterrupted Power Supply*).

De acordo com as empresas produtoras de baterias, aconselha-se o uso de baterias estacionárias para acumulação de energia em sistemas de produção de energia eólica. Estas baterias custam mais em relação às baterias automotivas, mas possuem uma durabilidade

maior. Baterias estacionárias, sob condições adequadas de uso, têm vida útil de 4 a 7 anos, segundo fabricantes como Acumuladores Moura (ACUMULADORES MOURA, 2007) .

Para o estudo da viabilidade econômica, é necessária a obtenção dos valores de algumas variáveis envolvidas no modelo (LAPPONI, 2000).

Como custos totais (CT), neste estudo, é considerado o pagamento das taxas de juros praticadas pelo mercado (TJ), incidentes sobre o capital investido (C), sem as trocas de baterias, acrescidas da depreciação dos equipamentos (D).

$$CT = TJ * C + D \quad (4.4)$$

No modelo proposto, $TJ * C$ está representado pela constante Juros variando ao longo do tempo $J(t)$.

“A depreciação é o valor correspondente ao desgaste, exaustão ou à obsolescência de um bem devido ao seu uso na atividade empresarial”. (CARVALHO, 2002, p. 233).

Seu valor é calculado em função do valor de cada bem proporcionalmente ao grau de utilização e à vida útil, em anos, especificada pela legislação. Vários são os métodos de cálculo da depreciação, porém a legislação brasileira adota apenas o método linear (CARVALHO, 2002).

A depreciação dos equipamentos (D) é dada pela diferença do valor inicial dos equipamentos (V_I) e o valor residual (V_R), dividido pela vida útil (V_U) dos mesmos (LAPPONI, 2000).

$$D = \frac{V_I - V_R}{V_U} \quad (4.5)$$

No modelo proposto neste trabalho, o valor da Depreciação (D) é desconsiderado.

Logo, a Receita Líquida (RL) é definida como a diferença entre a receita total (RT) e os custos totais (CT):

$$RL = RT - CT \quad (4.6)$$

Tendo a RL , Equação (4.6), pode-se fazer uma análise econômica, de rentabilidade e financeira do projeto.

Pela análise econômica, vai responder o Fluxo de Caixa (FC), definido a seguir:

$$FC = RT - TJ * C \quad (4.7)$$

A Equação (4.7) nos dá o (FC), que é a contribuição do projeto em termos de disponibilidade monetária.

4.8 Avaliação da Rentabilidade de Projetos

A análise da rentabilidade será feita levando em consideração três indicadores: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno Modificada ($TIRM$) e Período de Recuperação do Capital (PRK), descritos a seguir (LAPPONI, 2000).

4.8.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido representa o resultado de todos os valores do FC calculados para a data zero, levando em consideração a taxa de juros do período (AZEVEDO; SÁ JÚNIOR, 2001).

De acordo com Lapponi (2000), o Método do Valor Presente Líquido compara todas as entradas e saídas de dinheiro na data inicial do projeto, descontando os retornos futuros do Fluxo de Caixa (FC) com a Taxa Mínima de Atratividade Financeira (k). Sendo assim, sempre que a soma de todos os retornos do projeto na data zero for maior que o Investimento Inicial (II), o VPL será positivo; logo, se o VPL for maior que zero, o projeto deve ser aceito, do contrário, rejeitado. Também pode ser definido como o retorno líquido atualizado gerado pelo projeto e que permite analisar a viabilidade econômica do projeto a longo prazo.

$$VPL = -II + \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (4.8)$$

Na Equação (4.8), o FC_t representa o Fluxo de Caixa do Projeto por período, II o Investimento Inicial, n o número de períodos que representa o horizonte do projeto, t a duração de um período em anos e k a Taxa Mínima de Atratividade Financeira requerida para realizar o investimento.

Sempre ao analisar-se uma proposta de investimento, deve ser considerado o fato de se estar perdendo a oportunidade de obter retornos pela aplicação do mesmo capital em outros projetos. A nova proposta para ser atrativa deve render, no mínimo, o custo de capital do projeto de investimento (AZEVEDO; SÁ JÚNIOR, 2001).

A Taxa Mínima de Atratividade Financeira (k), taxa mínima requerida para realizar o investimento, também conhecida como custo de capital do projeto de investimento, depende do binômio risco-retorno do projeto de investimento, considerando-se que se espera que para um aumento de risco também haja um aumento de retorno e vice-versa (LAPPONI, 2000).

4.8.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno, ou simplesmente TIR , é a taxa de juro que zera o Valor Presente Líquido (VPL) do Fluxo de Caixa (FC). O procedimento de cálculo da TIR é realizado com o modelo matemático do VPL procurando a taxa de juro TIR que zera o VPL (LAPPONI, 2000).

$$VPL = 0 = -II + \frac{FC_1}{1+TIR} + \frac{FC_2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} + \dots + \frac{FC_n}{(1+TIR)^n} \quad (4.9)$$

Agrupando-se a soma dos retornos, pode-se escrever:

$$0 = -II + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad (4.10)$$

Na equação (4.10):

I representa o investimento de capital na data zero e é considerado um desembolso;

n é o prazo de análise ou data terminal do projeto;

FC_t é o Fluxo de Caixa Total;

TIR é a taxa de juro que zera o Valor Presente Líquido.

Para aplicação do Método da TIR , o FC_t do investimento deve ser do tipo simples, ou seja, deve conter apenas uma mudança de sinal ao longo da vida útil do projeto, garantindo assim a existência de uma única TIR . Podem ser do tipo $(-,+,+,+,\dots,+)$ com um único desembolso de investimento na data zero ou $(-,-,+,+,\dots,+)$, $(-\dots,-,+,+,\dots,+)$ com mais de um desembolso de investimento, sempre a partir da data zero (LAPPONI, 2000).

Enquanto o valor da TIR for maior que a Taxa Mínima de Atratividade Financeira (k) requerida, o investimento deverá ser aceite, caso contrário, deverá ser rejeitado.

Porém nem sempre o investimento de um projeto é feito com um único desembolso na data zero, quando os projetos exigirem mais de um ano de desembolso, a expressão da TIR aparentemente não poderia ser aplicada. Uma forma mais geral para o cálculo da TIR é apresentada a seguir (LAPPONI, 2000):

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad (4.11)$$

Nesse caso, o valor FC_t representa todos os capitais do fluxo de caixa da data zero até a data terminal n .

Já para avaliar projetos de investimento cujo FC apresenta mais de uma mudança de sinal, pode-se utilizar o Método da Taxa Interna de Retorno Modificada ($TIRM$). O critério do Método da $TIRM$ também estabelece que, enquanto a $TIRM$ for maior que a Taxa Mínima de Atratividade Financeira (k) requerida, o investimento deverá ser aceite, caso contrário, rejeitado (LAPPONI, 2000).

Em função das várias mudanças de sinais apresentadas nos FC dos diferentes cenários gerados neste trabalho, o indicador utilizado para análise de rentabilidade é a Taxa Interna de Retorno Modificada ($TIRM$), a fim de padronizar os resultados obtidos.

4.8.2.1 Taxa Interna de Retorno Modificada (*TIRM*)

A Taxa Interna de Retorno Modificada (*TIRM*) é uma forma alternativa de obter uma única taxa de retorno de um projeto quando se tem mais de uma inversão de sinais no *FC* do projeto e, portanto, não é possível obter-se o resultado desejado através do método da Taxa Interna de Retorno (*TIR*).

A *TIRM* compara a soma dos valores futuros dos retornos na data terminal com a soma dos valores presentes dos desembolsos na data inicial do projeto, sem considerar no cálculo da *TIRM* o sinal negativo dos desembolsos (LAPPONI, 2000).

É obtida com a expressão seguinte:

$$TIRM = \left(\frac{VF_das_receitas}{VP_dos_desembolsos} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (4.12)$$

O cálculo da *TIRM* pode ser feito considerando-se diferentes taxas de juros para calcular o valor futuro dos retornos e o valor presente dos desembolsos (LAPPONI, 2000).

A *TIRM* também é conhecida como Método da Taxa Externa de Retorno (*TER*) ou Taxa Terminal de Retorno (*TTR*).

4.8.3 Período de Recuperação do Capital (*PRK*)

O Período de Recuperação do Capital (*PRK*) é o prazo de tempo necessário para que os desembolsos sejam integralmente recuperados (LAPPONI, 2000).

4.9 Avaliação Financeira de Projetos

O índice de avaliação financeira utilizado neste estudo é o Fluxo Líquido de Caixa (*FLC*), descrito a seguir.

4.9.1 Fluxo Líquido de Caixa (FLC)

O Fluxo Líquido de Caixa (*FLC*) é o valor disponível em caixa depois de efetuados todos os pagamentos previstos na execução do orçamento do projeto para o período determinado (LAPPONI, 2000).

$$FLC = FC_t - AM \quad (4.13)$$

Na Equação (4.13), FC_t representa o Fluxo de Caixa de cada período e AM a amortização. Neste estudo, considerou-se o Sistema de Amortizações Constantes (*SAC*), onde o valor das amortizações é proporcional ao número de períodos de pagamento (CARVALHO, 2002).

5 ALGORITMOS GENÉTICOS

5.1 Introdução

Para a resolução do problema proposto, há várias ferramentas que podem ser utilizadas, por exemplo, Método Simplex, Método de Branch-and-Bound, Método do Plano de Cortes, Método dos Pontos Interiores, Metaheurísticas, etc.

Neste estudo, optou-se pela utilização de uma Metaheurística, os Algoritmos Genéticos (AG_S), como ferramenta para resolução do problema de Programação Linear Inteira Pura ($PLIP$) formulado. Sua escolha se deve ao fato de que, com esse método, é possível a exploração de um espaço mais amplo de soluções potenciais para o problema do que com métodos convencionais.

Algoritmos Genéticos (AG_S) são algoritmos de busca baseados na genética e no processo de seleção natural. “É uma técnica de busca aleatória direcionada, desenvolvida por John Holland (1975), capaz de obter a solução ótima global num processo de busca complexo multidimensional”. (NEUMANN et al, 2004, p. 03).

Seu surgimento deu-se por volta de 1950 quando vários biólogos usavam técnicas computacionais para a simulação de sistemas biológicos. Entre 1960 e 1970, sob a direção de John Holland, na Universidade de Michigan, iniciou-se o estudo de algoritmos genéticos como os conhecidos atualmente.

Em 1989, David Goldberg apresentou a solução de complexos problemas de engenharia usando algoritmos genéticos, o que ajudou o método a se tornar popular entre os pesquisadores.

Os Algoritmos Genéticos usam operadores inspirados no processo da evolução natural das espécies que, conforme Darwin, se dá pela seleção dos indivíduos mais aptos ao ambiente

em que vivem. Estes operadores, conhecidos como operadores genéticos, manipulam indivíduos de uma população através de gerações para melhorar a adaptação (*fitness*) gradativamente (NEUMANN et al, 2004).

“Sua lógica de funcionamento está baseada nas leis da evolução natural propostas por Charles Darwin, e utiliza uma nomenclatura derivada da genética, na qual os seres vivos têm no núcleo de suas células moléculas de DNA, onde estão registradas suas características em *genes*, organizados em cadeias, chamadas cromossomos”. (GOMES, 2005, p. 31).

Eles não utilizam muito conhecimento a respeito do problema a ser otimizado e não manipulam os parâmetros do problema diretamente operando sobre códigos que representam os parâmetros do modelo. O primeiro passo numa aplicação de AG_S é codificar o problema em estudo, ou seja, representar os parâmetros do problema. O segundo passo é criar uma população de possíveis soluções. Em seguida, o próximo passo é determinar um conjunto de operadores genéticos (seleção, cruzamento e mutação). Então, finalmente, assim como em outros métodos de busca, os AG_S precisam saber quantificar a qualidade das soluções encontradas, para posteriormente poder melhorá-las, o que é realizado através da determinação de uma função de avaliação (*fitness*) (GOLDBERG, 1989).

Os Algoritmos Genéticos tornaram possível a exploração de um espaço mais amplo de soluções potenciais para um problema do que programas convencionais.

A estrutura básica de um AG simples é apresentada na Figura 5.1.

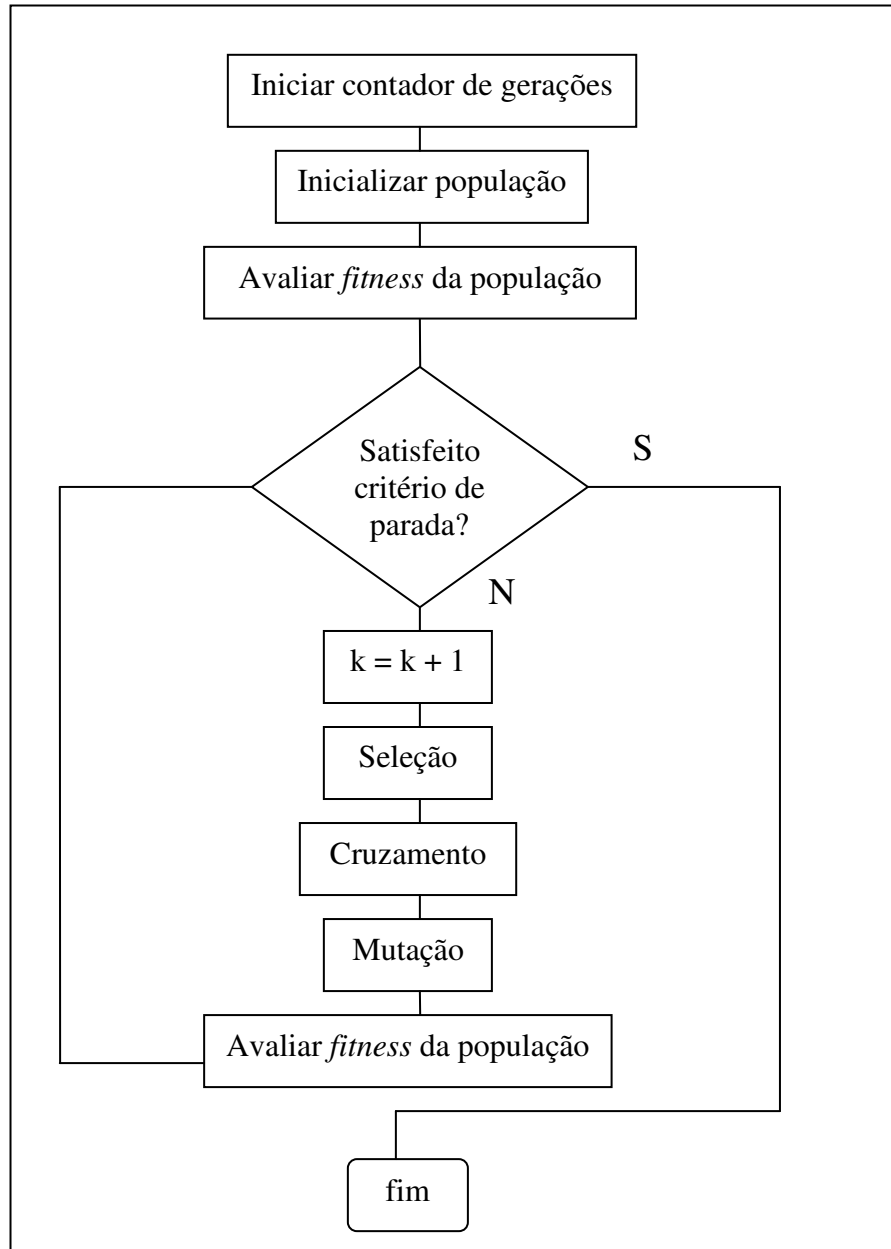


Figura 5.1: Fluxograma de um Algoritmo Genético simples.
 Fonte: GOMES (2005).

5.2 Representação dos Cromossomos

Todos os seres vivos são formados a partir de um conjunto de informações que estão contidas no núcleo de suas células. Estas estruturas que armazenam as informações de como serão os indivíduos recebem o nome de cromossomos. Os cromossomos podem ser divididos em segmentos longitudinais chamados genes (BARCELLOS, 2000).

“Os diferentes atributos que caracterizam cada indivíduo são chamados “genes” e as informações que descrevem uma solução do problema estão codificadas nos genes de cada indivíduo”. (BRITTO, 2007, p. 39).

O ponto de partida nos Algoritmos Genéticos é a representação de cada possível solução x no espaço de busca, ou seja, no universo de soluções, como uma seqüência de símbolos s pertencentes a um alfabeto finito $U = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$. Cada seqüência de s corresponde a um cromossomo e cada elemento de s corresponde a um gene. Considerando que cada gene pode assumir qualquer valor de U , logo cada elemento de U que forma o gene é chamado de alelo, como pode ser observado na Figura 5.2 (GOMES, 2005).

Em 1975, Holland apresenta o algoritmo genético clássico, no qual as soluções são representadas por arranjos binários de tamanho fixo. Porém, em diversas aplicações práticas, a utilização da linguagem binária leva a um resultado insatisfatório (ZUBEN, 1996). Atualmente, buscando-se obter melhores resultados, os AG_s também podem ser representados na forma real (ponto flutuante, onde cada cromossomo é um vetor de números reais).

Na representação real, há um ganho em termos de tempo de processamento, além de evitar-se lacunas inacessíveis no domínio de busca usando a representação binária (MICHALEWICZ, 1999). Porém a representação binária favorece os esquemas curtos sugeridos por Holland (1975).

A Figura 5.2 mostra a representação esquemática de um cromossomo.

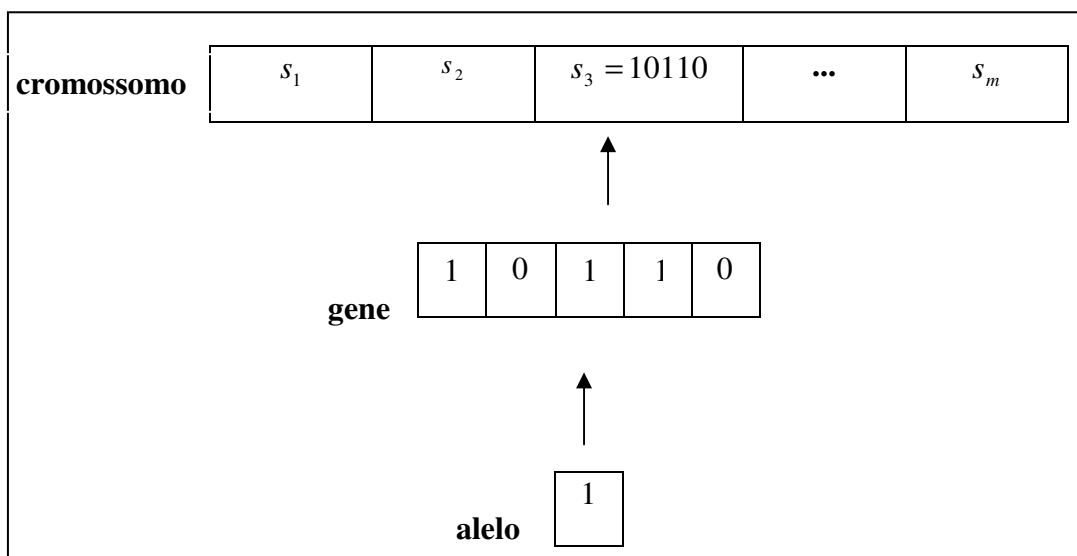


Figura 5.2: Representação esquemática de um cromossomo na forma binária.

5.3 Inicialização da População

Invariavelmente a população é iniciada aleatoriamente com o cuidado de que todo o espaço de busca do problema seja considerado. Porém, dispondo-se de algum conhecimento inicial da população a ser gerada, este pode ser levado em consideração na geração da população inicial de acordo com alguma regra inicial. Deve-se tomar cuidado para não gerar indivíduos inválidos na etapa de inicialização.

5.4 Função de Avaliação

A função de avaliação, função objetivo ou função custo é a maneira utilizada pelos Algoritmos Genéticos para determinar a qualidade de um indivíduo como solução do problema em questão. Ela determina o grau de aptidão (*fitness*) de um cromossomo (possível solução).

“Nos AG_s todos os cromossomos, em cada geração, são submetidos a função objetivo para determinar o valor do *fitness* de cada indivíduo que definirá a probabilidade de seleção e reprodução para a geração seguinte”. (GOMES, 2005, p. 34).

O *fitness* define uma medida de quão adaptado está o indivíduo ao ambiente, quanto maior for o valor encontrado da função *fitness*, maiores são as chances de reproduzir e passar seu material genético às gerações futuras. Escolher a função de avaliação de maneira adequada é um dos fatores fundamentais para a convergência do Algoritmo Genético (GOMES, 2005).

5.5 Operadores Genéticos

Os operadores genéticos são responsáveis pelas mudanças ocorridas na população, ao passar de uma geração para outra, mudando algumas de suas características.

Esses operadores podem realizar muitas operações diferentes, desde uma simples modificação de alelos selecionados aleatoriamente até operações de busca local. Eles são necessários para diversificar a população de cromossomos e manter as características de adaptação adquirida pelas gerações anteriores.

“A evolução dos Algoritmos Genéticos é baseada na aplicação dos operadores genéticos sobre a população, com o objetivo de selecionar os mais aptos, cruzar os cromossomos entre si e provocar mutação nos descendentes”. (GOMES, 2005, p. 36).

A frequência de aplicação dos operadores genéticos é um parâmetro muito importante no funcionamento do Algoritmo Genético, pois ela define quantas vezes será aplicado cada operador na população corrente, a fim de se gerar a população seguinte. Assim sendo, deve-se ter um equilíbrio na aplicação desses operadores, evitando-se problemas de convergência prematura possivelmente para um máximo/mínimo local, quando a frequência de aplicação de operadores de cruzamento for muito elevada ou a busca tornar-se quase que aleatória, implicando uma convergência muito lenta, se a frequência de aplicação de mutação for muito alta.

Os operadores genéticos são: Seleção, Cruzamento e Mutação.

5.6 Seleção

A seleção é o processo pelo qual dois indivíduos são escolhidos para gerarem um novo ser; estes indivíduos são escolhidos aleatoriamente na população e, a rigor, todos têm oportunidade de serem escolhidos (GONÇALVES; VICENTE, 2000).

O processo de seleção inicia-se com o cálculo do grau de aptidão dos cromossomos quando submetidos, um a um, à função de avaliação (função custo ou *fitness*), dando preferência àqueles melhor adaptados, ou seja, com melhor nível de aptidão (GOMES, 2005).

Podem-se usar vários métodos para o processo de seleção, entre eles: Método da Roleta, Método do *Ranking* Linear, Método do *Ranking* Geométrico Normalizado, Seleção por Torneio e Método Elitista, além de outras variações desses métodos (GOLBERG, 1989), (MICHALEWICZ, 1999).

5.6.1 Método *Ranking* Geométrico Normalizado

É uma seleção por ordenação não linear, sendo a probabilidade ajustada exponencialmente dentro do intervalo $[0 \ 1]$. É necessário definir-se um parâmetro $q \in (0...1)$ que determina a maior ou menor pressão de seleção exercida sobre a população. Os cromossomos são ordenados em ordem decrescente de valor de *fitness*, sendo a posição $rank(i) = 1$ correspondente ao melhor indivíduo e a posição $rank(i) = P$ correspondente ao pior indivíduo. As probabilidades de seleção $p(i)$ são calculadas pela Equação (5.1), (GOMES, 2005):

$$p(i) = \frac{q(1-q)^{rank(i)-1}}{1-(1-q)^P} \quad (5.1)$$

Nessa equação:

P = tamanho da população;

$p(i)$ = probabilidade de seleção;

q = taxa unitária de reprodução do cromossomo mais apto;

$rank(i)$ = posição do cromossomo ao ser enfileirado em ordem decrescente de *fitness*.

Tal método é dito normalizado em função de $\sum_{i=1}^P p(i) = 1$.

As abordagens baseadas em *rank* melhoram o desempenho dos Algoritmos Genéticos ao controlar melhor a pressão seletiva (MICHALEWICZ, 1999). No entanto, não existem regras na determinação do valor adequado para o parâmetro de ajuste q ; esse valor depende do tipo de problema em estudo.

5.6.2 Método Elitista

Basicamente a idéia elitista consiste no fato de que os melhores indivíduos de cada geração não devem “morrer” junto com a sua geração e sim passar para a próxima visando garantir que seus genomas sejam preservados (LINDEN, 2006).

Este modelo garante que os melhores indivíduos de uma geração sempre aparecerão na geração seguinte. Se, depois de feita uma verificação, os melhores cromossomos da geração atual não estiverem presentes na próxima geração, após aplicados os operadores genéticos, estes indivíduos ausentes são inseridos artificialmente no lugar dos piores elementos da futura geração.

É possível o controle de quantidades maiores de indivíduos, embora o método mais comum de elitismo verifique apenas o melhor indivíduo da população. Normalmente, a estratégia de seleção por elitismo, devido ao seu comportamento, é usada com outro método de seleção objetivando manter os melhores indivíduos na população.

5.7 Cruzamento ou *Crossover*

O cruzamento é um dos operadores genéticos responsável pela troca de informações entre os cromossomos, ele é feito através de um processo sexuado, ou seja, envolve mais de um indivíduo (GOMES, 2005).

Deseja-se que um novo indivíduo, gerado através de outros dois cromossomos, herde as características genéticas de seus genitores, geralmente os cromossomos mais bem adaptados ao meio, constituindo um indivíduo a sua altura, ou melhor. Os indivíduos chamados pais recombina suas características permitindo que as próximas gerações herdem suas características genéticas.

Realizando o processo de cruzamento repetidas vezes, espera-se que o espaço de pesquisa seja devidamente explorado, de forma que as futuras populações converjam para a solução do problema (GONÇALVES; VICENTE, 2000).

É comum atribuir-se uma probabilidade de cruzamento p_c que define os indivíduos da população a serem cruzados; este valor depende do problema em estudo, mas é comum se

trabalhar com valores elevados. Existem várias formas de se fazer o cruzamento genético entre dois cromossomos, entre elas: Cruzamento Simples, Cruzamento Uniforme, Cruzamento Aritmético, Cruzamento Aritmético com os Extremos e Cruzamento Heurístico (GOMES, 2005).

5.7.1 Cruzamento Aritmético

No cruzamento aritmético, os pais são substituídos pelos filhos gerados através da combinação linear entre os progenitores, conforme Equações (5.2) e (5.3), (GOMES, 2005):

$$x = r.X + (1 - r)Y \quad (5.2)$$

$$y = r.Y + (1 - r)X \quad (5.3)$$

Em (5.2) e (5.3):

r = número gerado aleatoriamente entre 0 e 1;

X e Y = pais;

x e y = filhos gerados.

5.8 Mutação

O processo de mutação consiste em modificar aleatoriamente um ou mais genes do cromossomo pai, e tem como objetivo restaurar a diversidade genética eventualmente perdida durante o processo evolutivo (GOLDBERG, 1989).

Nesse processo, o indivíduo é alterado para se adaptar a possíveis mudanças no meio em que vive. Não é um processo muito freqüente na natureza, logo deve ser feito poucas vezes quando uma população é gerada. Porém, em alguns problemas, o processo de mutação pode ser aplicado com freqüência, sempre que houver necessidade. Esta surge, normalmente,

quando é gerado um indivíduo (solução) inviável para o problema e este precisa ser modificado para que se torne viável.

O operador de mutação opera sobre um único cromossomo de cada vez e pode ser aplicado, indiferentemente, antes ou depois do operador de cruzamento. A frequência de ocorrência da mutação em cada indivíduo é definida através da probabilidade de mutação p_m . Algumas formas de mutação são: Mutação Uniforme, Mutação Não-Uniforme e Mutação de Contorno (GOMES, 2005).

5.8.1 Mutação Uniforme

A mutação uniforme consiste em se atribuir um valor randômico $r(i)$, uniformemente distribuído entre $[0 \ 1]$, a cada gene (representação numérica real) ou a cada alelo (representação binária) do cromossomo e comparar-se com a probabilidade de mutação. Se $r(i) \leq p_m$, o gene é substituído por um valor aleatório dentro do intervalo de busca do problema $[a \ b]$, sendo a o limite inferior e b o limite superior do universo de soluções (GOMES, 2005).

5.9 Critério de Parada

Os Algoritmos Genéticos são métodos iterativos de busca estocástica e, portanto, necessitam de um critério de parada para informar ao programa o momento de parar. Embora existam vários critérios de parada com diferentes variações e combinações, nenhum deles se mostra adequado para todos os casos. São eles (BRITTO, 2007):

- a) monitoramento do tempo de execução: a evolução normalmente é terminada após um número específico de gerações, avaliações, ou tempo de processamento, porém, para algoritmos que usam funções de *fitness* custosas computacionalmente ou para algoritmos que devem gerar soluções rapidamente, o critério de término primário deve estar baseado no tempo. Porém este critério apresenta a desvantagem de não

- existir nenhuma garantia de que haja evolução significativa no processo dentro do tempo especificado;
- b) monitoramento do nível de diversidade da população ao longo das gerações: de acordo com este critério, o processo evolutivo deve ser finalizado assim que a diversidade cai abaixo de um determinado limiar. A principal desvantagem que este critério apresenta é o fato de que calcular a diversidade da população a cada geração pode ser extremamente custoso computacionalmente;
- c) monitoramento da qualidade das soluções candidatas ao longo das gerações: conforme este critério, o programa finaliza o processo evolutivo assim que se encontrar um indivíduo com valor de *fitness* acima de um determinado limiar; apresenta a desvantagem de que pode ser muito difícil definir este limiar de qualidade, principalmente quando não é conhecido o valor de *fitness* para a solução ótima;
- d) finalização do processo evolutivo após transcorrido um número predeterminado de gerações: em função de este critério ser predeterminado, é difícil definir *a priori* um número adequado de gerações.

5.10 Aplicações de Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos têm uma aplicabilidade praticamente infinita, eles podem ser considerados como uma ferramenta de solução sempre que existir uma necessidade de busca ou otimização (LINDEN, 2006).

Sua utilização está relacionada, de uma forma ou de outra, a uma análise multidimensional, onde se busca conseguir uma solução global. Geralmente o material genético é utilizado para codificar os valores dos vários parâmetros que definem o espaço de resultados admissíveis, procurando-se encontrar o valor desses parâmetros (cromossomos) que soluciona um determinado problema de otimização. São utilizados, entre outros em:

- Otimização de funções numéricas em geral.
- Otimização combinatória: problema do caixeiro viajante; problema de transporte, alocação; problemas de conexão (árvore, emparelhamento, caminhos).
- Otimização multiobjetivo.

6 AVALIAÇÃO DOS AEROGERADORES SELECIONADOS

6.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentados cenários para cada aerogerador selecionado com o intuito de permitir uma análise mais geral de cada um deles em diferentes velocidades de vento, observando, assim, a influência da velocidade do vento na viabilidade econômica dos projetos. Neste momento, o modelo matemático de programação linear inteira pura, proposto no Capítulo 4, não está sendo considerado.

Primeiramente, realizou-se uma análise econômica dos aerogeradores selecionados considerando-se a instalação isolada de cada modelo. Para a análise dos dados, utilizaram-se os Softwares Excel 2.0 e o Matlab 7.4 para a implementação do Algoritmo Genético.

Os custos de instalação do sistema eólico foram fornecidos pelos fabricantes dos mesmos. Os dados foram processados considerando-se diferentes velocidades de vento.

Serão mostrados 3 cenários para cada aerogerador selecionado, embora seja possível uma gama de cenários muito maior. O funcionamento do sistema foi considerado de maneira complementar à rede elétrica convencional existente.

As principais variáveis econômicas *VPL*, *TIRM* e *PRK* são apresentadas graficamente.

Dos aerogeradores selecionados, são fabricados, pela Empresa Enersud, o Gerar246 e o Verne550 com potências nominais de 1 kW e de 6 kW respectivamente; pela Empresa Eletrovento, o Turbo 500, o Turbo 2000 e o Turbo 5000, com potências de 0,5 kW, 2 kW e 5 kW respectivamente. As características principais desses aerogeradores são descritas na Tabela 6.1 (ENERSUD; ELETROVENTO, 2007)

Tabela 6.1 - Características Técnicas dos Aero geradores Gerar246, Verne550, Turbo 500, Turbo 2000 e Turbo 5000.

Características Técnicas	Aerogerador Gerar246	Aerogerador Verne550	Aerogerador Turbo 500	Aerogerador Turbo 2000	Aerogerador Turbo 5000
Potência nominal	1 kW	6 kW	0,5 kW	2 kW	5 kW
Número de pás	3	3	3	3	3
Início da rotação	2,2 m/s	2,2 m/s	-	-	-
Início da geração	3 m/s	3 m/s	3 m/s	3 m/s	3 m/s
Velocidade nominal	12 m/s	12 m/s	12 m/s	12 m/s	12 m/s
Altura da torre	12 m	12 m	12 m	12 m	12 m
Empresa fabricante	Enersud	Enersud	Eletrovento	Eletrovento	Eletrovento
Quantidade de baterias	4	10	2	6	10
Capacidade das baterias	175 Ah	175 Ah	150 Ah	150 Ah	150 Ah

Fonte: ENERSUD; ELETROVENTO (2007).

A Figura 6.1 mostra a curva de geração dos aerogeradores descritos na Tabela 6.1.

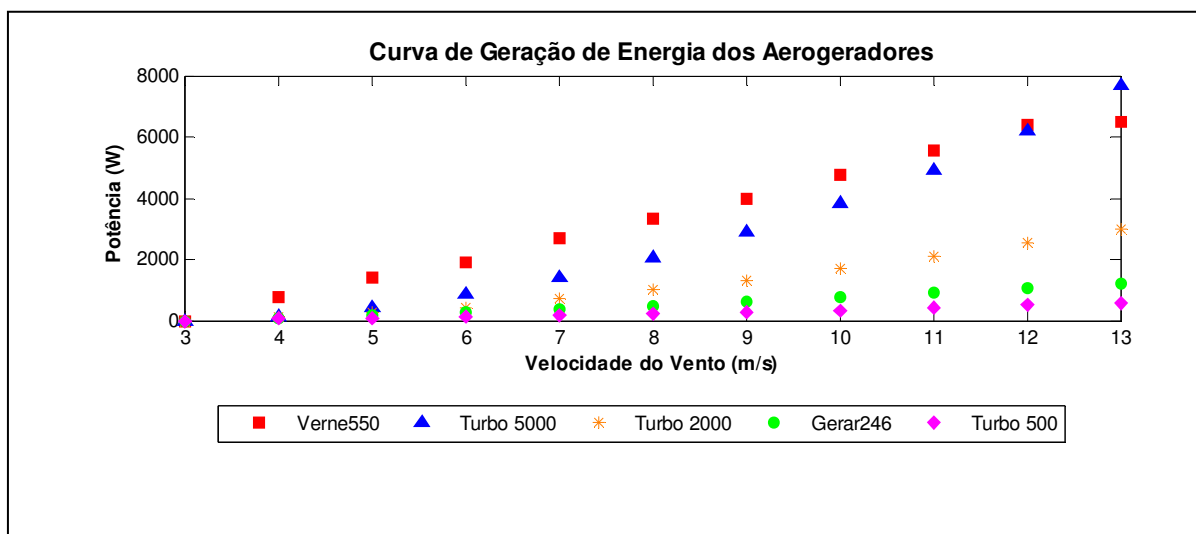


Figura 6.1: Curva de geração de energia dos Aerogeradores Gerar246, Verne550, Turbo 500, Turbo 2000 e Turbo 5000.

Fonte: ENERSUD; ELETROVENTO (2007).

As baterias consideradas neste estudo são da linha de baterias estacionárias, denominadas Baterias Moura Clean, da empresa Acumuladores Moura.

6.2 Critérios Considerados para o Cálculo dos Cenários

Para o cálculo dos cenários, levaram-se em consideração alguns critérios que serão descritos a seguir.

O cálculo de geração de energia anual foi realizado utilizando-se as curvas de potência dos equipamentos fornecidas pelos fabricantes, apresentadas na Figura 6.1. O investimento inicial é composto pelas despesas relativas à aquisição do gerador eólico e toda a infraestrutura necessária para sua instalação.

Para o cálculo da receita gerada pelo projeto, utilizou-se como referencial o valor de R\$ 0,24189 cobrado pela Concessionária Rio Grande Energia S. A. (RGE) pelo kWh de energia fornecida para uma propriedade rural, cuja classificação tarifária é B2- Rural/Trifásica em novembro de 2007 (RGE, 2007).

A vida útil dos equipamentos que compõem o sistema eólico considerada foi de 20 anos, com exceção das baterias que têm uma vida útil menor, conforme informações dos fabricantes.

A obtenção de financiamentos junto a entidades autorizadas pode tornar mais atrativos empreendimentos dessa natureza. Tendo em vista essa perspectiva, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (*BNDES*) oferece uma linha de crédito para o Programa de Apoio Financeiro a Investimentos Prioritários no Setor Elétrico. O referido programa tem por objetivo contribuir efetivamente para o estímulo à implantação, em curtíssimo prazo, dos projetos de expansão da capacidade instalada do sistema elétrico brasileiro.

Porém, como a utilização de aerogeradores no Brasil é recente, os equipamentos, tratados neste estudo, de fabricação nacional, não são cadastrados em nenhuma linha de crédito existente até o momento. Logo, considerou-se como taxa de juros para o financiamento a Taxa de Juros de Longo Prazo (*TJLP*) cujo valor médio, em 2007, foi de 6,5 % ao ano (MCT, 2008).

Como prazo para o pagamento do financiamento, foram considerados oito anos e um ano de carência. Estimou-se uma Taxa Mínima de Atratividade Financeira (k) de 12 % ao ano para o cálculo do *VPL* e da *TIRM*.

Os cenários gerados comparam paralelamente três casos para cada aerogerador selecionado: um caso mais crítico em que a vida útil das baterias foi considerada de 5 anos; outro, mais positivo, em que a vida útil das baterias foi considerada de 7 anos; logo, segundo o fornecedor das baterias, sua vida útil pode variar entre 4 e 7 anos; um terceiro cenário não considerou o uso de banco de baterias.

As despesas relativas à aquisição dos sistemas eólicos e toda a infra-estrutura necessária para seu funcionamento, à depreciação total e aos custos totais ao longo da vida útil do projeto são apresentadas de forma gráfica para comparação entre os cenários gerados.

Os resultados obtidos através das simulações estão organizados na forma de cenários, sendo que todos apresentam três cenários respectivos.

As Figuras 6.2, 6.6, 6.10, 6.14 e 6.18 mostram que, para os dois cenários que utilizam banco de baterias, o Investimento Inicial (*II*) é o mesmo, mudando apenas quando se exclui a utilização de banco de baterias e, em consequência, o *II* diminui.

Já a depreciação dos equipamentos foi considerada de 20 anos para ambos os cenários, com exceção das baterias que, no primeiro cenário, foram consideradas com uma vida útil menor, necessitando de maior número de trocas, logo aumentando o valor da Depreciação Total (*DT*), bem como dos Custos Totais (*CT*) envolvidos nos dois primeiros cenários.

Com o aumento da vida útil das baterias no segundo cenário, diminuem os valores da *DT* e dos *CT*. No terceiro cenário, não foi considerada a utilização de banco de baterias.

A seguir, serão mostrados os resultados obtidos.

6.3 Resultados obtidos com o Aerogerador Gerar246

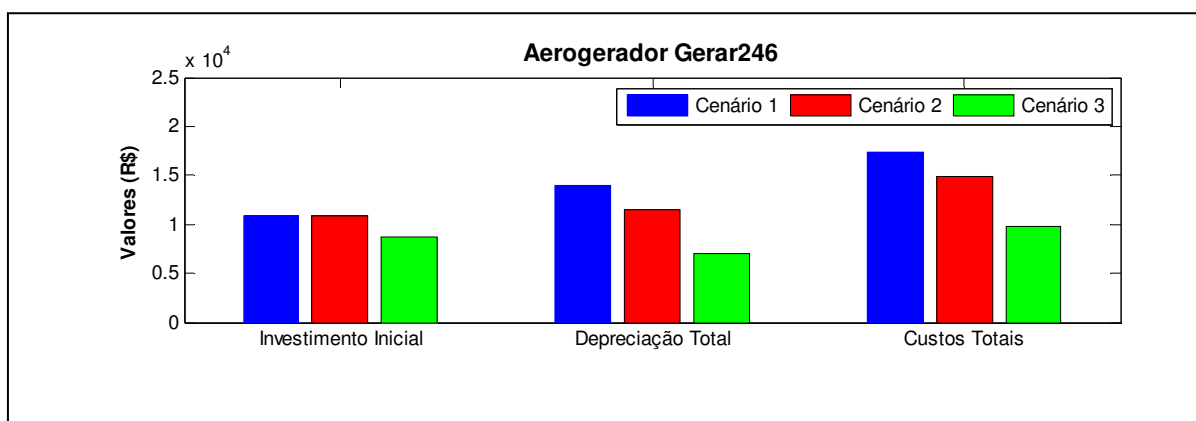


Figura 6.2: Descrição do Investimento Inicial (*II*), Depreciação Total (*DT*) e Custos Totais (*CT*).

Fonte: ENERSUD (2007).

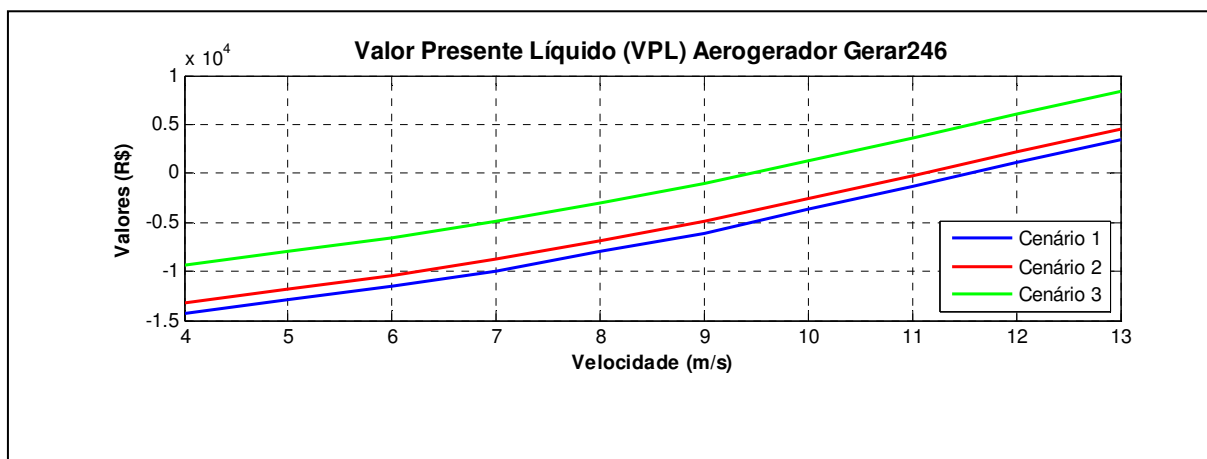


Figura 6.3: Valor Presente Líquido (*VPL*) Aerogerador Gerar246.

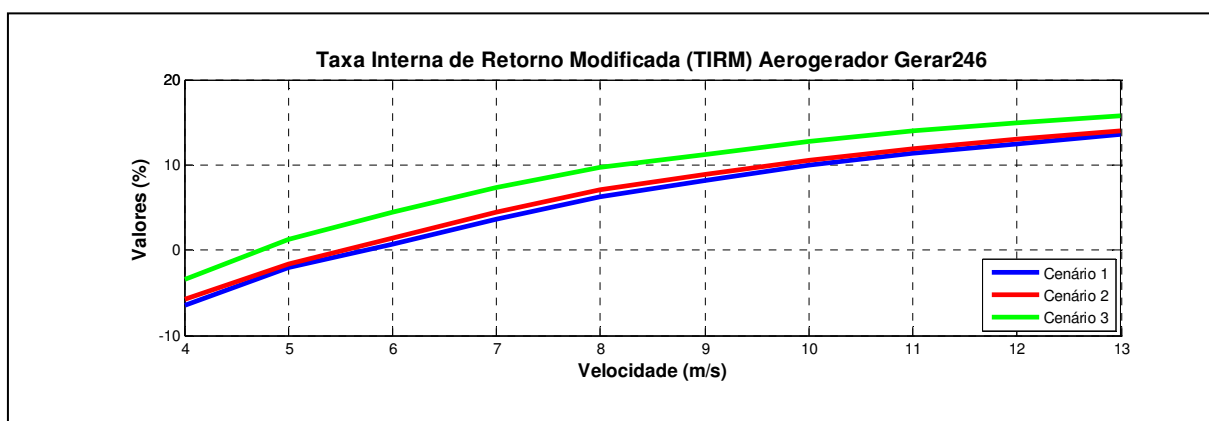


Figura 6.4: Taxa Interna de Retorno Modificada (*TIRM*) Aerogerador Gerar246.

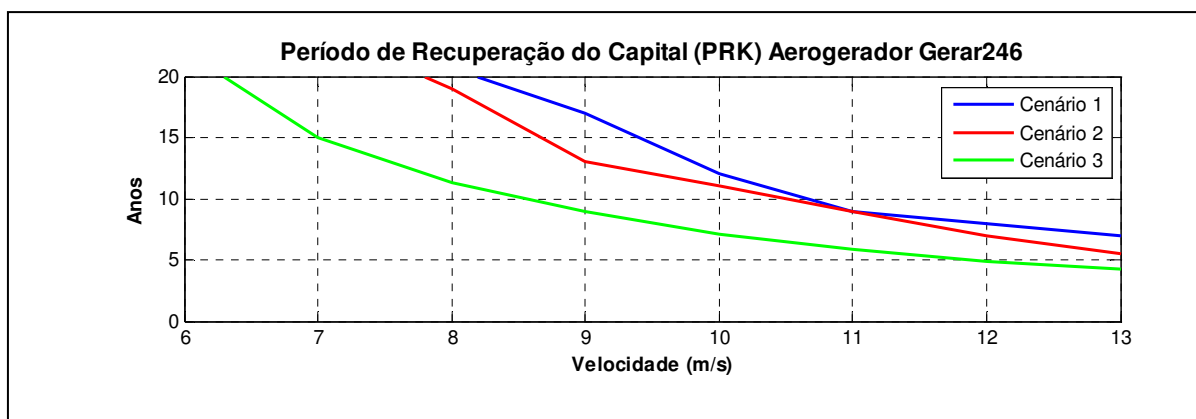


Figura 6.5: Período de Recuperação do Capital (*PRK*) Aerogerador Gerar246.

Um investimento pode ser considerado economicamente viável sempre que o *VPL* for positivo ($VPL > 0$), a *TIRM* for no mínimo igual a k ($TIRM \geq k$) e quando o *PRK* for menor que a vida útil do investimento (LAPPONI, 2000).

As Figuras 6.3, 6.4 e 6.5 mostram que o investimento não é viável economicamente para ventos com velocidade abaixo de 11,5 m/s para os cenários 1, 11 m/s para o cenário 2 e para ventos abaixo de 9,5 m/s no cenário 3. Isso pode ser verificado analisando o comportamento do *VPL* que se torna positivo somente a partir dessas velocidades de vento.

Pela Figura 6.4, tem-se que a *TIRM* torna-se positiva com velocidades de vento em torno de 5,5 m/s para os cenários 1 e 2 e 4,6 m/s para o cenário 3; isso evidencia um projeto cujo foco seja apenas a utilização do projeto, sem visar a lucros, para fins sociais de subsistência. No entanto, para a obtenção da Taxa Mínima de Atratividade Financeira (k), são

necessários ventos de velocidades mais elevadas, em torno de 10,5 m/s para os cenários 1 e 2 e 9 m/s para o cenário 3.

Na Figura 6.5, observa-se que, aumentando a velocidade do vento, diminui o período necessário para a recuperação do capital investido. Considerando a vida útil do projeto em 20 anos, os ventos necessários para o capital ser recuperado neste período são em torno de 8,2 m/s para o cenário 1, 7,8 m/s para o cenário 2 e 6,3 m/s para o cenário 3.

Fica claro que, no caso do Aerogerador Gerar246, o tempo para o capital ser recuperado em velocidades de vento mais baixas é bastante grande. Ou seja, para se tornar atrativo economicamente o investimento necessita de velocidades mais elevadas de vento para ser recuperado em menos tempo, o que pode ser um fator desestimulante, pois velocidades médias mais elevadas são mais difíceis de serem encontradas.

6.4 Resultados obtidos com o Aerogerador Verne550

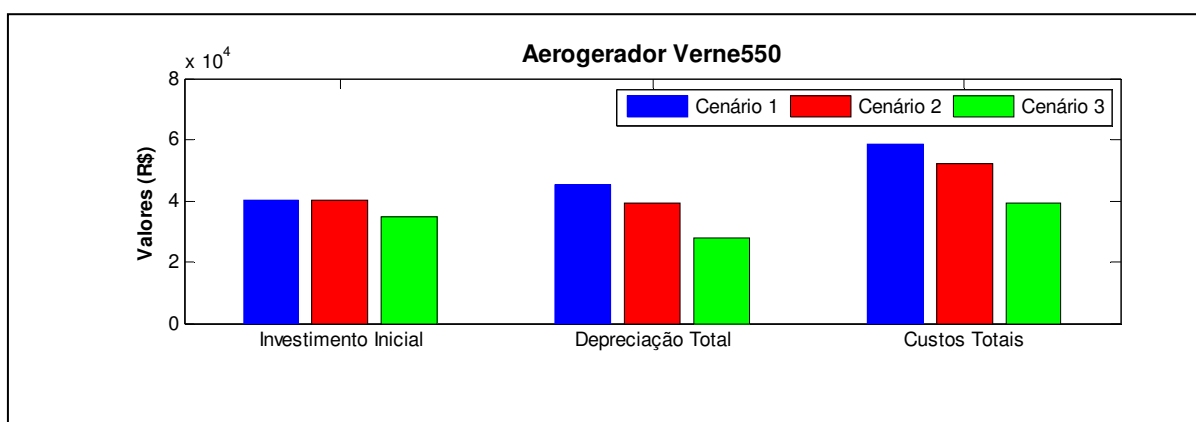


Figura 6.6: Descrição do Investimento Inicial (*II*), Depreciação Total (*DT*) e Custos Totais (*CT*).

Fonte: ENERSUD (2007).

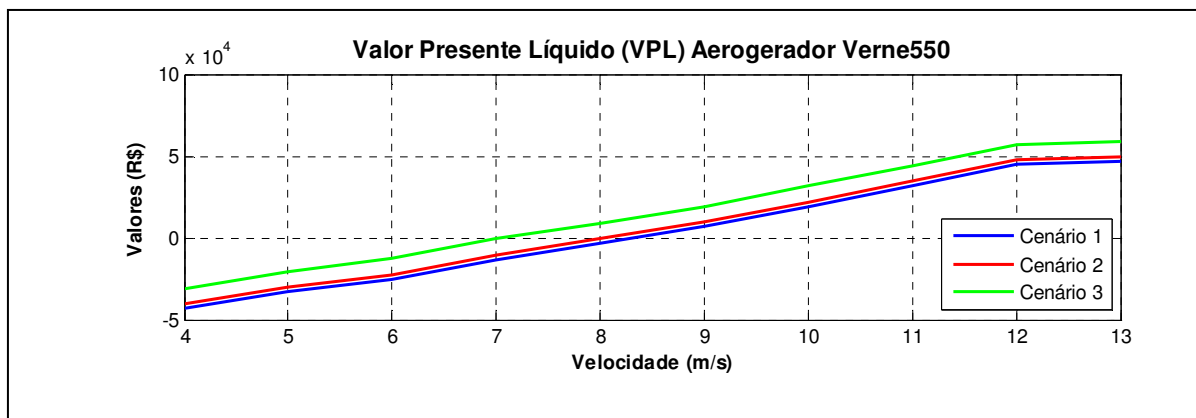


Figura 6.7: Valor Presente Líquido (VPL) Aerogerador Verne550.

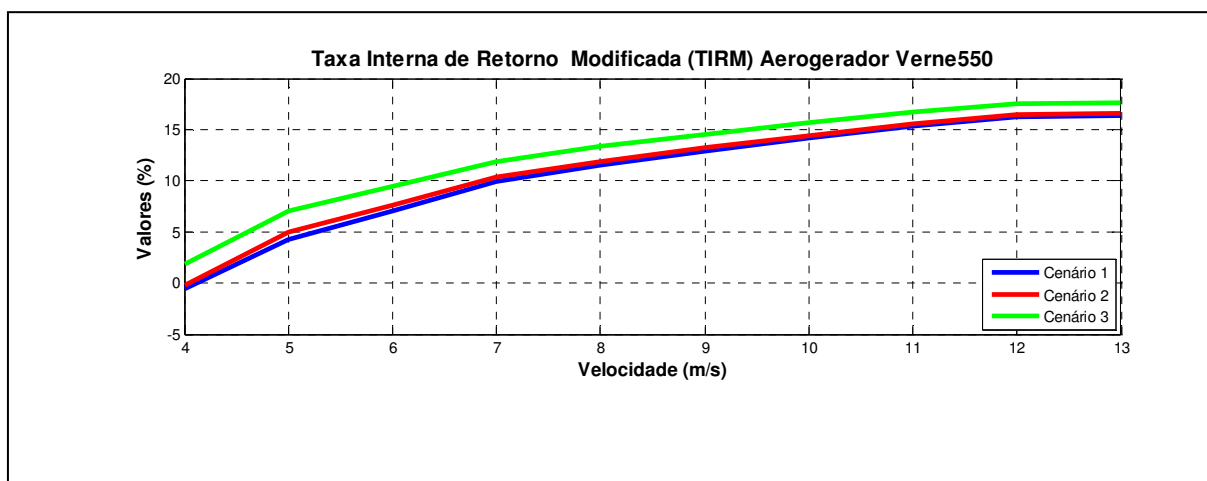


Figura 6.8: Taxa Interna de Retorno Modificada (TIRM) Aerogerador Verne550.

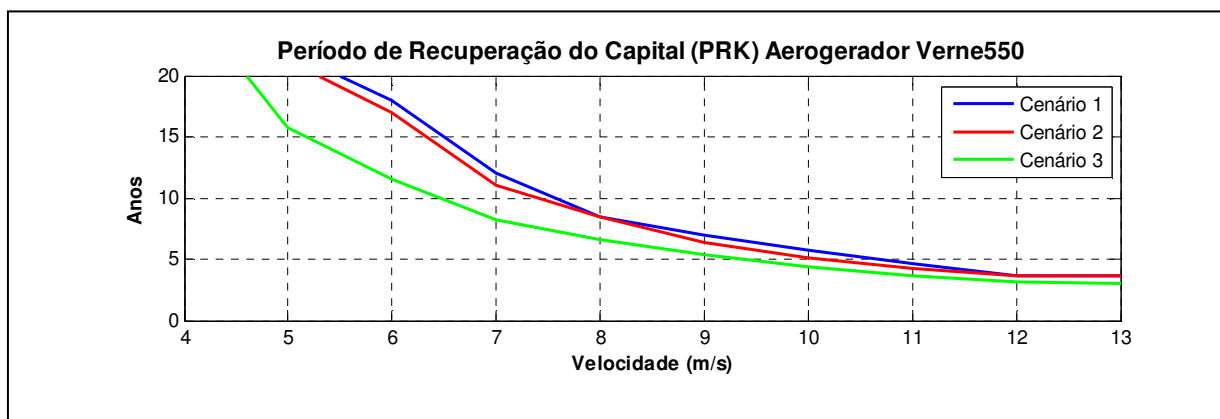


Figura 6.9: Período de Recuperação do Capital (PRK) Aerogerador Verne550.

Nesta situação, utilizando o Aerogerador Verne550, mais robusto em termos de capacidade de geração de energia, o Investimento Inicial é maior que nos cenários referentes ao Aerogerador Gerar246, descritos anteriormente, todavia a receita gerada pelo projeto também cresce significativamente.

Também em velocidades de vento menores, quando comparado aos cenários anteriores, em torno de 8 m/s para os cenários 1 e 2 e a partir de 7 m/s para o cenário 3, o *VPL* torna-se positivo, indicando um projeto passível de implantação do ponto de vista econômico.

Pela Figura 6.8, observa-se que a *TIRM* torna-se positiva com ventos relativamente baixos, em torno de 4 m/s para os cenários 1 e 2 e menos de 4 m/s no cenário 3, mas, desejando-se uma Taxa Mínima de Atratividade Financeira (k) de 12 % *a.a.*, observa-se a necessidade de ventos superiores a 8 m/s nos cenários 1 e 2 e 7 m/s no cenário 3.

O capital passa a ser recuperado com uma média de ventos anuais em torno de 5,5 m/s para os cenários 1 e 2 e 4,5 m/s para o cenário 3, sendo que, ao aumentar a velocidade do vento e, em consequência, a produção de energia, o capital passa a ser recuperado em menor tempo.

6.5 Resultados obtidos com o Aerogerador Turbo 500

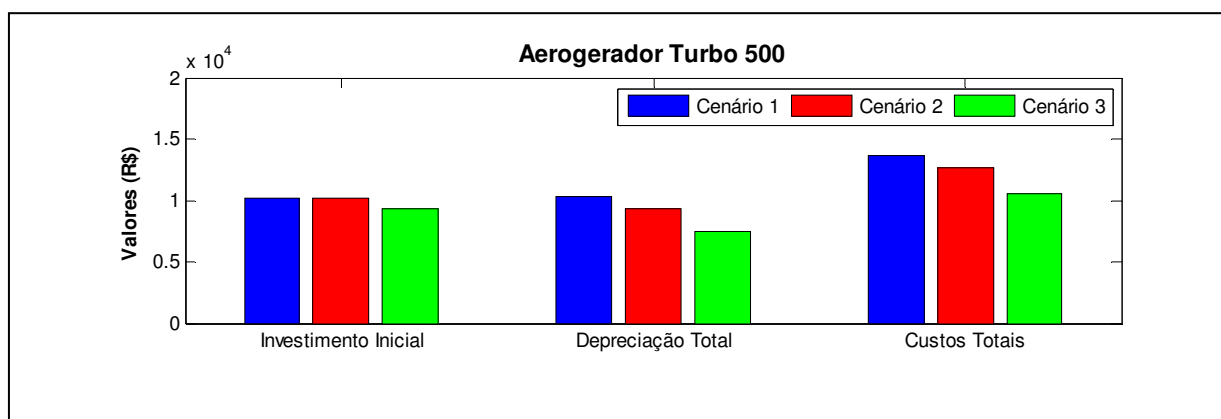


Figura 6.10: Descrição do Investimento Inicial (*II*), Depreciação Total (*DT*) e Custos Totais (*CT*).

Fonte: ELETROVENTO (2007).

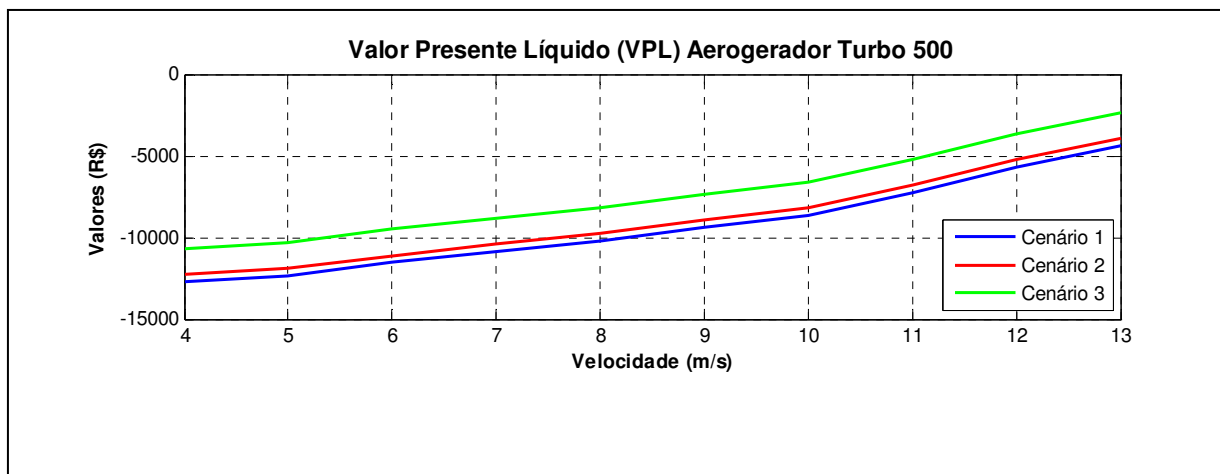


Figura 6.11: Valor Presente Líquido (VPL) Aerogerador Turbo 500.

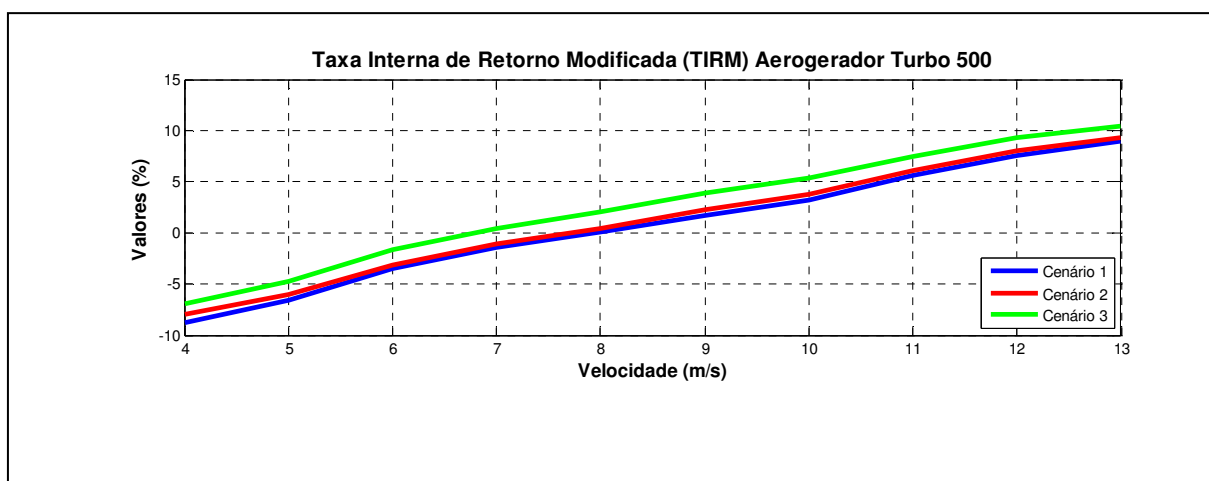


Figura 6.12: Taxa Interna de Retorno Modificada (TIRM) Aerogerador Turbo 500.

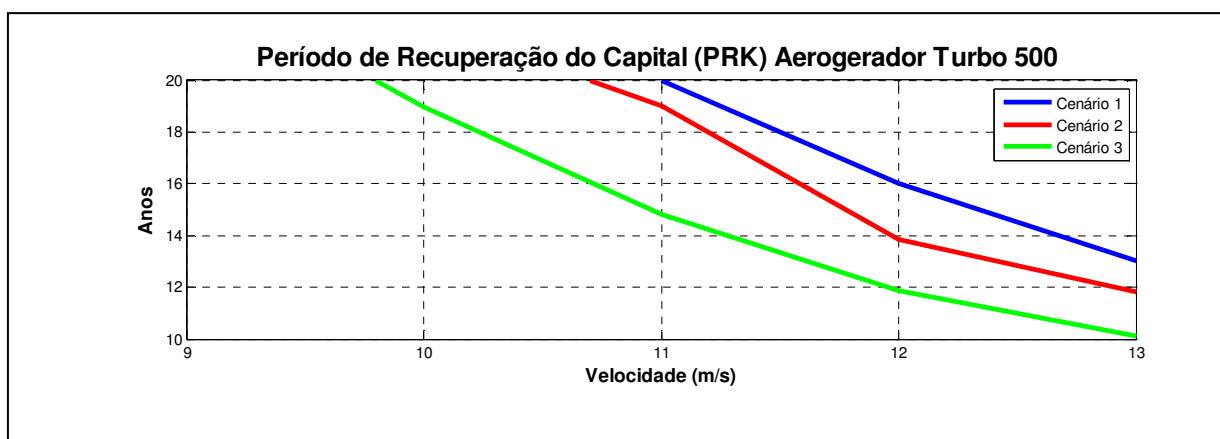


Figura 6.13: Período de Recuperação do Capital (PRK) Aerogerador Turbo 500.

As Figuras 6.11, 6.12 e 6.13 mostram um investimento inviável do ponto de vista econômico, pois o *VPL* não se torna positivo nem com a operação da capacidade máxima de geração de energia pela máquina. Isso pode ser verificado analisando o comportamento do *VPL* na Figura 6.11.

Também a *TIRM* não alcança a Taxa Mínima de Atratividade Financeira (k) em nenhuma condição de ventos.

Na Figura 6.13, observa-se que são necessárias velocidades de vento muito elevadas para a recuperação do capital investido. Considerando a vida útil do projeto em 20 anos, os ventos necessários para o capital ser recuperado neste período são em torno de 11,1 m/s para o cenário 1, 10,7 m/s para o cenário 2 e 9,8 m/s para o cenário 3.

No caso do Aerogerador Turbo 500, ao analisar-se as variáveis descritas *VPL*, *TIRM* e *PRK* conjuntamente, fica evidente que o investimento é inviável economicamente.

6.6 Resultados obtidos com o Aerogerador Turbo 2000

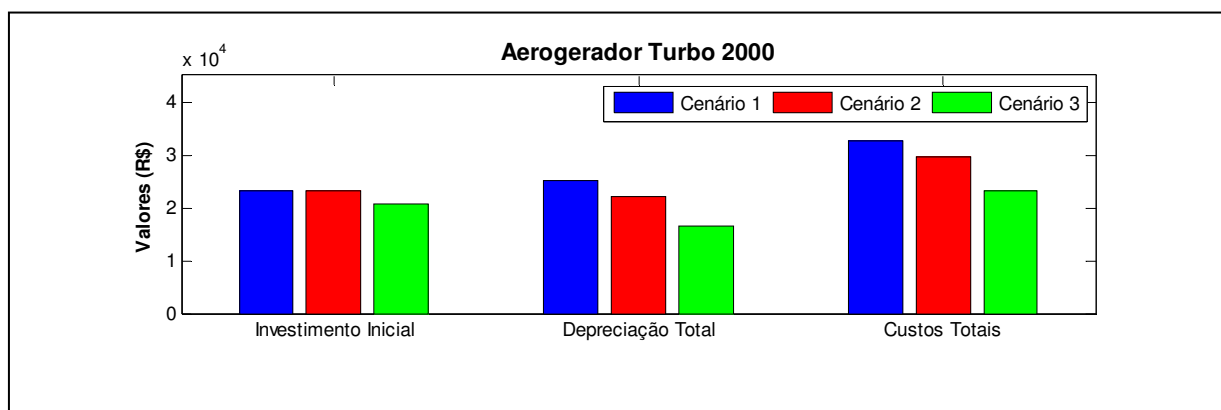


Figura 6.14: Descrição do Investimento Inicial (*II*), Depreciação Total (*DT*) e Custos Totais (*CT*).

Fonte: ELETROVENTO (2007).

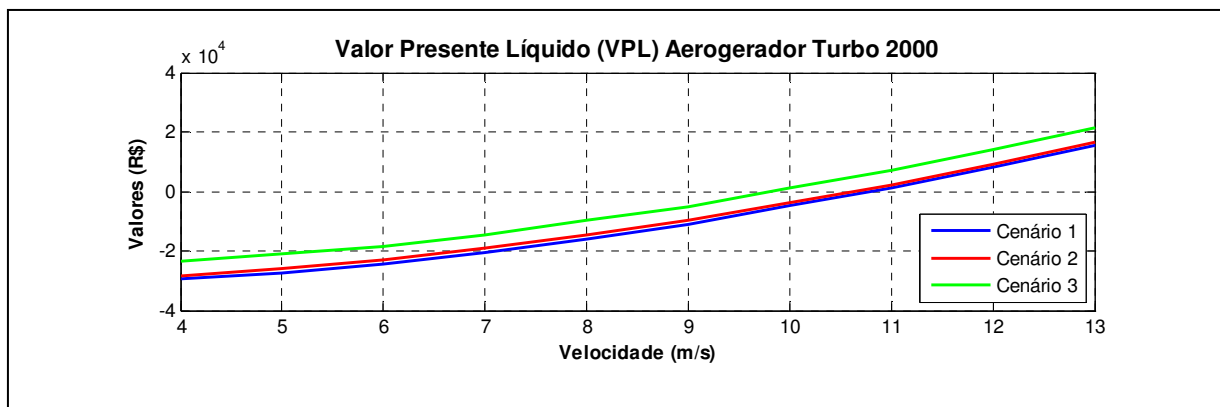


Figura 6.15: Valor Presente Líquido (*VPL*) Aerogerador Turbo 2000.

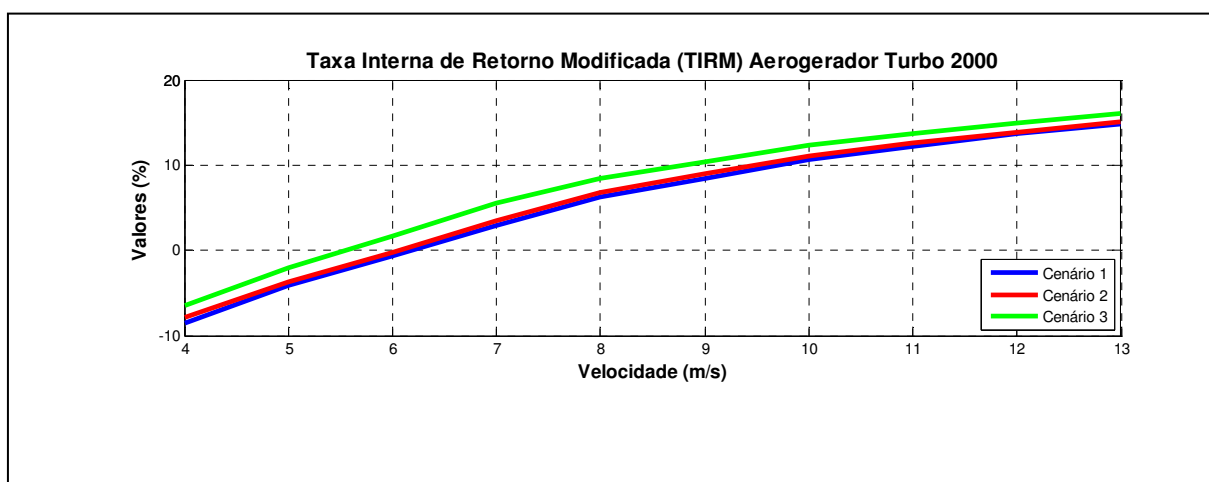


Figura 6.16: Taxa Interna de Retorno Modificada (*TIRM*) Aerogerador Turbo 2000.

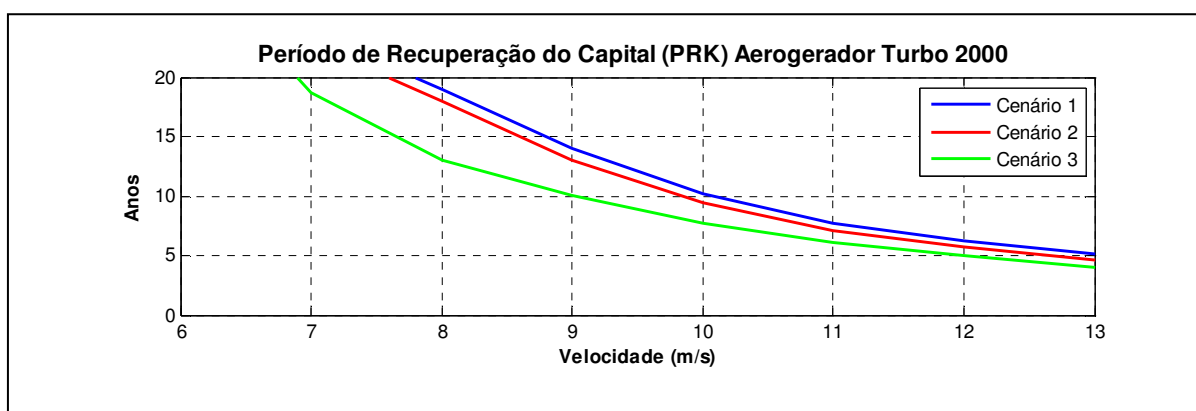


Figura 6.17: Período de Recuperação do Capital (*PRK*) Aerogerador Turbo 2000.

Os cenários gerados utilizando o Aerogerador Turbo 2000 evidenciam a necessidade de ventos elevados para que o *VPL* se torne positivo, em torno de 10,7 m/s para os cenários 1 e 2 e 9,8 m/s para o cenário 3, como pode ser observado na Figura 6.15.

Também, a Taxa Mínima de Atratividade Financeira (k) é obtida com ventos em torno de 10,2 m/s nos cenários 1 e 2 e 9,2 m/s no cenário 3.

O *PRK* é em torno de 20 anos para ventos médios de 7,8 m/s para o cenário 1, 7,6 m/s para o cenário 2 e 6,9 m/s para o cenário 3.

6.7 Resultados obtidos com o Aerogerador Turbo 5000

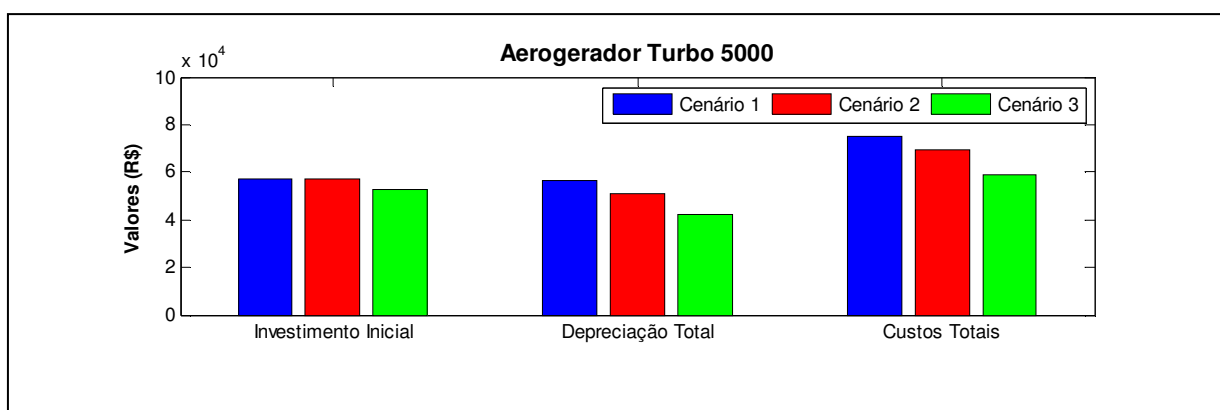


Figura 6.18: Descrição do Investimento Inicial (II), Depreciação Total (DT) e Custos Totais (CT).

Fonte: ELETROVENTO (2007).

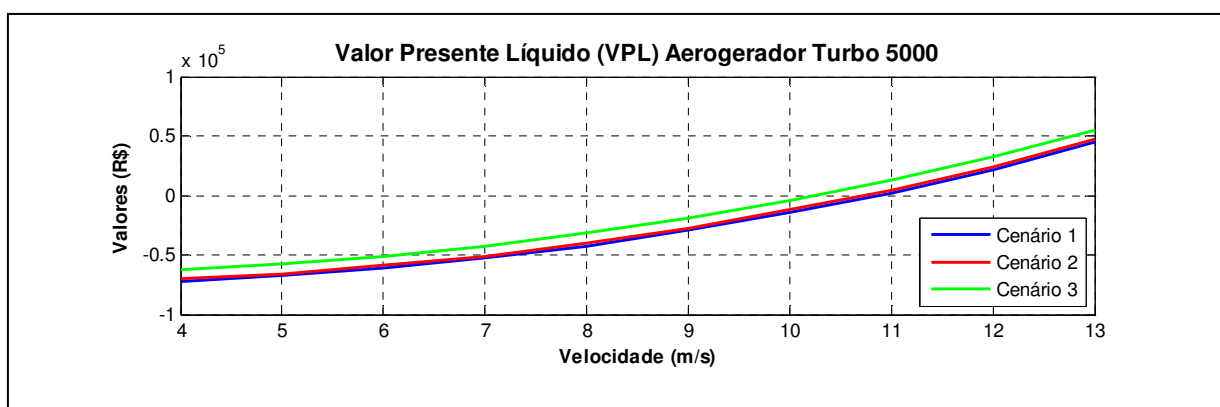


Figura 6.19: Valor Presente Líquido (*VPL*) Aerogerador Turbo 5000.

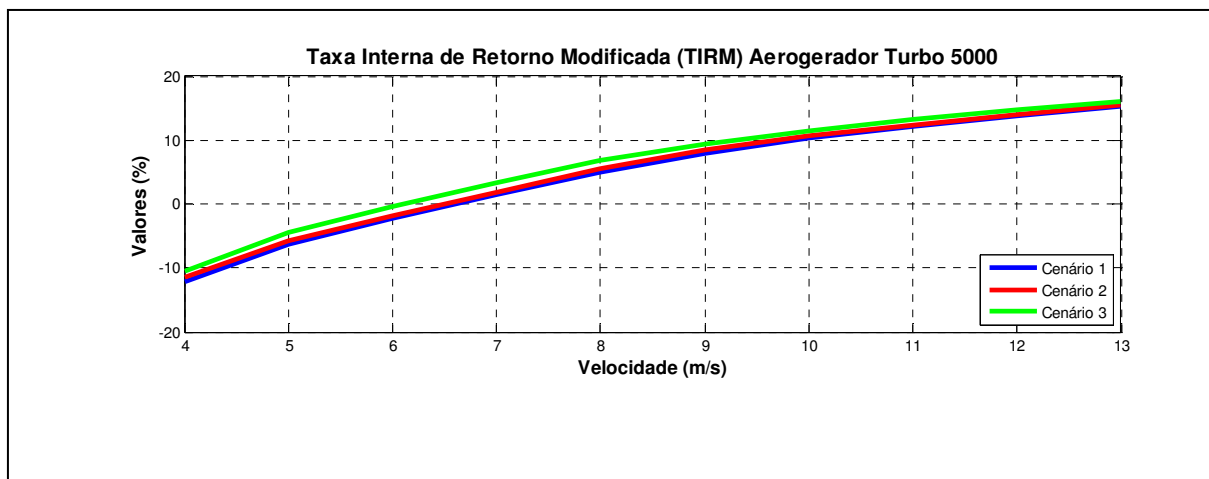


Figura 6.20: Taxa Interna de Retorno Modificada (*TIRM*) Aerogerador Turbo 5000.

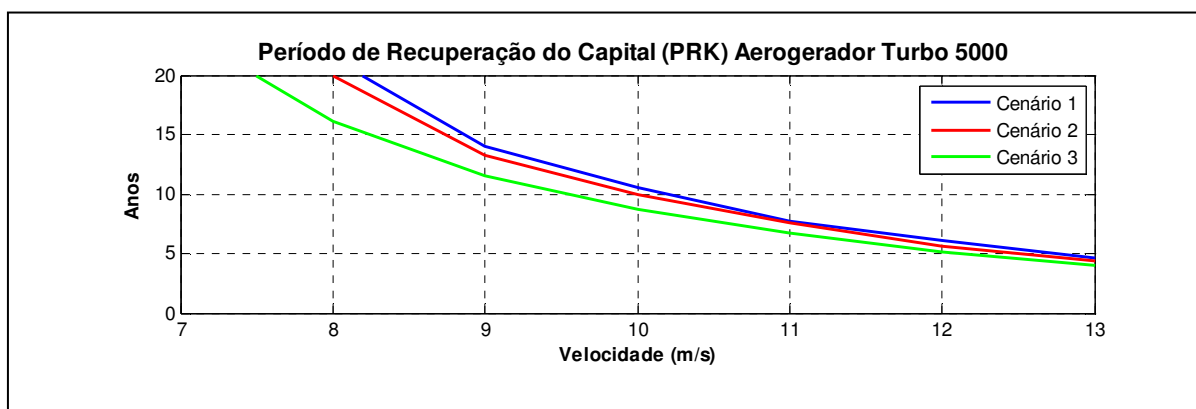


Figura 6.21: Período de Recuperação do Capital (*PRK*) Aerogerador Turbo 5000.

Analisando as variáveis referentes ao Aerogerador Turbo 5000, percebe-se que, com ventos em torno de 10,7 m/s, o *VPL* se torna positivo nos cenários 1 e 2; já no cenário 3, isso acontece com ventos em torno de 10,2 m/s.

Na Figura 6.20, observa-se que a *TIRM* torna-se positiva com ventos relativamente em torno de 6,5 m/s para os cenários 1 e 2 e 6 m/s para o cenário 3, mas, considerando a Taxa Mínima de Atratividade Financeira (k) de 12 % *a.a.*, observa-se a necessidade de ventos mais elevados, em torno de 10,5 m/s, para os cenários 1 e 2 e 10 m/s para o cenário 3.

O capital passa a ser recuperado com uma média de ventos anuais em torno de 8,2 m/s no cenário 1, 8 m/s no cenário 2 e 7,5 m/s no cenário 3.

Dessa forma, conclui-se, através da análise isolada dos equipamentos selecionados, que, em relação ao equipamento Gerar246, se necessita de velocidades de vento mais elevadas

para o capital ser recuperado em menor tempo, fato também observado para obtenção do VPL positivo.

Já o Aerogerador Verne550 apresenta resultados mais positivos, já que se percebe que, embora o investimento inicial em equipamentos seja maior, a receita gerada também é maior, refletindo-se isso nas variáveis analisadas, pois, com velocidades de vento menores, o VPL se torna positivo, a *TIRM* é obtida e o capital investido é recuperado.

Os resultados obtidos para as variáveis analisadas *VPL*, *TIRM* e *PRK* para o Aerogerador Turbo 500 refletem um investimento inviável do ponto de vista econômico. Também, os Aerogeradores Turbo 2000 e Turbo 5000 apresentaram resultados bastante insatisfatórios para velocidades de vento mais baixas, necessitando do aumento da velocidade do vento para viabilizar sua utilização do ponto de vista econômico.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO DO MODELO MATEMÁTICO NA GERAÇÃO DE CENÁRIOS

7.1 Introdução

Neste capítulo, será abordado um dos focos deste trabalho, a geração de cenários de acordo com o modelo matemático proposto visando ao estudo da viabilidade econômica da utilização dos aerogeradores selecionados para produção de energia elétrica.

Para tal abordagem, é importante reforçar alguns pontos. São analisados cinco modelos de aerogeradores de produção nacional, cujas informações foram fornecidas pelas empresas fabricantes dos mesmos, ou seja, Enersud e Eletrovento. As baterias analisadas são fabricadas pela empresa Acumuladores Moura. Os cenários gerados levaram em consideração diferentes aspectos relacionados à vida útil das baterias, velocidades de vento, valores cobrados pela energia, taxas de financiamento, entre outros.

Descrevem-se os resultados que referenciam a contextualização do modelo matemático na otimização de um sistema de produção de energia elétrica a partir de fonte eólica. Através do levantamento de dados, propõe-se mostrar a aplicabilidade do modelo matemático por meio de simulações numéricas. A análise dos diferentes cenários propicia o conhecimento de quais aerogeradores proporcionam maior retorno financeiro.

Para o desenvolvimento do *AG*, já descrito no Capítulo 5, utilizado como ferramenta para a resolução do modelo matemático proposto no Capítulo 4, foi utilizado o Software Matlab 7.4. Esta escolha foi feita em função da facilidade no manuseio de vetores e matrizes por este aplicativo, da qualidade de sua saída gráfica e da possibilidade de programação pelo usuário. Os resultados obtidos foram validados (comparados) através do Software Excel 2.0.

7.2 Apresentação e Análise dos Cenários Construídos

Os cenários foram gerados considerando-se alguns critérios, já descritos no Capítulo 4 e aqui retomados: potência desejada (P_{des}), valor de mercado da energia produzida (P_C), taxa de juros (TJ), Taxa Mínima de Atratividade Financeira requerida (k), vida útil do projeto (VUP), vida útil das baterias (VUb), número de trocas de baterias necessárias ao longo da vida útil do projeto (nt).

O prazo para o pagamento do financiamento considerado em todos os cenários foi de 8 anos, com um ano de carência, e a vida útil do projeto considerada foi de 20 anos.

7.2.1 Primeira situação

Na primeira situação, são considerados cenários gerados conforme os seguintes aspectos: $P_{des} = 8000 \text{ W}$, $Vento = 6 \text{ m/s}$, $P_C = R\$ 0,24189$, $TJ = 6,5 \text{ \% a.a.}$, $k = 12 \text{ \% a.a.}$, $VUb = 5 \text{ anos}$, $nt = 3$.

Os cenários gerados comparam paralelamente a escolha feita pelo programa, levando em consideração o modelo matemático proposto e já descrito no Capítulo 4, e diferentes escolhas aleatórias.

Busca-se mostrar, por meio desses cenários, que o melhor cenário corresponde à alternativa gerada pelo programa de acordo com a otimização feita. Os valores descritos entre parênteses referem-se a valores negativos.

Tabela 7.1 – Cenários gerados comparando a escolha otimizada pelo programa e diferentes alternativas supostas.

Cenário	1	2	3	4
Alternativa	Otimizada pelo programa	Suposta	Suposta	Suposta

Aerogeradores	1 Verne550 e 2 Gerar246	1 Verne550 e 1 Turbo 2000	2 Verne550	1 Turbo 5000, 1 Turbo 2000 e 1 Gerar246
Investimento Inicial em Equipamentos	R\$ 52.300,00	R\$ 55.480,00	R\$ 69.760,00	R\$ 81.810,00
Investimento Inicial em Baterias	R\$ 9.738,72	R\$ 8.094,68	R\$ 10.820,80	R\$ 9.322,24
Investimento Total em trocas de Baterias	R\$ 29.216,16	R\$ 24.284,04	R\$ 32.462,40	R\$ 27.966,72
Depreciação Total	R\$ 73.003,90	R\$ 70.286,98	R\$ 90.434,56	R\$ 95.279,17
Receita Total	R\$ 101.889,30	R\$ 98.386,57	R\$ 159.990,39	R\$ 64.650,83
Custos Totais	R\$ 93.166,49	R\$ 90.948,75	R\$ 116.623,32	R\$ 124.897,15
Receita Líquida	R\$ 8.722,81	R\$ 7.437,83	R\$ 43.367,07	R\$ (60.246,31)
Fluxo de Caixa	R\$ (9.528,17)	R\$ (10.133,91)	R\$ 20.758,43	R\$ (84.066,11)
Valor Presente Líquido	R\$ (48.469,59)	R\$ (49.898,82)	R\$ (50.669,74)	R\$ (97.609,63)
Taxa Interna de Retorno Modificada	5,29 %	4,89 %	7,06 %	0 %
Período de Recuperação do Capital	O capital não é recuperado	O capital não é recuperado	18 anos	O capital não é recuperado
Fluxo Líquido de Caixa	R\$ (9.528,38)	R\$ (10.134,13)	R\$ 20.758,00	R\$ (84.066,22)

Observando a Tabela 7.1, constata-se que a melhor opção é a fornecida pelo programa, pois nela o *VPL*, mesmo sendo negativo, é máximo. As variações sofridas nas outras variáveis são fruto das diferentes alternativas propostas; nestas, porém, verifica-se um *VPL* menor.

7.2.2 Segunda situação

O vento é fator decisivo na viabilidade econômica de projetos eólicos. Ao variar as velocidades de vento, percebe-se que, quanto maiores elas forem, mais energia será gerada e, em consequência, maior será a receita gerada pelo projeto. É claro, sempre levando em consideração os limites operacionais da máquina.

Logo, nesta situação, variou-se a velocidade do vento e, com isso, observou-se a variação obtida, também, nos indicadores econômicos envolvidos na análise. Os critérios utilizados foram: $P_{des} = 7000 \text{ W}$, $Ventos = 4, 6, 8 \text{ e } 12 \text{ m/s}$, $P_C = R\$ 0,24189$, $TJ = 6,5 \% \text{ a.a.}$, $k = 12 \% \text{ a.a.}$, $VUb = 5 \text{ anos}$, $nt = 3$.

Tabela 7.2 – Cenários gerados considerando diferentes velocidades de vento.

Cenário	1	2	3	4
Alternativa	Vento: 4 m/s	Vento: 6 m/s	Vento: 8 m/s	Vento: 12 m/s
Aerogeradores	1 Verne550 e 1 Gerar246	1 Verne550 e 1 Gerar246	2 Verne550	2 Verne550
Investimento Inicial em Equipamentos	R\$ 43.590,00	R\$ 43.590,00	R\$ 69.760,00	R\$ 69.760,00
Investimento Inicial em Baterias	R\$ 7.574,56	R\$ 7.574,56	R\$ 10.820,80	R\$ 10.820,80
Investimento Total em trocas de Baterias	R\$ 22.723,68	R\$ 22.723,68	R\$ 32.462,40	R\$ 32.462,40
Depreciação Total	R\$ 59.110,59	R\$ 59.110,59	R\$ 90.434,56	R\$ 90.434,56
Receita Total	R\$ 35.831,05	R\$ 90.942,24	R\$ 278.525,28	R\$ 535.394,44
Custos Totais	R\$ 75.739,07	R\$ 75.739,07	R\$ 116.623,32	R\$ 116.623,32
Receita Líquida	R\$ (39.908,02)	R\$ 15.203,17	R\$ 161.901,96	R\$ 418.771,12
Fluxo de Caixa	R\$ (54.685,67)	R\$ 425,52	R\$ 139.293,32	R\$ 396.162,48
Valor Presente Líquido	R\$ (57.484,73)	R\$ (36.902,23)	R\$ (6.400,25)	R\$ 89.533,23

Taxa Interna de Retorno	de 0 %	6,04 %	11,54 %	16,26 %
Modificada				
Período de Recuperação do Capital	O capital não é recuperado	20 anos	9 anos	4 anos
Fluxo Líquido de Caixa	R\$ (54.685,71)	R\$ 425,52	R\$ 139.292,96	R\$ 396.162,02

Analisando a Tabela 7.2, confirma-se o já dito ao longo deste trabalho: o vento é fator decisivo na viabilidade de projetos eólicos, o que é lógico, pois ele é o combustível para geração de energia nestes investimentos. Os cenários gerados com ventos baixos, médios e elevados evidenciam que, aumentando a velocidade do vento, aumenta a *RL*, bem como o *FC* e o *VPL*, e, também, a *TIRM* e o *FLC*. Percebe-se ainda um decréscimo de tempo necessário para o capital ser recuperado.

De acordo com os critérios descritos para gerar os cenários, a escolha de aerogeradores sofre alterações com ventos mais baixos (4 e 6 m/s); a escolha feita pelo programa é um Aerogerador Gerar246 e um Aerogerador Verne550. Já aumentando-se a velocidade do vento (8 e 12 m/s), percebe-se que a escolha feita se altera; neste caso, são escolhidos dois Aerogeradores do tipo Verne550.

7.2.3 Terceira situação

O banco de baterias é utilizado, em sistemas eólicos para produção de energia elétrica, para armazenar a energia produzida pelo sistema e que não está sendo consumida instantaneamente. Porém, o valor das mesmas acresce significativa alteração na viabilidade econômica da utilização de energia elétrica proveniente do vento, por serem componentes que se desgastam com relativa rapidez, necessitando de trocas ao longo da vida útil do projeto.

Em função disso, geraram-se cenários que comparam o impacto causado pela utilização e não utilização de banco de baterias. Os critérios considerados foram:

$P_{des} = 4000 \text{ W}$, $V_{entos} = 5 \text{ m/s}$, $P_c = R\$ 0,24189$, $TJ = 6,5 \% \text{ a.a.}$, $k = 12 \% \text{ a.a.}$,
 $VUb = 5 \text{ anos}$, $nt = 3$.

Tabela 7.3 – Cenários gerados considerando a utilização e a não utilização de banco de baterias.

Cenário	1	2
Alternativa	Com banco de baterias	Sem banco de baterias
Aerogeradores	1 Verne550	1 Verne550
Investimento Inicial em Equipamentos	R\$ 34.880,00	R\$ 34.880,00
Investimento Inicial em Baterias	R\$ 5.410,40	-
Investimento Total em trocas de Baterias	R\$ 16.231,20	-
Depreciação Total	R\$ 45.217,28	R\$ 27.904,00
Receita Total	R\$ 58.928,69	R\$ 58.928,69
Custos Totais	R\$ 58.311,66	R\$ 39.240,00
Receita Líquida	R\$ 617,03	R\$ 19.688,69
Fluxo de Caixa	R\$ (10.687,29)	R\$ 12.712,69
Valor Presente Líquido	R\$ (33.202,62)	R\$ (20.767,07)
Taxa Interna de Retorno	4,32 %	7,04 %
Modificada		
Período de Recuperação do Capital	O capital não é recuperado	16 anos
Fluxo Líquido de Caixa	R\$ (10.687,49)	R\$ 12.712,49

Nesta situação, verifica-se que as baterias são fator importante na viabilidade do projeto, pois sua não utilização reduz os gastos de Investimento Inicial (*II*) e de manutenção com as trocas. Percebe-se que, ao não se utilizar esses elementos, os *CT* diminuem aumentando a *RL*, bem como o *FC*, o *VPL*, a *TIRM* e o *FLC*.

Também, no segundo cenário, percebe-se que o investimento já é recuperado durante a vida útil do projeto. Porém é importante salientar que a não utilização de baterias implica que

a energia gerada esteja sendo consumida instantaneamente, caso contrário ela será perdida, pois não tem onde ser armazenada.

7.2.4 Quarta situação

Como já citado anteriormente, as baterias são elementos que oneram o valor do sistema eólico; geraram-se, pois, dois novos cenários onde é analisada a influência sofrida na viabilidade do projeto considerando-se diferentes tempos de vida útil das baterias.

No cenário 1, as baterias foram analisadas com uma vida útil de 5 anos e, no cenário 2, com vida útil de 7 anos. Quanto maior a vida útil das baterias, menos substituições desses elementos precisam ser feitas, logo diminuindo os gastos de manutenção.

Os critérios considerados foram: $P_{des} = 2000 \text{ W}$, $V_{entos} = 5 \text{ m/s}$, $P_C = R\$ 0,24189$, $TJ = 6,5 \%$ a.a., $k = 12 \%$ a.a., $VUb = 5$ e 7 anos, $nt = 3$ e 2 , respectivamente.

Tabela 7.4 – Cenários gerados considerando diferentes tempos de vida útil das baterias.

Cenário	1	2
Alternativa	Vida útil das baterias: 5 anos	Vida útil das baterias: 7 anos
Aerogeradores	2 Gerar246	2 Gerar246
Investimento Inicial em Equipamentos	R\$ 17.420,00	R\$ 17.420,00
Investimento Inicial em Baterias	R\$ 4.328,32	R\$ 4.328,32
Investimento Total em trocas de Baterias	R\$ 6.492,48	R\$ 4.328,32
Depreciação Total	R\$ 27.786,62	R\$ 22.839,97
Receita Total	R\$ 14.596,07	R\$ 14.596,07
Custos Totais	R\$ 34.854,83	R\$ 29.908,18

Receita Líquida	R\$ (20.258,76)	R\$ (15.312,11)
Fluxo de Caixa	R\$ (27.205,41)	R\$ (22.877,09)
Valor Presente Líquido	R\$ (25.860,33)	R\$ (23.674,14)
Taxa Interna de Retorno	0 %	0 %
Modificada		
Período de Recuperação do Capital	O capital não é recuperado	O capital não é recuperado
Fluxo Líquido de Caixa	R\$ (27.205,41)	R\$ (23.079,04)

O fato de aumentar a vida útil das baterias implica reduzir o número de trocas das mesmas durante a vida útil do projeto. Sendo assim, analisando a Tabela 7.4, verifica-se que os *CT* diminuem e a *RL* aumenta, fato também observado no *FC*, no *VPL* e no *FLC*.

O projeto em ambos os cenários não é recuperado durante sua vida útil.

7.2.5 Quinta situação

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - tem a função de estabelecer as tarifas cobradas pelas concessionárias de distribuição, assegurando ao consumidor o pagamento de uma tarifa justa e também garantindo que seja oferecido um serviço com qualidade, confiabilidade e continuidade necessárias.

Os consumidores de energia elétrica pagam um valor correspondente à quantidade de energia elétrica consumida, estabelecida em kWh (quilowatt-hora) multiplicada por um valor unitário, denominado tarifa, medida em R\$/kWh (reais por quilowatt-hora), correspondente ao preço de um quilowatt consumido em uma hora.

Tais tarifas são diferenciadas de acordo com a classificação da unidade recebedora de energia, estabelecida pela agência reguladora, logo interferindo no valor do kWh fornecido.

Os cenários gerados neste momento comparam a influência na viabilidade econômica do projeto, utilizando o valor da energia elétrica fornecida para uma propriedade rural, cuja classificação tarifária é B2-Rural-Trifásica, e para uma residência urbana, classificada como B1-Residencial-Normal-Monofásica. Ambos os valores foram cobrados no mês de novembro de 2007 (RGE, 2007). Também são considerados dois outros valores a fim de se perceber, a

partir de que valor para a tarifa de energia, o capital é recuperado dentro da vida útil do projeto e também quando o *VPL* se torna positivo.

Os critérios considerados foram: $P_{des} = 3000 \text{ W}$, $Ventos = 4 \text{ m/s}$, $P_c = R\$ 0,24189$ para zona rural, $P_c = R\$ 0,472158$ para zona urbana, $P_c = 0,49$ e $P_c = 1,06$, $TJ = 6,5 \% \text{ a.a.}$, $k = 12 \% \text{ a.a.}$, $VUb = 7 \text{ anos}$ e $nt = 2$. Nessa situação, objetivou-se constatar a influência na viabilidade econômica do projeto que tal diferença no valor da tarifa cobrada causaria.

Tabela 7.5 – Cenários gerados considerando diferentes valores cobrados pelo kWh de energia fornecida.

Cenário	1	2	3	4
Alternativa	Valor da	Valor da	Valor da	Valor da
	energia:	energia:	energia:	energia:
	R\$ 0,24189	R\$ 0,472158	R\$ 0,49	R\$ 1,06
Aerogeradores	3 Gerar246	1 Verne550	1 Verne550	1 Verne550
Investimento Inicial em Equipamentos	R\$ 26.130,00	R\$ 34.880,00	R\$ 34.880,00	R\$ 34.880,00
Investimento Inicial em Baterias	R\$ 6.492,48	R\$ 5.410,40	R\$ 5.410,40	R\$ 5.410,40
Investimento Total em trocas de Baterias	R\$ 12.984,96	R\$ 10.820,80	R\$ 10.820,80	R\$ 10.820,80
Depreciação Total	R\$ 34.259,96	R\$ 39.033,96	R\$ 39.033,96	R\$ 39.033,96
Receita Total	R\$ 10.947,05	R\$ 62.817,84	R\$ 65.191,61	R\$ 141.026,75
Custos Totais	R\$ 44.862,26	R\$ 52.128,34	R\$ 52.128,34	R\$ 52.128,34
Receita Líquida	R\$ (33.915,21)	R\$ 10.689,49	R\$ 13.063,27	R\$ 88.898,41
Fluxo de Caixa	R\$ (45.262,69)	R\$ (1.387,74)	R\$ 986,03	R\$ 76.821,17
Valor Presente Líquido	R\$ (39.599,63)	R\$ (29.017,38)	R\$ (28.130,85)	R\$ 191,47
Taxa Interna de Retorno Modificada	0 %	5,54 %	5,87 %	12,03 %

Período	de	O capital não é	O capital não é	20 anos	9 anos
Recuperação	do	recuperado	recuperado		
Capital					
Fluxo Líquido	de	R\$ (45.565,62)	R\$ (1.387,84)	R\$ 986,03	R\$ 76.821,17
Caixa					

Observando a Tabela 7.5, verifica-se que o valor da tarifa cobrada faz diferença no cálculo da viabilidade econômica de projetos eólicos, pois, aumentando o valor da energia, aumenta-se a receita gerada pelo projeto.

Interfere inclusive, neste caso, na escolha de aerogeradores feita pelo programa que, no caso da menor tarifa, escolheu 3 Aerogeradores de menor porte, o Gerar246; já no caso das tarifas maiores, o aerogerador que gerou o maior *VPL* foi o Verne550.

Também percebe-se que é necessária uma tarifa em torno de R\$ 0,49, conforme sugerido no cenário 3, para que o capital seja recuperado dentro da vida útil do projeto; já para a obtenção do *VPL* positivo, é necessária uma tarifa ainda maior por volta de R\$ 1,06, conforme cenário 4.

7.2.6 Sexta situação

A taxa de juros tem influência decisiva no momento de alocarem-se recursos para um investimento, pois taxas elevadas podem inviabilizar um projeto; sendo assim, geraram-se cenários que comparam a influência da taxa de juros em um investimento.

Também ao se considerar a Taxa Mínima de Atratividade Financeira nula, tem-se um projeto cujo objetivo principal seja suprir alguma necessidade elementar, no caso, o acesso à energia elétrica, sem visar a lucros; trata-se de projetos com fins sociais de subsistência.

Os critérios considerados foram: $P_{des} = 5000 \text{ W}$, $Ventos = 7 \text{ m/s}$, $P_c = \text{R\$ } 0,24189$, $TJ = 6,5 \text{ e } 0 \% \text{ a.a.}$, $k = 12 \text{ e } 0 \% \text{ a.a.}$, $VUb = 7 \text{ anos}$ e $nt = 2$.

Tabela 7.6 – Cenários gerados considerando diferentes taxas de juros e diferentes Taxas Mínimas de Atratividade Financeira.

Cenário	1	2	3
Alternativa	Taxa de juros: 6,5 % a.a. k: 12 % a.a.	Taxa de juros: 6,5 % a.a. k: nula	Taxa de juros: nula k: nula
Aerogeradores	1 Verne550	1 Verne550	1 Verne550
Investimento Inicial em Equipamentos	R\$ 34.880,00	R\$ 34.880,00	R\$ 34.880,00
Investimento Inicial em Baterias	R\$ 5.410,40	R\$ 5.410,40	R\$ 5.410,40
Investimento Total em trocas de Baterias	R\$ 10.820,80	R\$ 10.820,80	R\$ 10.820,80
Depreciação Total	R\$ 39.033,96	R\$ 39.033,96	R\$ 39.033,96
Receita Total	R\$ 112.782,65	R\$ 112.782,65	R\$ 112.782,65
Custos Totais	R\$ 52.128,34	R\$ 52.128,34	R\$ 39.033,96
Receita Líquida	R\$ 60.654,30	R\$ 60.654,30	R\$ 73.748,68
Fluxo de Caixa	R\$ 48.577,07	R\$ 48.577,07	R\$ 61.671,45
Valor Presente Líquido	R\$ (10.356,92)	R\$ 48.577,07	R\$ 61.671,45
Taxa Interna de Retorno Modificada	de 10,35 %	4,02 %	R\$ 4,75 %
Período de Recuperação do Capital	de 11 anos	11 anos	9 anos
Fluxo Líquido de Caixa	de R\$ 48.577,05	R\$ 48.577,05	R\$ 61.671,45

Neste caso, o programa escolheu, em todos os cenários, como a melhor alternativa, o Aerogerador Verne550, pois, em todos os casos, este foi o que melhor desempenho apresentou. Ao ter-se uma Taxa Mínima de Atratividade Financeira nula, o investimento tem

significativa melhoria em relação ao VPL , que se torna positivo, viabilizando assim a implantação do sistema.

Já ao se considerar além de k nula, a taxa de juros também nula, diminuem-se os CT e, em conseqüência, aumenta-se a RL , o FC , o VPL e o FLC ; o período de recuperação do capital também passa de 11 para 9 anos. Desse modo, percebe-se a importância de subsídios governamentais na área de geração de energia elétrica por fontes renováveis, sejam estes na diminuição da taxa de juros ou no fornecimento de equipamentos.

CONCLUSÃO

A utilização do vento como fonte para produção de energia elétrica surge como uma alternativa promissora por ser limpa e renovável. Os sistemas energéticos devem ser concebidos e operados dentro dos limites de produtividade ambiental, pois não existirá nenhuma segurança energética real se não existir um meio ambiente estável e seguro.

Para a análise da geração de eletricidade a partir de fonte eólica, é fundamental o equacionamento adequado dos problemas associados ao suprimento estável e dos custos para as unidades de geração. A busca de uma estrutura energética sustentável depende do estabelecimento de diretrizes e ações governamentais que conduzam para tal num esforço multi-institucional entre governo, comunidade científica e acadêmica brasileira e população em geral.

A viabilidade econômica de um projeto de geração depende do estudo de todos os fatores que envolvem a tomada de decisão com maior probabilidade de sucesso. É preciso analisar as características do local da instalação, a tarifa de energia elétrica cobrada e o custo do sistema para o consumidor, logo que a viabilidade de cada instalação seja determinada no projeto conceitual onde se realiza o estudo do Fluxo de Caixa (*FC*) do projeto.

Os cenários descritos no Capítulo 6 mostram a influência que o fator velocidade do vento tem na viabilização econômica, de rentabilidade e financeira de projetos eólicos, pois quanto maior a velocidade do vento, levando em consideração os limites operacionais da máquina, maior a geração de energia e, em consequência, maior a receita gerada.

Também, no Capítulo 7, percebe-se que o uso de banco de baterias é um fator decisivo na viabilização de projetos eólicos; isso se explica já que baterias são elementos com um custo considerável e com necessidade de trocas durante a vida útil do projeto, elevando, assim, os custos envolvidos. Ao não se considerar a utilização de baterias, tem-se que a energia gerada e não consumida instantaneamente é perdida.

O valor cobrado pela tarifa de energia é outro elemento que interfere na viabilidade dos projetos, pois quanto maior o valor da tarifa cobrada, menor tende a ser o período de recuperação do capital investido, tornando o projeto mais atraente.

Já ao se considerar a Taxa de Juros (TJ) nula, diminuem-se os Custos Totais (CT) e, em consequência, aumenta-se a Receita Líquida (RL), o Fluxo de Caixa (FC), o Valor Presente Líquido (VPL) e o Fluxo Líquido de Caixa (FLC); o Período de Recuperação do Capital (PRK) também diminui. Desse modo, percebe-se a importância de subsídios governamentais na área de geração de energia elétrica por fontes renováveis, sejam estes na diminuição da taxa de juros ou no fornecimento de equipamentos.

Os resultados encontrados neste estudo que podem ser visualizados nos Capítulos 6 e 7 mostram que a energia eólica deve ser utilizada apenas em locais com boas condições de vento para que seja possível gerar energia de forma competitiva. Em velocidades mais baixas, o Valor Presente Líquido (VPL) é negativo, a Taxa Interna de Retorno Modificada ($TIRM$) é menor que a Taxa Mínima de Atratividade Financeira (k) desejada e o capital não é recuperado dentro da vida útil do projeto.

Através da análise dos aerogeradores selecionados, ficou evidenciado que o equipamento Verne550, com potência nominal de 6 kW, foi o que apresentou os melhores resultados, com o capital sendo recuperado em menor tempo e com velocidades de vento também menores, e, em altas velocidades, podendo gerar um Fluxo de Caixa (FC) significativo em relação ao Investimento Inicial (II).

É claro que não se pode excluir o fato dos ganhos ambientais com o uso dessa fonte, pois ela é compatível com as necessidades urgentes, em todo o mundo, de diminuição na emissão de poluentes, bem como na promoção do desenvolvimento sustentável, fato que aumenta o interesse na mesma. Também, tendo em vista se tratar de investimentos em equipamentos de menor porte que visem sanar necessidades básicas de propriedades ou pequenas comunidades, há de se considerar os ganhos proporcionados em termos de acesso à tecnologia e ao bem-estar das famílias beneficiadas, pois, hoje, a energia elétrica é um bem essencial à vida e à promoção do desenvolvimento.

Além de barreiras tecnológicas e econômicas, que restringem a disseminação de empreendimentos energéticos com fonte eólica, é necessário desenvolver pesquisas aplicadas para que haja conhecimento e aceitação destes empreendimentos pelos diversos setores da sociedade, que são os usuários finais da energia produzida.

Tendo em vista que os impactos ambientais causados pela energia eólica são mais acentuados em grandes parques, os sistemas menores descentralizados ganham mais força ainda. Sendo assim, os sistemas eólicos são uma alternativa eficaz e viável; devem ser estrategicamente instalados no país para atender, muitas vezes, demandas diferenciadas, como propriedades rurais.

Para trabalhos futuros, sugere-se: incremento do programa desenvolvido para viabilizar ao usuário o fornecimento de outros dados de entrada, como o período desejado para o capital ser recuperado, entre outros; aplicação da metodologia desenvolvida em um estudo de caso.

REFERÊNCIAS

ACUMULADORES MOURA. Disponível em: < <http://www.moura.com.br/> > Acesso em: 05 jun. 2007.

AMARANTE, Odilon A. Camargo do, et al. **Atlas eólico**: Rio Grande do Sul. Porto Alegre: SEMC, 2002.

ARAÚJO, Eliete de Pinho. **Energia Eólica**. Arquitextos, Campinas, n. 50, jul. 2004. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp245.asp>> Acesso em: 12 jul. 2006.

ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243 p.

AZEVEDO, Rafael Oliveira de; SÁ JÚNIOR, Gentil Nogueira de. **Análise econômico-financeira para implantação de centrais termelétricas a gás no Brasil**. Itajubá: EFEI, 2001, p. 1-13. Disponível em:< <http://www.iem.efei.br/dpr/td/dezembro2001/pdf/05td1201.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2007.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2006: ANO BASE 2005. **Relatório Final**. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro: EPE, 2006. 188 p.

BARCELLOS, João Carlos Holland de. **Algoritmos genéticos adaptativos**: um estudo comparativo. São Paulo: Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

BASSANEZI, Carlos Rodney. **Ensino-Aprendizagem com Modelagem Matemática**. São Paulo: Contexto, 2002. 389 p.

BITTENCOURT, Henrique von Hertwig. **A Matriz Energética no Desenvolvimento Sustentável de Pequenas Propriedades Rurais**. Florianópolis: UFSC, 2005. Relatório de Estágio.

BLATTMANN, Ursula; RADOS, Gregório J. Varvakis; VALERIM, Patrícia. Valor Agregado a Serviços e Produtos de Informação. **Informativo CRB 14 / ACB**. Florianópolis, v. 9, n. 1, p. 11-12, jan./mar. 1999.

BRITTO, Adenir Sebastião de. **Identificação de sistemas utilizando algoritmos meméticos para estimação de parâmetros**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2007.

CAMPOS, Fábio Galizia Ribeiro de. **Geração de energia a partir de fonte eólica com gerador assíncrono conectado a conversor estático duplo**. São Paulo: USP, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2004.

CARVALHO, Juracy Vieira de. **Análise Econômica de investimentos: EVA: valor econômico agregado**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

CARVALHO, Paulo. **Geração Eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003.

CARVALHO, Paulo Cesar Marques de; OLIVEIRA JÚNIOR, Demercil Souza; REIS, Mônica Magalhães. Estudo de Viabilidade Econômica de Geradores Eólicos de Pequeno Porte no Modo Autônomo. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2006, Campina Grande. **Anais eletrônicos**. Campina Grande: UFCG, 2006. p. 1-4. Disponível em: <http://www.sbse2006.ufcg.edu.br/anais/070_sbse2006_final.pdf> Acesso em: 4 ago. 2006.

CERVEIRA, Ricardo. **Agroecologia & Desenvolvimento: Estudo de caso do Grupo Curupira, Jaboti – PR**. São Paulo: USP, 2002. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação Geografia Física, Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2002.

ELETROVENTO. Disponível em: <<http://www.eletovento.com.br/>>. Acesso em: 13 jul. 2007.

ENERSUD. Disponível em: <<http://www.enersud.com.br/>>. Acesso em: 20 jul. 2007.

EÓLICA RIO. **Ecologia, Economia, Progresso.** Disponível em: <<http://www.eolicario.com.br/bombeamento.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2007.

GOLDBARG, Marcos César; LUNA, Henrique Pacca Loureiro. **Otimização Combinatória e Programação Linear** – Modelos e Algoritmos. Rio de Janeiro: Campus, 2000.

GOLDBERG, David E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning.** Addison Wesley Longman, Inc, 1989.

GOMES, Moacir Carlos. **Identificação de sistemas utilizando algoritmos genéticos para estimação de parâmetros.** Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2005.

GONÇALVES, Mirian Buss; VICENTE, Amarildo de. Um algoritmo genético associado a métodos determinísticos para resolver problemas de otimização não-lineares mistos. **Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**, n. 2, p. 525-536. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, 2000.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald Jerry. **Introdução à Pesquisa Operacional.** 3. ed. São Paulo: Campus, 1988.

HOLLAND, John Henry. **Adaptation in Natural and Artificial System.** The University of Michigan Press, Ann Arbor, 2nd edition, 1975.

LAPPONI, Juan Carlos. **Projetos de Investimento: Construção e Avaliação do Fluxo de Caixa: Modelos em Excel.** São Paulo: Laponi Treinamento, 2000.

LAZZARIN, Telles Brunelli. **Estudo e implementação de um carregador de baterias com uma técnica de avaliação de sua vida útil.** Florianópolis: UFSC, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

LEVA, Flávia Fernandes de et al. **Modelo de um Projeto de um Sistema Fotovoltaico.** Núcleo de Eletricidade Rural e Fontes Alternativas de Energia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <<http://paginas.agr.unicamp.br/energia/agre2004/Fscommand/PDF/Agrener/Trabalho%2042.pdf>> Acesso em: 14 set. 2007.

LINDEN, Ricardo. **Algoritmos Genéticos.** Rio de Janeiro: Brasport, 2006.

MICHALEWICZ, Zbigniew. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs.** Springer Verlag, 1999.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Disponível em:<<http://www.mct.gov.br>> Acesso em: 20 fev. 2008.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Disponível em :<<http://www.mme.gov.br/>> Acesso em: 10 nov. 2007.

NEUMANN, Luiz Gustavo et al. Otimização combinatória empregando algoritmo genético aplicada na análise multivariada de medicamentos manipulados. **XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Florianópolis, SC, Brasil, 03 a 05 de nov de 2004. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2004_Enegep0609_1200.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2007.

NOGUEIRA, Carlos Eduardo Camargo; ZÜRN, Hans H. Modelo de dimensionamento otimizado para sistemas energéticos renováveis em ambientes rurais. **Engenharia Agrícola**, Mai/Ago. 2005, vol.25, no.2, p.341-348. ISSN 0100-6916.

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de energia elétrica: tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade**. 3. ed. Barueri, SP: Manole, 2003.

RIBEIRO, Fernando Selles. **A Eletrificação Rural ao Alcance de Todos**. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/precci/Downloads/IT%20163-letrificacao%20Rural/A%20Eletrificacao%20rural%20ao%20alcance%20de%20todos.pdf>> Acesso em: 30 jan. 2008.

RIO GRANDE ENERGIA. Disponível em:<<http://www.rge-rs.com.br/>> Acesso em: 10 jan. 2007.

ROUSSEF, Dilma Vana. Apresentação. In.: AMARANTE, Odilon A. Camargo do, et al. **Atlas eólico: Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SEMC, 2002.

SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E COMUNICAÇÕES. Disponível em:<<http://www.semc.rs.gov.br/>> Acesso em: 20 fev. 2007.

SILVA, Carliane Diniz e; SERAPHIM, Odivaldo Jose; TEIXEIRA, Nelson Miguel. Potencial eólico para bombeamento de água na Fazenda Lageado. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 2000, Campinas. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200032&lng=es&nrm=abn> Acesso em: 6 ago. 2006.

SILVEIRA, Eberson Jose Thimmig. **Balço energético consolidado do estado do Rio Grande do Sul 2001-2004**. Porto Alegre: Secretaria de Energia, Minas e Comunicações, 2006. 274 p.

TERCIOTE, Ricardo. **Eficiência energética de um sistema eólico isolado**. Unicamp. Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia. Disponível em: <<http://paginas.agr.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0100.pdf>> Acesso em : 17 set. 2007.

ZSCHORNACK, Felipe. **Técnicas de estimativa do tempo de execução de software**. Porto Alegre: PPGC da UFRGS, 2004.

ZUBEN, Fernando Jose von. **Modelos paramétricos e não-paramétricos de redes neurais artificiais e aplicações**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1996.

ANEXOS

ANEXO A - ARTIGO CIENTÍFICO

Apresenta-se, em anexo, um artigo científico que foi publicado no XXX Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, Florianópolis-SC, em setembro de 2007. Neste mostra-se um estudo da viabilidade econômica da implantação de dois modelos de aerogeradores de fabricação nacional para geração de energia elétrica por fonte eólica. Como este artigo relata parte desta dissertação, seu conteúdo será apresentado a seguir.

MODELO MATEMÁTICO PARA ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS EÓLICOS EM PROPRIEDADES RURAIS

Josiane Costa Durigon

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - Departamento de Física, Estatística e Matemática
98 700-000, Ijuí, RS
E-mail: jdurigon@comnet.com.br

Cassiano Rech

Depto de Tecnologia, DETEC, UNIJUI
98 700-000, Ijuí, RS
E-mail: cassiano.rech@unijui.edu.br

Gideon Villar Leandro

Depto de Tecnologia, DETEC, UNIJUI
98 700-000, Ijuí, RS
E-mail: gede@unijui.edu.br

José Valdemir Muenchen

Depto de Economia e Contabilidade, DECon, UNIJUI
98 700-000, Ijuí, RS
E-mail: valdemir@unijui.edu.br

Resumo: Levando em consideração que os fatores econômicos são um dos mais importantes determinantes na utilização de fontes de energia renováveis, este artigo apresenta o estudo da viabilidade econômica da implantação de sistemas eólicos em propriedades rurais. São apresentados os aspectos referentes à produção de energia de dois aerogeradores de fabricação nacional, com capacidades nominais de 1 kW e 6 kW, suas receitas, seus custos e a renda líquida da produção de energia elétrica gerada. Considerando os valores de investimentos e os fluxos econômicos, apresenta-se o estudo de viabilidade econômica para diferentes cenários possíveis.

Palavras-chave: aerogerador, energia eólica, análise econômica, propriedades rurais.

1 Introdução

A produção de energia, em seu sentido amplo, é uma necessidade global cada vez mais presente em nosso meio. É impossível imaginar o homem vivendo em condições dignas sem os benefícios que a eletricidade proporciona [9].

Com isso, a necessidade de encontrar novas fontes de geração de energia é muito grande, pois a forma tradicional de produção de eletricidade do país, onde o

volume de participação de energia hidráulica não encontra similar no mundo e mostra a dependência do Brasil com relação ao insumo água, não suprirá por muito tempo essa crescente demanda [3].

Neste trabalho, o interesse se concentrará na utilização do vento como fonte alternativa para produção de energia elétrica, tendo em vista os danos ambientais e custos reduzidos, quando comparados a outras fontes alternativas de energia [1].

Seu uso apresenta algumas vantagens, como: é uma fonte de energia segura e renovável; não polui; suas instalações são móveis e, quando retiradas, pode-se reutilizar toda a área ocupada; o tempo de construção é rápido; trata-se de recurso autônomo e econômico; gera empregos. As desvantagens conhecidas são: impactos visuais e sonoros e efeitos sobre as aves do local [1].

Discussões recentes demonstram a preocupação relativa à sustentabilidade energética como sendo uma das questões presentes no debate atual sobre a agricultura, motivo pelo qual o foco central deste trabalho volta-se para a área rural [2].

Dentre os desafios colocados pela sociedade aos sistemas de produção agropecuária, estão incluídos os relacionados à necessidade de produção de alimentos e outras matérias-primas em quantidade e qualidade adequadas e, também, a exigência de que essa produção não contamine o meio ambiente nem utilize os recursos naturais de maneira

irresponsável, além de levar em consideração os aspectos relacionados à equidade social [2].

Portanto, exige-se que seja estabelecido um padrão de tecnologia sustentável ao longo do tempo [2].

Após o impacto do anúncio do racionamento de energia no Brasil em 2001, as ameaças também ao campo tornaram-se freqüentes. Ano após ano, entram em pauta alguns questionamentos, como: havendo produção própria, embora parcial, de energia na propriedade, será mesmo necessário o racionamento? E os custos não poderiam ser menores para os produtores [5]?

Tendo em vista as possibilidades de estudo que foram alargadas com o uso da Modelagem Matemática, pretende-se desenvolver um programa computacional cuja finalidade principal seja possibilitar a análise do potencial energético, dimensionar e estudar sistemas de energia eólicos a partir de informações básicas das características das potencialidades energéticas locais e dos equipamentos de geração.

O desenvolvimento de programas computacionais que possam auxiliar no dimensionamento, planejamento e expansão de sistemas eólicos para geração de eletricidade tem como principal vantagem possibilitar o estudo dos sistemas com base em informações geralmente disponíveis para o usuário [8].

Este estudo visa demonstrar, a partir das características das turbinas selecionadas, a importância do regime de vento local, a possibilidade de complementaridade entre as fontes eólica e elétrica convencional para o local estudado, bem como, a relação custo benefício existente entre a utilização de fontes convencionais e fontes eólicas de energia para posterior modelagem com a finalidade de estabelecer metas visando a um melhor aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis na propriedade.

2 Fatores que influenciam na viabilidade econômica

O estudo das características do vento em um local específico está relacionado aos seus potenciais para produção de eletricidade, com o objetivo de substituir ou complementar os sistemas convencionais [8].

Dessa forma, o estudo da viabilidade econômica é fundamental para toda

instalação eólica e pode ser subdividido em duas etapas: custos iniciais e custos anuais de operação e manutenção [4].

Como custos iniciais, pode-se listar o estudo da viabilidade técnica e econômica do projeto e despesas com a compra e instalação dos equipamentos; já pelos custos anuais de operação e manutenção, responde principalmente a troca de baterias, elementos utilizados para a acumulação da energia gerada quando esta não está sendo utilizada no momento, que têm vida útil em torno de 4 anos, conforme informação dada pelo fabricante dos aerogeradores.

Neste artigo, será considerada, como possibilidade, a instalação de dois modelos de aerogeradores fabricados pela Empresa Enersud, o Gerar246 e o Verne550, com potências nominais respectivamente de 1 kW e de 6 kW funcionando de maneira complementar à rede elétrica convencional existente, cujas características principais estão descritas nas Tabelas 1 e 2 [6].

<i>Características Técnicas</i>	
Potência nominal	1000 W
Número de pás	3
Início da rotação	2,2 m/s
Início da geração	3 m/s
Velocidade nominal	12 m/s
Altura da torre	12 m

Fonte: Enersud, Rio de Janeiro/RJ

Tabela 1: Características Técnicas do Aerogerador Gerar246

<i>Características Técnicas</i>	
Potência nominal	6000 W
Número de pás	3
Início da rotação	2,2 m/s
Início da geração	3 m/s
Velocidade nominal	12 m/s
Altura da torre	12 m

Fonte: Enersud, Rio de Janeiro/RJ

Tabela 2: Características Técnicas do Aerogerador Verne550

3 Modelo Matemático

Para o estudo da viabilidade econômica, utilizaram-se diferentes dados de velocidade de vento, o valor cobrado pela

Concessionária RGE pelo kWh de energia fornecida para uma propriedade rural, cuja classificação tarifária é B2- Rural/Trifásica, e os custos de instalação de um sistema eólico fornecido pelo fabricante.

Construiu-se um modelo de otimização não-linear dado a seguir:

$$\begin{aligned} \max \quad & RL=RT-CT \\ & = E_p * P_C * N_A - \left(D + C * \left(\frac{1}{NP} + T_J \right) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

sujeito a

$$E_p \leq -0,2925x^4 + 6,9547x^3 - 49,346x^2 + 21885x - 189,42$$

$$D \leq \frac{(V_I - V_R)}{V_U}$$

$$T_J \leq \text{Taxas de mercado}$$

$$C \leq \text{Preço} * N_A$$

$$N_A \leq \text{Potência desejada}$$

No modelo, RL representa a renda líquida gerada pelo projeto, RT a receita total, CT os custos totais, E_p a energia produzida pelo aerogerador, D a depreciação dos equipamentos, V_I o valor inicial dos equipamentos, V_R o valor residual dos equipamentos, V_U a vida útil dos equipamentos, T_J a taxa de juros de mercado, C o capital investido, N_A o número de aerogeradores, P_C o preço da energia cobrada pela concessionária e NP o número de prestações.

Tendo a RL maximizada, pode-se fazer uma análise econômica, de rentabilidade e financeira do projeto.

Pela análise econômica, vai responder o FE , que é a contribuição do projeto em termos de disponibilidade monetária.

$$FE = RL + D \quad (2)$$

FE representa o fluxo econômico gerado pelo projeto, RL a receita líquida e D a depreciação dos equipamentos.

A análise da rentabilidade será feita levando em consideração três indicadores:

a) O Valor Presente Líquido (VPL), que é o retorno líquido atualizado gerado pelo projeto,

e que permite analisar a viabilidade econômica do projeto a longo prazo.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FE_j}{(1+r)^j} \quad (3)$$

FE_j representa o fluxo econômico do projeto por período, n o número de períodos que representa o horizonte do projeto, j a duração de um período em dias e r a taxa de juros cobrada por período [7].

b) A Taxa Interna de Retorno (TIR), que é a taxa de juros que zera o VPL , evidencia a taxa máxima de juros que um projeto suportaria. Quanto maior a TIR , mais desejável é um investimento.

$$\sum_{j=1}^n \frac{FE_j}{(1+\alpha)^j} = 0 \quad (4)$$

FE_j representa o fluxo econômico do projeto por período, n o número de períodos que representa o horizonte do projeto, j a duração de um período em dias e α a taxa interna de retorno [7].

c) O Período de Recuperação do Capital (PRK), que é o prazo de tempo necessário para que os desembolsos sejam integralmente recuperados [7].

O índice de avaliação financeira utilizado é o Fluxo Líquido de Caixa (FLC), que é o valor disponível em caixa após efetuados todos os pagamentos previstos na execução do orçamento do projeto para o período determinado [7].

$$FLC = FE_j - P \quad (5)$$

FE_j representa o fluxo econômico de cada período e P a prestação paga pelo financiamento.

4 Resultados

A seguir, serão mostrados os resultados obtidos utilizando o modelo matemático proposto. Os dados apresentados nas Tabelas 3, 4, 5 e 6 foram calculados com a utilização do Software Excel 2.0.

Serão mostrados quatro cenários, dois para cada aerogerador selecionado, embora seja possível uma gama de cenários muito maior, levando-se em consideração os seguintes critérios:

- Financiamento: TJLP de longo prazo de 6,5% ao ano, prazo de 8 anos para o pagamento e 1 ano de carência
- kWh /RGE: R\$ 0,238769
- Taxa requerida VPL: 12% ao ano
- Vida útil do projeto: 20 anos

1) Cenário 1 : Aerogerador Gerar246

Ventos: 6,5 m/s

Produção: 220 kWh/mês

Baterias: Com banco de baterias

<i>Cenário 1</i>	
Investimento Inicial	R\$ 12.210,00
Trocas de Baterias	R\$ 9.000,00
Depreciação Total	R\$ 16.968,00
Receita Anual	R\$ 630,35
Receita Total	R\$ 12.607,00
Receita Líquida	R\$ (8.329,25)
Custos Totais	R\$ 20.936,25
Fluxo Econômico	R\$ (12.571,25)
Valor Presente Líquido	R\$ (13.481,73)
Taxa Interna de Retorno	-10,23%
Período de Recuperação do Capital	Não recupera
Fluxo Líquido de Caixa	R\$ (16.539,50)

Tabela 3: Cenário 1

A situação apresentada na Tabela 3 mostra um custo muito elevado em relação à receita que não é suficiente para que o investimento seja pago.

Outro fator que onera muito o Fluxo Econômico é a troca de baterias, um componente bastante caro em relação ao projeto instalado e com necessidade de várias trocas ao longo da vida útil do projeto. Sendo assim, o capital investido não é recuperado, tornando o investimento não atrativo economicamente.

2) Cenário 2: Aerogerador Gerar246

Ventos: 6,5 m/s

Produção: 220 kWh/mês

Baterias: Sem banco de baterias

<i>Cenário 2</i>	
Investimento Inicial	R\$ 8.730,00
Depreciação Total	R\$ 6.984,00
Receita Anual	R\$ 630,35
Receita Total	R\$ 12.607,00
Receita Líquida	R\$ 2.785,75
Custos Totais	R\$ 9.821,25
Fluxo Econômico	R\$ 1.039,75
Valor Presente Líquido	R\$ (5.997,72)
Taxa Interna de Retorno	1%
Período de Recuperação do Capital	18,35 anos
Fluxo Líquido de Caixa	R\$ (1.797,50)

Tabela 4: Cenário 2

Nesse caso, simulando a mesma situação descrita no Cenário 1, porém sem a utilização de banco de baterias, verifica-se uma melhora no rendimento do projeto, onde o capital já é recuperado.

Torna-se, assim, viável a execução do projeto, porém ainda pouco atrativo economicamente e com Valor Presente Líquido negativo, o que não recomenda a implantação do projeto.

3) Cenário 3: Aerogerador Verne550

Ventos: 9,7 m/s

Produção: 3.276 kWh/mês

Baterias: Com banco de baterias

<i>Cenário 3</i>	
Investimento Inicial	R\$ 42.880,00
Trocas de Baterias	R\$ 22.500,00
Depreciação Total	R\$ 52.304,00
Receita Anual	R\$ 9.386,49
Receita Total	R\$ 187.729,74
Receita Líquida	R\$ 121.489,74
Custos Totais	R\$ 66.240,00
Fluxo Econômico	R\$ 108.413,74
Valor Presente Líquido	R\$ 9.484,96
Taxa Interna de Retorno	15,15%
Período de Recuperação do Capital	6,79 anos
Fluxo Líquido de Caixa	R\$ 94.477,74

Tabela 5: Cenário 3

Nessa situação, o investimento inicial é maior que nos dois outros cenários descritos anteriormente, porém a receita gerada pelo projeto também cresce significativamente. Verifica-se uma Taxa Interna de Retorno

superior à taxa requerida, bem como um Valor Presente Líquido positivo, que significam que o projeto, do ponto de vista econômico, pode ser implantado.

Os gastos com trocas de baterias são pagos pelo projeto e o Período de Recuperação do Capital é satisfatório em relação à vida útil do projeto. Nesse caso, o investimento é viável e atrativo economicamente.

4) Cenário 4: Aerogerador Verne550

Ventos: 9,7 m/s

Produção: 3.276 kWh/mês

Baterias: Sem banco de baterias

<i>Cenário 4</i>	
Investimento Inicial	R\$ 34.900,00
Depreciação Total	R\$ 27.920,00
Receita Anual	R\$ 9.386,49
Receita Total	R\$ 187.729,74
Receita Líquida	R\$ 148.467,24
Custos Totais	R\$ 39.262,50
Fluxo Econômico	R\$ 141.487,24
Valor Presente Líquido	R\$ 27.312,01
Taxa Interna de Retorno	22,49%
Período de Recuperação do Capital	4,67 anos
Fluxo Líquido de Caixa	R\$ 130.144,74

Tabela 6: Cenário 4

Seguindo a mesma situação descrita no Cenário 3, porém sem a utilização de bancos de baterias, o projeto é ainda mais significativo em termos econômicos, financeiros e de rentabilidade.

5 Conclusões

Baseada em diferentes perfis de produção de energia, considerando variadas velocidades de vento em diferentes cenários propostos e nos custos atuais cobrados pela concessionária fornecedora de energia, a análise mostra um tempo de recuperação do capital investido que, quando existe, ainda é longo demais e não atrativo economicamente sem subsídios governamentais para velocidades de vento mais baixas.

Entretanto, com a diminuição nos custos, principalmente dos elementos que não são fabricados pela empresa produtora dos aerogeradores, assim como a não utilização de

baterias, o investimento pode vir a se tornar viável economicamente em menor tempo.

Vale ressaltar que o modelo matemático descrito neste trabalho está em fase de testes e aperfeiçoamento, havendo ainda alguns detalhes a serem acrescentados visando a um melhor desempenho e flexibilidade; já fornece, no entanto, uma boa indicação do estudo da viabilidade econômica de projetos eólicos, como pode ser visto nos cenários descritos nos resultados.

Sendo assim, sistemas de produção de energia elétrica utilizando fonte eólica, representam um investimento com futuro promissor, tendo em vista os estudos e avanços tecnológicos existentes nesta área.

6 Referências

- [1] E. P. Araujo, Energia Eólica, Arqtextos. Campinas, n.50, pp. 1-8, (2004).
- [2] H. H. Bittencourt, A Matriz Energética no Desenvolvimento Sustentável de Pequenas Propriedades Rurais. Florianópolis: UFSC, 2005. Relatório de Estágio.
- [3] F. G. R Campos, Geração de energia a partir de fonte eólica com gerador assíncrono conectado a conversor estático duplo. São Paulo: USP, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2004.
- [4] P. C. M. Carvalho; D. S. Jr. Oliveira; M. M. Reis, Estudo de Viabilidade Econômica de Geradores Eólicos de Pequeno Porte no Modo Autônomo, em “Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos”, pp. 1-4, Campina Grande, 2006.
- [5] A. Cherobini; A. E. Corrente; R. M. Fricke, Modelagem do Consumo de Energia Elétrica, Fontes de Geração e Preservação Ambiental, Ijuí e Região, em “Jornada de Pesquisa da Unijuí”, pp.166, Ijuí, 2004.
- [6] Enersud. Disponível em: < <http://www.enersud.com.br/> > Acesso em: 20 jul. 2006.

- [7] J. C. Lapponi, “Projetos de Investimento: Construção e Avaliação do Fluxo de Caixa: Modelos em Excel”, Lapponi Treinamento e Editora, São Paulo, 2000.
- [8] W. N. Macêdo; J. T. Pinho, Ases: Programa para Análise de Sistemas Eólicos e Solares Fotovoltaicos, em “Agrener – 4º Encontro de Energia no Meio Rural”, pp. 1-10, Campinas, 2002.
- [9] C. D. Silva; O. J. Seraphim; N. M. Teixeira, Potencial eólico para bombeamento de água na Fazenda Lageado, em “Encontro de Energia no Meio Rural”, pp. 1-9, Campinas, 2000.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)