

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA**

**ANÁLISE DA OPERAÇÃO DAS USINAS EÓLICAS DE CAMELINHO E PALMAS E  
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO DE LOCALIDADES NO PARANÁ**

**ARILDE SUTIL GABRIEL DE CAMARGO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.

Orientador: Prof Dr. Eduardo L. Krüger

**CURITIBA**

**2005**

**ARILDE SUTIL GABRIEL DE CAMARGO**

**ANÁLISE DA OPERAÇÃO DAS USINAS EÓLICAS DE CAMELINHO E PALMAS E  
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO DE LOCALIDADES NO PARANÁ**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Krüger

**CURITIBA  
2005**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do CEFET-PR – Unidade Curitiba

C172a Camargo, Arilde Sutil Gabriel de  
Análise da operação das usinas eólicas de Camelinho e Palmas e avaliação do potencial eólico de localidades no Paraná / Arilde Sutil Gabriel de Camargo. – Curitiba : CEFET-PR, 2005.  
xxii, 206 f. : il. ; 30 cm

Orientador : Prof. Dr. Eduardo L. Krüger  
Dissertação (Mestrado) – CEFET-PR. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia. Curitiba, 2005.  
Bibliografia : f. 194-206

1. Força eólica – Paraná. 2. Energia – Fontes alternativas. 3. Recursos energéticos. 4. Usinas eólicas. 5. Energia elétrica – Produção – Aspectos ambientais. 6. Desenvolvimento sustentável. I. Krüger, Eduardo L., orient. II. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Tecnologia. III. Título.

CDD : 333.794  
CDU : 620.91

Para meus pais Ari e Maria

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço especialmente à COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, representada pelo Diretor de Geração, Transmissão e Telecomunicações Eng. José Ivan Morozowski e pelo Superintendente de Meio Ambiente Econ. Telmir Túlio Alberti, pela oportunidade de participar do Mestrado em Tecnologia e pelo apoio na realização desta pesquisa.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho:

Ao coordenador do PPGTE, professor Dr. Gilson Queluz;

Ao orientador professor Dr. Eduardo L. Krüger, pela compreensão e orientação;

Ao colega Eng. Dario Jackson Schultz, gerente da Área de Energias Alternativas da COPEL, pelo dados fornecidos e pelas sugestões sem as quais este trabalho não poderia ser realizado;

À colega Denise M. Marty, da Área de Comercialização de Energia da COPEL, pelo fornecimento de dados para a pesquisa;

Aos colegas da Superintendência de Meio Ambiente, Patrícia, Rose, Juliana, Rosana, Henri, Freitas, Levy, Paulo, Jorge, Saldanha, Thiago e Joceli pelo apoio e incentivo;

Aos colegas do PPGTE pelo companheirismo;

Agradeço especialmente aos meus filhos Ivan e Rebeca pelo carinho e compreensão suportando a minha ausência nos momentos em que eu precisava me dedicar às aulas e ao estudo.

Acima de tudo agradeço a Deus pelo dom da vida...

“The answer is blowing in the wind....”  
Bob Dylan

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>xvi</b>
<b>LISTA DE VARIÁVEIS.....</b>	<b>xix</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xxi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xxii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. GERAÇÃO DE ENERGIA.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. ENERGIA.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. FONTES DE ENERGIA PRIMÁRIA.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3. TENDÊNCIAS ENERGÉTICAS GLOBAIS.....</b>	<b>11</b>
<b>2.4. ENERGIA ELÉTRICA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.5. ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.....</b>	<b>14</b>
<b>2.6. ENERGIA E SUSTENTABILIDADE.....</b>	<b>17</b>
<b>2.6.1. Energia e desenvolvimento sustentável: Enfoque da Associação Internacional de Hidroeletricidade – IHA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.6.2. Energia e desenvolvimento sustentável: Enfoque da ONU – Organização das Nações Unidas .....</b>	<b>19</b>
2.6.2.1. Políticas energéticas para o desenvolvimento sustentável.....	21
<b>2.6.3. Políticas energéticas sustentáveis para o Cone Sul.....</b>	<b>23</b>
2.6.3.1. Critérios considerados para a construção de cenários sustentáveis.....	24
<b>2.6.4. Indicadores de sustentabilidade da geração de energia elétrica.....</b>	<b>26</b>
2.6.4.1. Diretrizes políticas e indicadores globais e regionais.....	27
<b>2.7. OPCÕES DE GERAÇÃO DE ENERGIA E SEUS IMPACTOS.....</b>	<b>29</b>
<b>3. ENERGIAS RENOVÁVEIS.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1. PANORAMA MUNDIAL.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2. PANORAMA BRASILEIRO.....</b>	<b>33</b>

<b>3.2.1. PRODEM – Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.2. PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica .....</b>	<b>35</b>
<b>3.3. ENERGIA HIDRELÉTRICA.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.1. Energia hidrelétrica no Brasil .....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.2. Impactos das hidrelétricas .....</b>	<b>38</b>
3.3.2.1. Aspectos econômicos .....	39
3.3.2.2. Aspectos sociais .....	40
3.3.2.3. Aspectos ambientais .....	41
<b>3.4. ENERGIA DA BIOMASSA .....</b>	<b>42</b>
<b>3.4.1. Biomassa no Brasil .....</b>	<b>43</b>
3.4.1.1. Biodiesel .....	45
3.4.1.2. Resíduos urbanos .....	46
<b>3.4.2. Impactos Ambientais .....</b>	<b>47</b>
<b>3.5. ENERGIA DO MAR.....</b>	<b>48</b>
<b>3.5.1. A energia das ondas .....</b>	<b>48</b>
<b>3.5.2. A energia térmica dos oceanos .....</b>	<b>48</b>
<b>3.5.3. A energia das marés .....</b>	<b>48</b>
<b>3.5.4. Panorama mundial .....</b>	<b>49</b>
<b>3.5.5. Panorama brasileiro .....</b>	<b>51</b>
<b>3.5.6. Impactos ambientais e socioeconômicos .....</b>	<b>52</b>
<b>3.6. ENERGIA SOLAR .....</b>	<b>52</b>
<b>3.6.1. O efeito fotovoltaico .....</b>	<b>53</b>
<b>3.6.2. Impactos ambientais e socioeconômicos .....</b>	<b>54</b>
3.6.2.1. Vantagens da energia fotovoltaica .....	54
3.6.2.2. Desvantagens da energia fotovoltaica .....	55
<b>3.6.3. Tecnologias disponíveis .....</b>	<b>55</b>
<b>3.6.4. Sistemas autônomos e sistemas interligados à rede elétrica Pública...</b>	<b>55</b>
<b>3.6.5. Utilização de aquecimento solar.....</b>	<b>56</b>
<b>3.6.6. Energia solar no Brasil.....</b>	<b>58</b>



<b>4. ENERGIA EÓLICA .....</b>	<b>60</b>
<b>4.1. HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2. O VENTO .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2.1. Mecanismos de geração dos ventos .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2.2. Características do vento .....</b>	<b>65</b>
<b>4.2.3. A velocidade do vento .....</b>	<b>67</b>
<b>4.3. SISTEMA EÓLICO .....</b>	<b>73</b>
<b>4.3.1. Turbinas (rotores) eólicos .....</b>	<b>73</b>
4.3.1.1. Componentes principais .....	73
4.3.1.2. Classificação das turbinas eólicas .....	74
4.3.1.3. Tipos de turbinas eólicas modernas .....	75
4.3.1.4. Controle de potência e de rotação das turbinas eólicas .....	79
<b>4.3.2. Torre .....</b>	<b>81</b>
<b>4.3.3. Aerodinâmica .....</b>	<b>81</b>
<b>4.3.4. Geradores eólicos .....</b>	<b>84</b>
4.3.4.1. Sistemas de conversão de energia .....	85
<b>4.3.5. A potência eólica .....</b>	<b>86</b>
<b>4.3.6. Usinas Eólicas .....</b>	<b>90</b>
<b>4.3.7. Fazendas eólicas “offshore” .....</b>	<b>91</b>
<b>4.3.8. Cálculos energéticos .....</b>	<b>92</b>
4.3.8.1. Coeficiente de potência .....	93
4.3.8.2. Energia elétrica .....	95
4.3.8.3. Aplicação da metodologia de cálculos da energia obtida do potencial eólico.....	95
<b>4.4. IMPACTOS DA ENERGIA EÓLICA .....</b>	<b>96</b>
<b>4.4.1. Vantagens .....</b>	<b>96</b>
<b>4.4.2. Desvantagens .....</b>	<b>97</b>
<b>4.4.3. Impactos ambientais da energia eólica .....</b>	<b>97</b>
4.4.3.1. Descrições ambientais que poderão ser afetadas na implantação de um parque eólico.....	97
4.4.3.2. Impactos socioeconômicos na fase de construção e operação .....	98
<b>4.4.4. Considerações sobre a instabilidade da energia eólica .....</b>	<b>100</b>

<b>4.4.5. Considerações adicionais sobre impactos na fauna alada .....</b>	<b>101</b>
4.4.5.1. Um estudo de impacto de um parque eólico em pássaros no interior da Alemanha .....	103
4.4.5.2. Um modelo desenvolvido nos Estados Unidos para estimativa do impacto da tecnologia eólica nas populações de pássaros .....	105
<b>4.4.6. Considerações adicionais sobre impactos do ruído .....</b>	<b>107</b>
4.4.6.1. Consumo de energia e de materiais .....	109
4.4.6.2. Requisitos materiais .....	109
4.4.6.3. Requisitos de energia .....	110
4.4.6.4. Emissões resultantes da fase de construção .....	111
4.4.6.5. Emissões evitadas durante a fase de exploração .....	112
<b>4.5. PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA .....</b>	<b>115</b>
<b>4.5.1. Dinamarca .....</b>	<b>117</b>
<b>4.5.2. Alemanha .....</b>	<b>118</b>
<b>4.5.3. Estados Unidos .....</b>	<b>119</b>
<b>4.5.4. Brasil .....</b>	<b>119</b>
4.5.4.1. Vantagem adicional da energia eólica para o Sistema Elétrico Brasileiro .....	121
<b>4.6. CUSTO DA ENERGIA EÓLICA .....</b>	<b>127</b>
<b>4.7. POTENCIAL EÓLICO MUNDIAL E BRASILEIRO .....</b>	<b>130</b>
<b>4.7.1. Atlas Eólico Brasileiro .....</b>	<b>130</b>
<b>4.7.2. Potencial eólico-elétrico brasileiro estimado .....</b>	<b>131</b>
<b>4.7.3. Atlas Eólico do Paraná .....</b>	<b>135</b>
<b>4.7.4. Projeto VENTAR .....</b>	<b>135</b>
<b>4.7.5. Mapa do potencial eólico do Paraná .....</b>	<b>136</b>
<b>5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULOS ENERGÉTICOS .....</b>	<b>138</b>
<b>5.1. AVALIAÇÃO DA UEE DO MORRO DO CAMELINHO – MG .....</b>	<b>138</b>
<b>5.1.1. Dados de entrada .....</b>	<b>139</b>
5.1.1.1. Dados da usina .....	139
5.1.1.2. Dados de vento .....	142
5.1.1.3. Dados de produção de energia na UEE MC .....	143
<b>5.1.2. Cálculo da energia anual esperada (EAE) na UEE MC .....</b>	<b>143</b>

5.1.2.1. Cálculo da EAE com a potência nominal .....	143
5.1.2.2. Cálculo da EAE com a curva de distribuição de frequência das velocidades do vento observadas .....	144
5.1.2.3. Cálculo da EAE com curva frequência das velocidades ajustadas com a distribuição de Weibull .....	147
5.1.2.4. Cálculo do índice de disponibilidade .....	150
<b>5.2. AVALIAÇÃO DA UEE DE PALMAS – PR .....</b>	<b>151</b>
<b>5.2.1. Dados de entrada .....</b>	<b>152</b>
5.2.1.1. Dados da usina .....	152
5.2.1.2. Dados de vento .....	155
5.2.1.3. Dados de produção de energia na UEE Palmas .....	155
<b>5.2.2. Cálculo da energia anual esperada (AEA) na UEE Palmas .....</b>	<b>156</b>
5.2.2.1. Cálculo da EAE com a potência nominal .....	156
5.2.2.2. Cálculo da EAE com a curva de distribuição de frequência das velocidades Weibull .....	157
<b>5.3. POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE USINAS DE PORTE SEMELHANTE NO PARANÁ .....</b>	<b>161</b>
<b>5.3.1. Dados de entrada .....</b>	<b>161</b>
<b>5.3.2. Cálculo da potência e energia esperada .....</b>	<b>162</b>
<b>5.3.3. Simulação 1: Aerogerador TW-250 (250 kW) com torre de 30 m .....</b>	<b>165</b>
<b>5.3.4. Simulação 2: Aerogerador TW-250 (250 kW) com torre de 44 m .....</b>	<b>166</b>
<b>5.3.5. Simulação 3: Aerogerador TW-250 (250 kW) com torre de 65 m .....</b>	<b>167</b>
<b>5.3.6. Simulação 4: Aerogerador E-40 (500 kW) com torre de 44 m .....</b>	<b>168</b>
<b>5.3.7. Simulação 5: Aerogerador E-40 (500 kW) com torre de 65 m .....</b>	<b>169</b>
<b>5.3.8. Simulação 6: Aerogerador E-40 (500 kW) com torre de 100 m .....</b>	<b>170</b>
<b>5.3.9. Cálculo dos custos de implantação e geração das simulações .....</b>	<b>171</b>
5.3.9.1. Custo de implantação .....	171
5.3.9.2. Custo de geração .....	172
<b>5.4. AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E SOCIOECONÔMICA DAS UEE PALMAS E UEE MC .....</b>	<b>174</b>
<b>5.4.1. Sustentabilidade ambiental .....</b>	<b>174</b>
5.4.1.1. Comparação com geração hidroelétrica .....	174

5.4.1.2. Comparação com geração térmica .....	175
<b>5.4.2. Sustentabilidade socioeconômica .....</b>	<b>176</b>
5.4.2.1. Usina eólica de Palmas .....	176
5.4.2.2. Outras usinas na região .....	178
<b>6. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>186</b>
<b>6.1. ANÁLISE DA OPERAÇÃO DA UEE MORRO DO CAMELINHO .....</b>	<b>186</b>
<b>6.2. ANÁLISE DA OPERAÇÃO DA UEE PALMAS .....</b>	<b>183</b>
<b>6.3. ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES .....</b>	<b>185</b>
6.3.1. Análise da utilização anual da potência – UAP .....	185
6.3.2. Análise do custo da energia esperada .....	186
6.3.3. Análise da Sustentabilidade Socioambientais.....	187
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>188</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>194</b>
<b>APÊNDICE I – DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO AR .....</b>	<b>208</b>
<b>APÊNDICE II – SIMULAÇÕES .....</b>	<b>211</b>
<b>ANEXO I – MAPA DO POTENCIAL EÓLICO DO PARANÁ .....</b>	<b>225</b>
<b>ANEXO II – DADOS TÉCNICOS DO AEROGERADOR E-40 .....</b>	<b>227</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – FONTES DE ENERGIA DISPONÍVEIS .....	11
TABELA 2.2 – MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA .....	15
TABELA 2.3 – POTENCIA INSTALADA NO BRASIL POR TIPO DE USINA .....	16
TABELA 2.4 – A ELETRICIDADE E AS METAS DA DECLARAÇÃO DO MILÊNIO...	20
TABELA 2.5 – INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DEFINIDOS PELA ONU..	21
TABELA 2.6 – PILARES OU INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE .....	23
TABELA 2.7 – INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE GLOBAIS E REGIONAIS	28
TABELA 4.1 –RUGOSIDADE PARA CÁLCULO DA VELOCIDADE DO VENTO .....	68
TABELA 4.2 – CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS .....	74
TABELA 4.3 – CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS PELO DIÂMETRO E ÁREA .....	74
TABELA 4.4 – IMPACTOS AMBIENTAIS NA PAISAGEM .....	97
TABELA 4.5 – IMPACTOS AMBIENTAIS NOS ECOSISTEMAS .....	98
TABELA 4.6 – IMPACTOS AMBIENTAIS NO AR, ÁGUA E SOLO .....	98
TABELA 4.7 – IMPACTOS AMBIENTAIS DO RUÍDO .....	98
TABELA 4.8 – IMPACTOS NEGATIVOS NAS FASES DE CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO .....	97
TABELA 4.9 – IMPACTOS POSITIVOS NAS FASES DE CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO .....	99
TABELA 4.10 – NÍVEIS DE POTÊNCIA DO SOM .....	108
TABELA 4.11 – LIMITES LEGAIS DE RUÍDOS .....	109
TABELA 4.12 – PESO DOS COMPONENTES DE UM PARQUE EÓLICO .....	110
TABELA 4.13 – ENERGIA CONSUMIDA NAS DIFERENTES FASES DE UMA TURBINA EÓLICA TÍPICA .....	111
TABELA 4.14 – EMISSÕES RESULTANTES DO PROCESSO DOS MATERIAIS E DA MANUFATURA DAS TURBINAS .....	112
TABELA 4.15 – EMISSÕES ASSOCIADAS À PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE UMA CENTRAL TÉRMICA A ÓLEO .....	113
TABELA 4.16 – EMISSÕES DE CO2 PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA .....	113
TABELA 4.17 – EMISSÕES EVITADAS .....	115

TABELA 4.18 – OS DEZ PAÍSES COM MAIOR POTÊNCIA EÓLICA .....	116
TABELA 4.19 – POTÊNCIA EÓLICA INSTALADA NO BRASIL .....	121
TABELA 4.20 – CUSTO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NOS ESTADOS UNIDOS .....	127
TABELA 4.21 – CUSTO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NA EUROPA .....	128
TABELA 4.22 – CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NA EUROPA...	128
TABELA 4.23 – CUSTOS DE INSTALAÇÃO E GERAÇÃO .....	129
TABELA 4.24 – CUSTOS DAS PARTES DE UM SISTEMA EÓLICO .....	129
TABELA 4.25 – POTENCIAL EÓLICO-ELÉTRICO DO BRASIL.....	134
TABELA 5.1 – LOCALIZAÇÃO DA UEE MORRO DO CAMELINHO .....	140
TABELA 5.2 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA USINA .....	140
TABELA 5.3 – CURVA DE POTÊNCIA DO AEROGERADOR TW-250 PARA A ALTURA DE 30 m .....	141
TABELA 5.4 – CARACTERÍSTICAS DOS VENTOS .....	142
TABELA 5.5 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA (%) DAS CLASSES DE VELOCIDADE.....	143
TABELA 5.6 – PRODUÇÃO DE ENERGIA ANUAL NA UEE MC .....	143
TABELA 5.7 – CÁLCULO DA ENERGIA ANUAL ESPERADA .....	146
TABELA 5.8 – ENERGIA ANUAL ESPERADA COM DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE WEIBULL .....	148
TABELA 5.9 – ENERGIA ANUAL ESPERADA COM DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE RAYLEIGH .....	149
TABELA 5.10 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA AS DIFERENTES DISTRIBUIÇÕES DE FREQUÊNCIA DAS VELOCIDADES CONSIDERADAS .....	149
TABELA 5.11 – ÍNDICE DE DISPONIBILIDADE E FATOR DE CAPACIDADE OBSERVADOS .....	150
TABELA 5.12 – LOCALIZAÇÃO DA UEE PALMAS .....	152
TABELA 5.13 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA USINA .....	152
TABELA 5.14 – CURVA VELOCIDADE DO VENTO X POTÊNCIA X COEFICIENTE DE POTÊNCIA .....	153
TABELA 5.15 – PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA NA UEE PALMAS .....	155
TABELA 5.16 – PRODUÇÃO MENSAL DE ENERGIA EM PALMAS .....	156

TABELA 5.17 – POTÊNCIA MÉDIA OBSERVADA EM PALMAS EM kW MÉDIO .....	156
TABELA 5.18 – ENERGIA ANUAL ESPERADA COM DISTRIBUIÇÃO WEIBULL.....	158
TABELA 5.19 – ENERGIA ANUAL ESPERADA COM DISTRIBUIÇÃO RAYLEIGH...	159
TABELA 5.20 – RESUMO DAS $E_c$ PARA DIFERENTES DISTRIBUIÇÕES DE VELOCIDADE .....	160
TABELA 5.21 – AVALIAÇÃO DO FATOR DE CAPACIDADE DA UEE PALMAS .....	160
TABELA 5.22– DADOS OBTIDOS E CALCULADOS PARA OS 5 LOCAIS DE ESTUDO .....	162
TABELA 5.23 – CARACTERÍSTICAS DAS TURBINAS .....	163
TABELA 5.24 – CARACTERÍSTICAS DAS TORRES .....	163
TABELA 5.25 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM A TW-250 NA ALTURA DE 30 m .....	165
TABELA 5.26– RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM A TW-250 NA ALTURA DE 44 m .....	166
TABELA 5.27 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM A TW-250 2 NA ALTURA DE 65 m .....	167
TABELA 5.28 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM A E-40 NA ALTURA DE 44 m .....	168
TABELA 5.29 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM A E-40 NA ALTURA DE 65 m .....	169
TABELA 5.30 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM A E-40 NA ALTURA DE 100 m .....	170
TABELA 5.31 – UTILIZAÇÃO ANUAL DA POTÊNCIA .....	171
TABELA 5.32 – ENERGIA ANUAL ESPERADA .....	171
TABELA 5.33– CUSTO UNITÁRIO DE INSTALAÇÃO DOS ARRANJOS SIMULADOS (US\$/kW) .....	172
TABELA 5.34 – CUSTO MÉDIO ANUAL DA PRODUÇÃO DE ENERGIA (US\$/MWh) .....	173
TABELA 5.35 – CUSTO MÉDIO ANUAL DA PRODUÇÃO DE ENERGIA (R\$/MWh)	174
TABELA 5.36 – EMISSÕES EVITADAS EM PALMAS .....	175
TABELA 5.37 – EMISSÕES EVITADAS EM MONTE CAMELINHO .....	176

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – TENDÊNCIAS NA DEMANDA MUNDIAL DE ENERGIA PRIMÁRIA ..	12
FIGURA 2.2 – CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO NO MUNDO .....	13
FIGURA 2.3 – ENERGIA GERADA NO MUNDO NO ANO 2000 POR DIFERENTES FONTES .....	13
FIGURA 2.4 – MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA .....	15
FIGURA 2.5 – ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL .....	16
FIGURA 4.1 – PARQUE EÓLICO NOS ESTADOS UNIDOS .....	60
FIGURA 4.2 – FORMAÇÃO DOS VENTOS DEVIDO AO DESLOCAMENTO DAS MASSAS DE AR .....	64
FIGURA 4.3 – REGISTRO ANEMOGRÁFICO MENSAL .....	67
FIGURA 4.4 – FREQUÊNCIA DA OCORRÊNCIA DA VELOCIDADE DE VENTO NA UEE MC .....	71
FIGURA 4.5 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE WEIBULL .....	71
FIGURAS 4.6 – COMPONENTES DE UM SISTEMA EÓLICO .....	75
FIGURA 4.7 – ROTORES DE TRÊS PÁS .....	77
FIGURA 4.8 – ROTORES DARRIEUS .....	79
FIGURA 4.9 – SISTEMA DE FORÇAS ATUANTES NA PÁ .....	82
FIGURA 4.10 – CURVA TÍPICA DE POTENCIA DE TURBINAS EÓLICAS .....	90
FIGURA 4.11 – FAZENDA EÓLICA OFF-SHORE .....	92
FIGURA 4.12 – DENSIDADE DE POTÊNCIA DISPONÍVEL NO VENTO .....	93
FIGURA 4.13 – CUSTO RESULTANTE DA REDUÇÃO DAS EMISSÕES PARA DIFERENTES ENERGIAS .....	114
FIGURA 4.14 – CRESCIMENTO DA CAPACIDADE INSTALADA MUNDIAL DE ENERGIA EÓLICA .....	117
FIGURA 4.15 – COMPLEMENTARIDADE HIDRO-EÓLICA NO NORDESTE .....	124
FIGURA 4.16 – COMPLEMENTARIDADE HIDRO-EÓLICA NO SISTEMA SUL-SUDESTE .....	126
FIGURA 4.17 – POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO .....	133
FIGURA 5.1 – USINA EÓLICA MORRO DO CAMELINHO .....	139
FIGURA 5.2 – CURVA DE POTÊNCIA PARA O AEROGERADOR TW-250 .....	141



FIGURA 5.3 – PARQUE EÓLICO DE PALMAS – PR .....	151
FIGURA 5.4 –CURVA DE COEFICIENTE DE POTÊNCIA PARA O AEROGERADOR E-40 .....	154
FIGURA 5.5 CURVA DE POTÊNCIA PARA O AEROGERADOR E-40 .....	154
FIGURA 5.6 – DENSIDADE DE PROBABILIDADE DA VELOCIDADE DO VENTO ..	164
FIGURA 5.7 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 1 .....	165
FIGURA 5.8 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 2 .....	166
FIGURA 5.9– REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 3 .....	167
FIGURA 5.10 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 4 .....	168
FIGURA 5.11 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 5 .....	169
FIGURA 5.12 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 6 .....	170

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC/DC/AC	<i>Alternate Current/Direct Current/ Alternate Current</i>
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AIDS	Síndrome da Deficiência Imunológica Adquirida
AIE	Agência Internacional de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional de Petróleo
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BSRN	<i>Baseline Surface Radiation Network</i>
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CEPETEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CHESF	Centrais Elétricas do São Francisco
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico e Científico
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito
CSCF	<i>Constant Speed Constant Frequency</i>
DEWI	<i>Deutsches Windenergie –Institut (Instituto Alemão de Energia Eólica)</i>
DEWIA	<i>Danish Wind Industry Association</i>
DFIG	<i>Double Fed Induction Generator</i>
DOIG	<i>Double Output Induction Generator</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
EWEA	<i>European Wind Energy Association</i>
FAE	Fontes Alternativas de Energia
FMI	Fundo Monetário Internacional
IAPAR	Instituto Agrônomo do Paraná
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICONS	Conferência Internacional de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável e Qualidade de Vida
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IHA	<i>International Hydropower Association</i>
IAG	Instituto de Astronomia e Geofísica
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LCA	<i>Life-cycle Assessment</i>
MC	<i>Morro do Camelinho</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
NWCC	<i>National Wind Coordinating Committee</i>
OCED	Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento
ONU	Organização das Nações Unidas
PBA	Plano Ambiental Básico
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
P & D	Pesquisa e Desenvolvimento
PEME'S	Programas de Eficiência para as Pequenas e Médias Empresas
PIB	Produto Interno Bruto
PROCEL	Programa de Conservação de Energia Elétrica
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
SIN	Sistema Interligado Nacional
TGS	Teoria Geral de Sistemas
UFC	Universidade do Ceará
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USP	Universidade de São paulo
UHE	Usina Hidrelétrica

UNDP	<i>United Nation Development Program</i>
USP	Universidade de São Paulo
UTE	Usina Termelétrica
UTH	Usinas Termelétricas Híbridas
VSCF	<i>Variable Speed Constant Frequency</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

## LISTA DE VARIÁVEIS

$v$	Velocidade do vento (m/s)
$v_1$	Velocidade na altura $h_1$ (conhecida) (m/s)
$v(z)$	Velocidade na altura $z$
$h_1$	Altura em que ocorre velocidade $v_1$
$z$	Altura de referência
$v_1/v(z)$	Velocidade na altura $h_1/z$ (conhecida) (m/s)
$h_1/z$	Altura em que ocorre velocidade $v_1$ , altura de referência
$h$	Altura para a qual se quer determinar a velocidade $v(h)$ ,
$v(h)$	Velocidade na altura $h$ .(m/s)
$\alpha$	Coefficiente dependente da natureza (rugosidade) do terreno,
$z_0$	Altura da aspereza obtida em função do tipo de solo
$\bar{u}$	Velocidade média do vento .(m/s)
$f(\bar{u})$	Função densidade de probabilidade da ocorrência da velocidade $\bar{u}$ (Weibull)
$k$	Fator de forma (Distribuição Weibull)
$c$	Velocidade característica (Distribuição Weibull)
$u_{ma}$	Velocidade do vento média anual .(m/s)
$\sigma^2$	Variância
$\Gamma$	Função Gamma.
$\omega$	Velocidade de rotação na extremidade da pá (rd/s)
$r$	Raio da turbina / comprimento da pá (m)
$v$	Velocidade do vento (m/s)
$\lambda$	Velocidade específica ou razão de velocidades na ponta da pá ( <i>TSR – Tip Speed Ratio</i> )
$C_p$	Coefficiente de potência
$\lambda_0$	Valor de $\lambda$ para o qual se verifica a máxima eficiência na conversão de energia
$n$	Número de pás da turbina
$w$	Vetor velocidade relativa do vento que atua no elemento da pá
$v_p$	Velocidade do vento
$v_t$	Velocidade tangencial da pá
$\alpha$	Ângulo de ataque

$\beta$	Ângulo de passo
$F$	Vetor força que atua na pá
$D$	Força de resistência ou força de arraste
$L$	Força de sustentação
$N$	Componente da força $F$ na direção do plano de rotação da turbina
$T$	Componente da força $F$ na direção perpendicular ao plano de rotação da turbina
$C_L$	Coefficiente de sustentação
$C_D$	Coefficiente de arraste
$a$	Área da seção da pá
$P$	Potência teórica (watt)
$m$	Massa (kg)
$\rho$	Massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )
$W$	Trabalho (J)
$E_c$	Energia cinética
$A$	Área varrida pelo rotor ( $\text{m}^2$ )
$\Delta t$	Intervalo de tempo (s)
$M'$	Vazão mássica (kg/s)
$P_m$	Potência mecânica no veio da turbina
$P_{disp}$	Potência disponível no vento para a velocidade $v$ .
$P_e$	Potência elétrica fornecida aos terminais do gerador
$FC$	Fator de capacidade, fator de aproveitamento ou rendimento aerodinâmico.
$\eta_m$	Eficiência da caixa multiplicadora
$\eta_g$	Eficiência do gerador elétrico
$P_e(\bar{u})$	Característica elétrica (Potência) do sistema de conversão de energia eólica
$u_0$	Velocidade de <i>cut-in</i>
$u_{max}$	Velocidade de <i>cut-out</i> .
$E_a$	Energia produtível anualmente (8760 h)
$f_r(\bar{u})$	Frequência relativa de ocorrência da velocidade média do vento

## RESUMO

A queima de combustíveis fósseis para a geração de energia, ao emitir dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, constitui a principal causa do efeito estufa e do conseqüente aquecimento global. Cinco anos após a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92) foi concluído o documento conhecido como Protocolo de Kyoto estabelecendo objetivos de fixar compromissos de redução e limitação da emissão de dióxido de carbono e outros gases responsáveis pelo efeito estufa para os países desenvolvidos. Esse protocolo entrou em vigor em fevereiro de 2005, com a ratificação da Rússia. O cumprimento dos objetivos impostos por esse tratado será muito difícil se não houver uma vontade firme no desenvolvimento das energias renováveis através da adoção de uma nova política energética. Despontando como uma das principais fontes alternativas de energia, a energia eólica tem se destacado pelo reduzido impacto sobre o meio ambiente, pela sua base tecnológica industrial, pela experiência e confiabilidade adquiridas nos últimos 20 anos de operação de grandes sistemas ao redor do mundo. Neste contexto, esta pesquisa tem por objetivo avaliar a utilização dessa tecnologia de geração de energia elétrica através da análise da implantação e operação de dois projetos desenvolvidos no Brasil pela CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) e COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica). Esses projetos são respectivamente a Usina Elétrica Eólica (UEE) Experimental do Morro do Camelinho, construída em Minas Gerais, e a Usina Elétrica Eólica (UEE) de Palmas, localizada no Paraná. Para tanto, foram obtidos os dados físicos e técnicos dos arranjos bem como os dados operativos referentes ao período de 1994 a 1997 da UEE Morro do Camelinho, e do período de 1998 a 2004 da UEE Palmas. Avaliou-se também a produção de energia, através de simulação de implantação de usinas de porte semelhante em outras localidades do Paraná com potencial eólico passível de exploração.

## ABSTRACT

Fossil fuel burning for energy generation, emitting carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), is the main cause of the green-house effect and global warming. Five years after the Conference of the United Nations on Environment and Development (Rio-92) the document named "Protocol of Kyoto" was concluded establishing objectives to developed countries limiting emissions of  $\text{CO}_2$  and other gases responsible for the green house effect. That protocol went into effect in February of 2005 with Russia's ratification. It will be very difficult to comply with the agreement policy if there is not a strong will to develop renewable energy by means of a new source of energy. Wind energy is one of the most promising alternative energy source, due to its reduced impact on the environment, its technological basis, the experience and knowledge acquired in the last 20 years operating important Wind Power Systems around the world. In this context, this research's purpose is to evaluate the use of wind energy technology for electrical energy generation through the analysis of the development and operation of two real projects in Brazil owned by CEMIG (Electric Power Utility of Minas Gerais) and by COPEL (Electric Power Utility of Paraná). Those projects are respectively the Morro do Camelinho Experimental Wind Power Plant (WPP), in the State of Minas Gerais, and the WPP of Palmas located in the State of Paraná. The project's physical and technical data were obtained and analyzed as well as the operative data for the period of 1994 to 1997 for Morro do Camelinho WPP, 1998 to 2004 for Palmas WPP. The energy production, simulating similar WPP, at other locations within the State of Paraná with feasible wind power potential has also been evaluated.



## 1. INTRODUÇÃO

O acesso à energia é base importante da existência humana; essencial à satisfação de necessidades básicas tais como, alimentação, vestuário, habitação e também de mobilidade e de comunicação. Porém, a dependência mundial da queima de combustíveis fósseis para a geração de energia e suprimento de uma demanda sempre crescente, tanto nos países industrializados como naqueles em desenvolvimento, já ameaça a estabilidade ecológica da Terra. Ao mesmo tempo, os conflitos pela distribuição das últimas reservas destes recursos não renováveis ameaçam a sociedade civil.

Soma-se à espantosa velocidade em que a humanidade consome as fontes energéticas e à evidente devastação da natureza, uma distribuição desigual no consumo e no acesso à energia. Os países industrializados, apesar de abrigarem apenas 21% da população mundial, consomem 70% das fontes convencionais de energia e 75% da eletricidade, enquanto 2 bilhões de seres humanos, nos países em desenvolvimento, vivem privados do acesso a energia (FHB e CRV, 2002).

Para o século XXI, estima-se o declínio das reservas petrolíferas, o que demandará ajustes, queda no consumo e inflexões radicais, sob pena de colapso do sistema econômico, social e político. A capacidade de encontrar substitutos para as fontes de energia não renováveis, de reduzir desperdícios e promover a conservação dos recursos naturais será estratégica e crucial para a sobrevivência da civilização pós-industrial.

A sustentabilidade depende também da base cultural, fundada em padrões de consumo e estilos de vida globalmente perduráveis. Tal não ocorre com o modelo de desenvolvimento dos países industrializados, que considera os recursos naturais inesgotáveis explorando-os de forma predatória. Se esse modelo fosse adotado por toda humanidade, levaria à exaustão dos recursos do planeta. Atualmente, os 25% mais ricos da população mundial consomem 80% dos recursos; existem 158 bilionários, 2 milhões de milionários e 1,1 bilhão de pessoas miseráveis que vivem com menos de 1 dólar por dia (RIBEIRO, 2003). Essa tendência de exploração dos recursos naturais – que tem causado desde a perda de florestas até as mudanças climáticas – sinaliza para a corrosão crescente do modelo de desenvolvimento do século XX. Esse modelo, utilizado igualmente por nações em desenvolvimento e industrializadas, é intensivo no

uso de materiais, movido por combustíveis fósseis, baseado em consumo e despejo em massa e orientado, principalmente, para o crescimento econômico – com atenção insuficiente para atendimento das necessidades do ser humano.

A Conferência sobre Biosfera realizada em Paris em 1968 marcou o despertar de uma consciência ecológica mundial, assim como a primeira Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente, realizada em Estocolmo em junho de 1972, veio colocar a questão ambiental nas agendas oficiais internacionais (ANDRADE et al., 2000).

Foi a primeira vez que representantes de governos se uniram para discutir a necessidade de tomar medidas efetivas de controle dos fatores que causam degradação ambiental. Neste contexto alguns países afirmaram que a solução da poluição não era frear o desenvolvimento e sim orientar o desenvolvimento para preservar o meio ambiente e os recursos não renováveis (ANDRADE et al., 2000). De acordo com HAWKEN et al. (1999), os fatores limitadores do desenvolvimento econômico futuro são a disponibilidade e a funcionalidade dos recursos naturais. Os sistemas de negócios e crescimento populacional mal concebidos ou mal projetados, assim como os padrões dissipadores de consumo, são as causas primárias da perda dos recursos naturais, sendo que os três fatores devem tentar alcançar a economia sustentável.

Em 1992, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92), contestou esse modelo e ofereceu uma alternativa abrangente. Convocou a família humana para uma nova experiência – o desenvolvimento sustentável. Dez anos após a reunião histórica no Rio de Janeiro, o mundo começou a responder a esse chamado – mas apenas de forma experimental e desigual. As medidas adotadas nos anos 90, voltadas para um mundo mais justo e ecologicamente resiliente, foram muito poucas, muito lentas ou muito mal aprofundadas (GARDNER, 2002).

O termo desenvolvimento sustentável surgiu pela primeira vez em 1987, com o relatório Brundtland, “Nosso Futuro Comum”, e foi amplamente adotado no contexto da Rio-92. A idéia de sustentabilidade apresentou, inicialmente, um cunho notadamente econômico, a ponto de alguns pensarem ser possível prescindir dos fundamentos da ecologia nas práticas sustentáveis. A exclusão de grupos sociais dos benefícios do crescimento econômico levou a realçar a dimensão social do conceito. A preocupação com os efeitos de médio e longo prazo da exploração da natureza conduziu à

introdução da dimensão temporal, da durabilidade da dinâmica do desenvolvimento e dos direitos das futuras gerações (ANDRADE et al., 2000). O processo de mudança do antigo paradigma para o novo – o da sustentabilidade – está em andamento e envolve todas as áreas do pensamento e da ação humana (ALMEIDA, 2002).

As recomendações da Conferência de Estocolmo serviram de base para a Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento realizada no Rio de Janeiro em junho de 1992. Os documentos resultantes da Rio 92 foram a Carta da Terra (rebatizada de Declaração do Rio) e a Agenda 21.

A Declaração do Rio visa “estabelecer acordos internacionais que respeitem os interesses de todos e protejam a integridade do sistema global de ecologia e desenvolvimento”. A Agenda 21 dedica-se aos problemas da atualidade e almeja preparar o mundo para os desafios do próximo século. Ela reflete o consenso global e compromisso político objetivando o desenvolvimento e o compromisso ambiental (ANDRADE et al., 2000).

A sustentabilidade ambiental está, cada vez mais relacionada à capacidade de suporte dos ecossistemas associados de absorver ou se recuperar das agressões derivadas da ação humana, implicando um equilíbrio entre as taxas de emissão e/ou produção de resíduos e as taxas de absorção e/ou regeneração da base natural de recursos. Para que uma forma de vida social seja sustentável, é preciso que a taxa de utilização dos recursos seja no mínimo igual a de reposição ou geração de substitutos para esses recursos. Se essas condições não forem alcançadas, haverá crescente deteriorização ambiental e diminuição da base de recursos (RIBEIRO, 2003).

Cinco anos após a Conferência do Rio de Janeiro, as alterações climáticas estiveram novamente no centro dos debates internacionais, devido à "Terceira Conferência das Partes na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas", realizada em Kyoto em dezembro de 1997.

O documento conhecido como Protocolo de Kyoto foi concluído no dia 11 de dezembro estabelecendo os seguintes objetivos: i) Fixar compromissos de redução e limitação da emissão de dióxido de carbono e outros gases responsáveis pelo efeito estufa para os países desenvolvidos, buscando –se atingir no período de 2008 a 2012, emissões com valores 5 % inferiores aos registrados em 1990 e ii) Possibilitar a utilização de mecanismos de flexibilidade para que os países em desenvolvimento possam atingir os objetivos de redução de gases do efeito estufa.

Em fevereiro de 2005 entrou em vigor o Protocolo de Kyoto com a ratificação da Rússia ao documento ambiental internacional mais importante da atualidade. Finalmente, as metas estabelecidas no tratado terão que ser cumpridas pelas 141 nações que confirmaram a adesão ao tratado, com exceção dos Estados Unidos, sendo elas representantes de 61.6% de toda a emissão de gases do efeito estufa do planeta, como o dióxido de carbono e o gás metano.

Para que os objetivos impostos pelo Protocolo de Kyoto possam ser atingidos faz-se necessária uma revolução energética tão profunda e veloz como a que impulsionou a era do petróleo um século atrás (FLAVIN & DUNN, 2003). Este novo sistema energético, altamente descentralizado, eficiente e baseado cada vez mais em recursos renováveis, já começa a surgir em diversas partes do mundo.

Nakicenovic (2002) define energia sustentável como aquela que é obtida e utilizada de forma que simultaneamente atenda ao desenvolvimento humano no longo prazo nas dimensões social, econômica e ambiental. Neste sentido, as energias alternativas vêm de encontro à necessidade atual de promover desenvolvimento com sustentabilidade.

Despontando como uma das principais fontes alternativas de energia, a energia eólica tem-se destacado pelo reduzido impacto sobre o meio ambiente e sobre comunidades vizinhas, pela sua base tecnológica industrial, pela experiência e pela confiabilidade adquiridas nos últimos 20 anos de operação de grandes sistemas no mundo, principalmente na Europa e Estados Unidos.

Neste contexto, esta pesquisa tem por objetivo avaliar a utilização da tecnologia de geração de energia elétrica utilizando o potencial eólico através da avaliação da operação de dois projetos eólicos brasileiros. O primeiro projeto estudado foi a Usina Elétrica Eólica (UEE) Experimental do Morro do Camelinho, construída em Minas Gerais pela CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) e o segundo é a Usina Elétrica Eólica (UEE) de Palmas localizada no Paraná construída pela COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica). Para desenvolvimento da pesquisa foram utilizados os dados físicos e técnicos dos arranjos bem como os dados operativos referentes ao período de 1994 a 1997 da UEE Morro Camelinho, e do período de 1998 a 2004 da UEE Palmas., Através de simulação, procurou-se também avaliar a produção de energia resultante da implantação de usinas de porte semelhante em outras

localidades do Paraná com potencial eólico passível de exploração obtidas do mapeamento desenvolvido pelo projeto VENTAR desenvolvido pela COPEL em 1996.

Para uma razoável compreensão do processo de geração de energia elétrica utilizando o potencial eólico, é apresentada nos capítulos 2 a 4 a revisão da literatura referente ao tema. O capítulo 2 discorre sobre a geração de energia. O capítulo 3 detalha as energias renováveis e o capítulo 4 descreve a energia eólica e a metodologia de avaliação da produção de energia eólica através de cálculos energéticos.

No capítulo 5, são apresentadas análises da operação da UEE Morro do Camelinho e UEE Palmas com o objetivo de verificação dos resultados obtidos no funcionamento das usinas durante os períodos para os quais se obteve as informações, tendo em vista os resultados esperados em função das características dos locais dos empreendimentos e os dados dos aerogeradores fornecidos pelos fabricantes.

Neste capítulo, também são apresentadas simulações do aproveitamento do potencial eólico das localidades de Santo André, Ilha do Mel, Palmas e Morro Perdidos, que apresentam condições para a exploração deste recurso, as quais foram escolhidas através do Mapa do Potencial Eólico do Estado do Paraná desenvolvido pela COPEL.

No capítulo 6, são apresentadas as análises dos resultados da avaliação da operação das duas usinas em questão bem como a análise dos resultados das simulações propostas.

Finalmente, no capítulo 7, são apresentadas considerações finais da pesquisa bem como recomendações para futuros estudos.

## **2. GERAÇÃO DE ENERGIA**

### **2.1. ENERGIA**

Os físicos foram os primeiros a dar uma definição científica do conceito de energia. Esta noção foi elaborada no século XVIII, a partir da idéia de trabalho mecânico; sua extensão ao calor data do século XIX (DEBEIR et al., 1993). Como definição geral pode-se dizer que energia é "a capacidade de um sistema de realizar trabalho". O movimento mecânico, a radiação, o calor, aparecem como formas diferentes de um mesmo fenômeno, a energia, medida por uma unidade comum (caloria, Joule, Tep etc.). Essa equivalência foi expressa, em meados do século XIX, pelo primeiro princípio da termodinâmica, segundo o qual a energia de um sistema isolado não pode ser criada nem destruída. No caso de sistemas abertos a variação de energia é igual a diferença entre o calor fornecido e o trabalho realizado.

A segunda lei da termodinâmica afirma que a utilização da energia (realizada mediante a conversão de uma forma de energia em outra) no caso da conversão de calor em trabalho não pode ser realizada com 100% de eficiência (LORA, 2002).

Quando se transforma a energia tendo em vista determinada utilização, usa-se um conversor, por exemplo, uma central termelétrica transforma em eletricidade a energia química contida no carvão, no óleo combustível ou no gás natural; um motor transforma esta eletricidade em energia mecânica. A quantidade de energia útil final é sempre inferior à quantidade de energia bruta inicial, resultando num fator de rendimento que é sempre inferior a 100%. Este resultado foi formulado por Carnot em 1824, como resultado da observação do rendimento muito baixo das máquinas a vapor construídas na época. Este princípio, conhecido como a Segunda Lei da Termodinâmica, introduz o conceito de entropia, que é um conceito de qualidade de energia, uma medida da capacidade de um sistema de transformar o calor, considerado como uma forma degradada de energia em energia mecânica (DEBEIR et al., 1993).

Finalmente, a termodinâmica foi condensada em dois princípios: que a energia de um sistema isolado é constante e que se degrada continuamente. O enunciado destes dois princípios mostra que o problema com o qual a humanidade se defronta não é o da conservação da energia, mas o da conservação de uma certa quantidade do seu dote energético, ou seja, da sua capacidade de fornecer trabalho útil. Deste ponto

de vista, o segundo princípio fornece os fundamentos racionais de uma "boa política" da energia: como tirar, de nosso dote energético, o máximo de energia útil sob forma de trabalho, iluminação, alimentação, dentre outros.

A noção de sistemas surgiu na primeira metade do século XX, com os trabalhos de Köhler (1924) na Física, Lotka (1925) definindo o conceito geral de sistemas e Von Bertalanffy (1968) que propôs uma Teoria Geral de Sistemas (TGS) de aplicação em diversas áreas de conhecimento, principalmente na biologia. Na hierarquia de sistemas proposta por Von Bertalanffy (1968) e Boulding (1956), distinguem-se sistemas dos mais simples aos mais complexos, sendo feita uma distinção básica entre sistemas fechados e abertos, onde os primeiros são considerados isolados do seu entorno e os últimos permitindo relações de troca entre o sistema e o meio (KRÜGER, 2001).

Segundo os conceitos da TGS, a Terra é um sistema energeticamente aberto (VON BERTALANFFY, 1973). Toda a vida provém da energia do Sol: os raios solares são captados pelas plantas, que os transformam, pelo mecanismo da fotossíntese, em florestas, campos, algas, plâncton marinho etc. Esta vegetação é consumida pelos animais e pelo homem, incapazes por si mesmos, de consumir a energia solar como as plantas (campos, florestas, plânctons), que realizam a fotossíntese. Os conceitos energéticos permitem assim representar de uma forma simplificada o funcionamento piramidal de um ecossistema: na base, as plantas, que captam a energia solar e fabricam seu próprio combustível, do qual uma parte é para seu consumo, outra é capturada pelos animais herbívoros e o restante se degrada. A fração do combustível capturada pelos herbívoros é utilizada de forma análoga, seus predadores a capturam, até o topo da cadeia ecológica ocupada pelos grandes predadores e pelo homem. Os ecossistemas aparecem assim como comunidades complexas de consumidores de energia. O conhecimento do modo como funcionam estas comunidades é de grande importância teórica e prática, porque o futuro do homem está ligado à eficiência com que os ecossistemas armazenam energia (DEBEIR et. al., 1993).

Compreender a natureza biológica da espécie humana inserida nos ecossistemas terrestres permite perceber melhor em que somos diferentes de outras espécies animais. Todas as espécies, inclusive o homem, adaptaram-se a mutações vantajosas que permitiram o aparecimento e o desenvolvimento de órgãos diversos qualificados de endossomáticos (mutação), cuja característica principal é a lentidão em relação à rapidez das modificações culturais das sociedades humanas que souberam

dotar-se de órgãos exossomáticos, que são os instrumentos, máquinas etc. Este fato demonstra a grande especificidade da espécie humana, em relação ao conjunto do reino animal, que é a capacidade de definir seus próprios fins, independentes de qualquer programação genética, daí a originalidade das sociedades humanas no plano da utilização da energia: a invenção dos órgãos exossomáticos e a busca permanente de quantidades adicionais de energia livre para acionar estes instrumentos.

A transformação de uma dada quantidade de energia natural (radiação solar, carvão, lenha) em trabalho ou energia intermediária ou final, ou seja, suscetível de satisfazer certas necessidades como alimentação, aquecimento, acionamento de uma máquina, depende de uma cadeia de conversores.

A transformação de um tipo de energia em outra pode se processar diretamente ou de forma indireta com estágios de calor ou trabalho. Por exemplo, a energia química existente num combustível através da combustão se transforma em calor. Através de uma máquina térmica o calor é transformado em trabalho mecânico que por sua vez através de um gerador transforma-se em energia elétrica. Evidentemente, o que importa é o rendimento global da cadeia, que é o produto dos rendimentos do conjunto de conversores.

De um modo geral, a cadeia de conversores deve preencher três objetivos (DEBEIR et al., 1993):

- Uma concordância de qualidade: não se pode produzir qualquer tipo de energia final a partir de qualquer tipo de energia bruta. No atual estágio tecnológico, a energia final deve atender às necessidades específicas (alimentação, aquecimento, trabalho mecânico etc.) e sem certos conversores é impossível utilizar certos recursos naturais, como, por exemplo, não se podia converter energia eólica em energia mecânica antes do moinho de vento;
- Uma concordância de lugar: uma comunidade humana (um centro urbano) precisa da energia no seu local de residência. O problema fundamental é o transporte da energia (lenha, por exemplo) que durante milênios foi um obstáculo ao desenvolvimento. Um dos aspectos importantes da revolução industrial foi a grande queda do custo do transporte da energia;
- Uma concordância de tempo: as necessidades energéticas obedecem a certas restrições no tempo: o suprimento de alimentos deve ser contínuo,



enquanto as colheitas são concentradas em um período do ano, as necessidades de aquecimento são maiores no inverno. Realizar esta concordância implica no estabelecimento de sistemas de armazenamento e de distribuição, esta restrição temporal requer o superdimensionamento dos meios de armazenamento (reservatórios de acumulação nas hidrelétricas) e de distribuição para fazer frente às pontas de demanda ou fatores aleatórios como o clima.

A maior parte das reflexões sobre a importância da energia em nossas sociedades restringe-se a pontos de vista parciais. Para evitar essa armadilha, é útil uma abordagem sistêmica introduzindo o conceito de Sistema Energético, que inclui de um lado as características ecológicas, econômicas e tecnológicas da energia (evolução das fontes, dos conversores, do rendimento) e de outro, as estruturas sociais de apropriação e gestão destas fontes e conversores (VON BERTALANFFY, 1973).

Um Sistema Energético é a combinação original de diversas linhas de conversores que se caracterizam pela utilização de determinadas fontes de energia e sua interdependência, pela iniciativa e sob o controle de classes ou grupos sociais, os quais se desenvolvem e se reforçam com base nisso. Os sistemas energéticos têm, portanto, sua dinâmica própria. É levando em conta essa dinâmica que uma sociedade tenta resolver seus problemas com uma alternativa técnica e socialmente aceitável: assim funcionaram, há um milênio, na Europa, as dinâmicas da energia muscular, hidráulica e eólica, e após o início da Revolução Industrial, a do carvão e dos hidrocarbonetos. Após a 2ª. Guerra Mundial a energia nuclear (urânio) passou a exercer também um papel importante (DEBEIR et al., 1993).

## **2.2. FONTES DE ENERGIA PRIMÁRIA**

A Terra pode ser considerada como um grande e complexo sistema no qual vastas quantidades de energia fluem constantemente de uma parte para outra, ou seja, dentro e na superfície do planeta, onde a matéria é movida lentamente. Ao longo da história do planeta, existiram duas fontes principais de energia que produzem calor e dirigem estes movimentos. Estas fontes são a energia radiante do Sol e energia geotérmica proveniente do interior da Terra. A energia solar é responsável por dirigir as mudanças na atmosfera, na hidrosfera, na biosfera, e até alguns metros abaixo na litosfera (CRAIG, VAUGHAN & SKINNER, 2001).

A energia solar se manifesta de várias formas, desde os ventos na atmosfera e precipitação e escoamento nos rios bem como correntes dos oceanos na hidrosfera, até fotossíntese das plantas na biosfera. A transformação da energia solar em movimento na forma de vento e produção de chuva, que alimenta e movimentam a água nos rios, apresenta formas de energia cinética que podem ser convertidas diretamente em trabalho, movimentando moinhos de vento ou girando turbinas hidráulicas.

Pela fotossíntese, parte da energia solar é armazenada na forma de moléculas de hidrocarbonetos que formam as plantas. Essa energia pode ser aproveitada mediante a queima da biomassa e, com o calor resultante propulsar máquinas, ou então usar o calor gerado para converter água em vapor, que pode também mover uma turbina. A sociedade moderna confiou principalmente na energia fóssil existente no petróleo, no carvão e no gás natural, mas agora, no início do século 21, começou a aproveitar a energia solar mais diretamente através de coletores e células fotovoltaicas.

A energia geotérmica existente no interior de Terra na forma de calor é derivada da desintegração natural de elementos radioativos como urânio e tório. Quando o processo de desintegração de elementos radioativos é acelerado por condições artificiais, como fissão nuclear, têm-se as usinas termonucleares (CRAIG, VAUGHAN & SKINNER, 2001).

Uma terceira fonte de energia vem do movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo e da interação gravitacional entre a Terra e a Lua que produzem as marés das quais se origina a energia maré-motriz.

As fontes de energia primária disponíveis para uso são freqüentemente categorizadas como renováveis ou não renováveis. Putnam (1953) usou a definição “*renda ou aporte de energia*” para os recursos de energia renováveis, que incluem os recursos que estão sendo continuamente renovados pela presença de forças relativas como a maré, vento, quedas d’água, gradientes térmicos no oceano, aquecimento geotérmico, energia solar e a geração por biomassa (PUTNAM, apud HENRY & HEINKE, 1996, p.50).

“*Capital de energia*” foi o termo utilizado para os recursos de energia não renováveis, referindo-se principalmente a combustíveis fósseis que foram depositados na terra há centenas de milhões de anos atrás ou para minerais radioativos que estavam presentes quando o planeta foi formado (HENRY & HEINKE, 1996). Quando tais materiais são extraídos, a quantidade de capital de energia é reduzida. De fato, os

combustíveis fósseis estão sendo substituídos na natureza, mas a uma taxa tão lenta com relação à escala de tempo do desenvolvimento humano, que é praticamente insignificante. Conseqüentemente, óleo, gás natural e carvão podem ser considerados não renováveis no senso prático (TWIDELL & WEIR, 1986). O urânio e o tório dos combustíveis radioativos não estão sendo reabastecidos. Ao longo de muito tempo, medido em bilhões de anos, eles estão sendo transformados por processos de deterioração radioativa a elementos estáveis. As fontes de energia disponíveis atualmente são listadas como renováveis ou não renováveis na Tabela 2.1 (HENRY & HEINKE, 1996).

**TABELA 2.1 – FONTES DE ENERGIA DISPONÍVEIS**

<b><i>Renováveis (renda de energia)</i></b>	<b><i>Não renováveis (capital de energia)</i></b>
Energia hidrelétrica	Termoelétrica a partir de combustíveis fósseis: - Óleo Cru - Gás Natural - Carvão - Óleo Sintético (de areias e de xisto)
Energia de marés	
Biomassa	
Eólica	
Energia Solar	Termoelétrica nuclear
	Energia geotérmica

FONTE: HENRY & HEINKE, 1996.

### **2.3. TENDÊNCIAS ENERGÉTICAS GLOBAIS**

De acordo com as mais recentes estatísticas apresentadas pela Agência Internacional de Energia (IEA) na publicação “*World Energy Outlook - WEO*” (Perspectiva Mundial de Energia), de 2002, as principais tendências para os próximos 30 anos são:

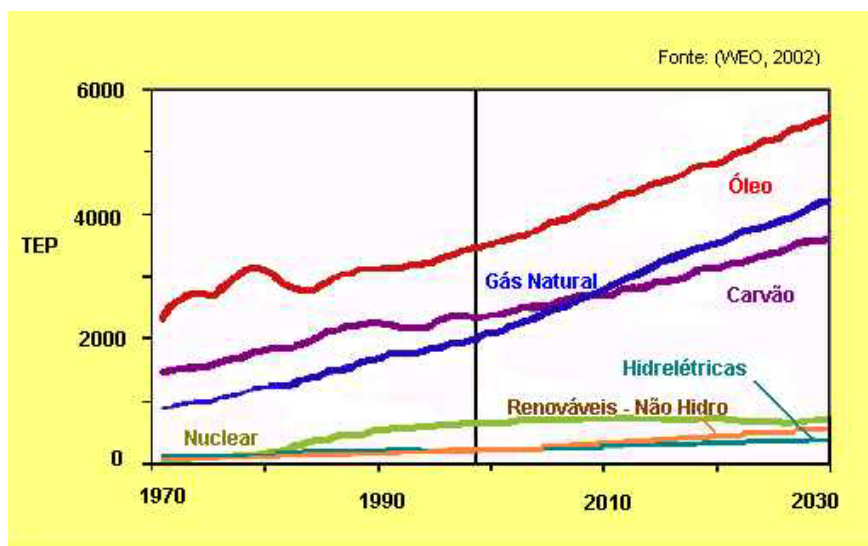
- A demanda de energia mundial crescerá em dois terços;
- Os combustíveis fósseis continuarão dominando o *mix* de energia;
- Quase dois terços do crescimento na demanda de energia acontecerá em países em desenvolvimento;
- O financiamento exigido para implementação da nova infra-estrutura de energia é um desafio enorme e depende em grande parte nas condições dos sistemas articulados pelos governos;

- O comércio internacional de energia terá uma grande expansão;
- O crescimento da demanda de gás natural ultrapassará a de qualquer outro combustível fóssil, mas será ultrapassada pelo crescimento de demanda das energias renováveis;
- O transporte levará ao crescimento do uso de petróleo;
- O uso de eletricidade aumentará mais rapidamente que qualquer outro tipo de energia intermediária. Essa demanda de eletricidade foi calculada pela IEA e apresentada no WEO:

A eletricidade crescerá mais rapidamente que qualquer outra fonte de energia final, numa taxa média de 2,4% ao ano. A demanda de eletricidade mundial dobrará até 2030, enquanto sua parte no consumo de energia final total subirá de 18% em 2000 para 22% em 2030. O aumento maior na demanda acontecerá em países em desenvolvimento (IHA, 2002 p. 29).

A Figura 2.1 mostra a tendência mundial na demanda de energia primária.

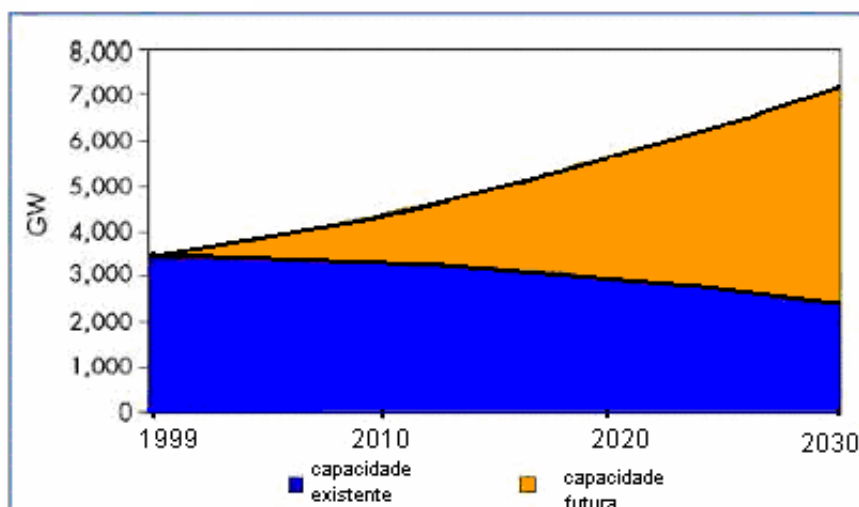
**FIGURA 2.1 – TENDÊNCIAS NA DEMANDA MUNDIAL DE ENERGIA PRIMÁRIA**



FONTE: WEO, apud IHA, 2003

De acordo com a *U. S. Energy Information Administration* (Administração de Informação de Energia Estadunidense) o consumo mundial de eletricidade subirá 73 por cento entre 1999 e 2020. A Figura 2.2 mostra a evolução da capacidade instalada de geração de eletricidade no mundo.

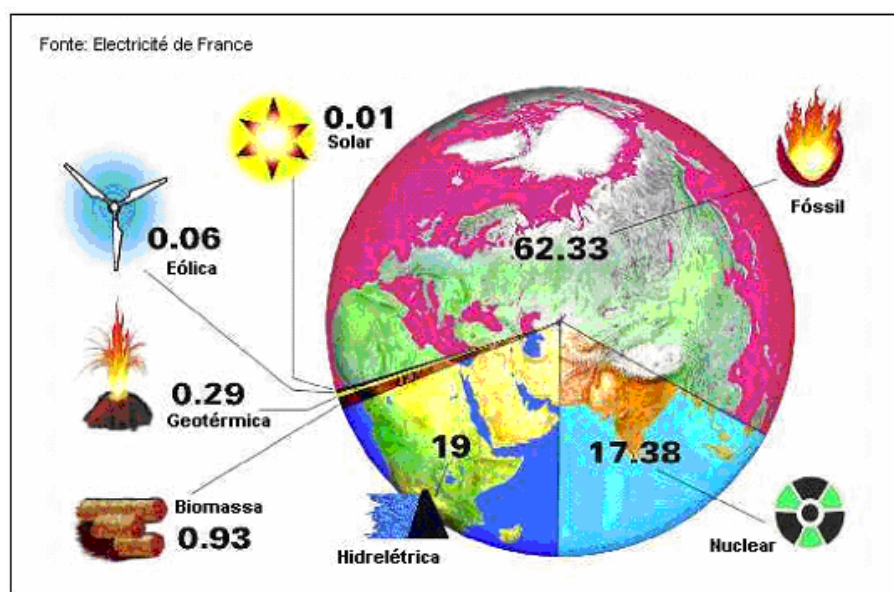
**FIGURA 2.2 - CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO NO MUNDO**



FONTE: IEA, apud IHA, 2003

A Figura 2.3 mostra que dois terços da eletricidade gerada no mundo no ano de 2000 ainda é proveniente de combustíveis fósseis, enquanto a hidreletricidade é responsável por quase toda a energia renovável.

**FIGURA 2.3 - ENERGIA GERADA NO MUNDO NO ANO 2000 (%) POR DIFERENTES FONTES**



FONTE: EDF, apud IHA, 2003.

## **2.4. ENERGIA ELÉTRICA**

A energia elétrica é uma energia secundária que pode ser obtida a partir das fontes energéticas primárias transformadas através de conversores. As conversões de energia primária em elétrica mais utilizadas atualmente são (CRAIG, VAUGHAN & SKINNER, 2001):

- Energia do potencial hidráulico da água;
- Energia térmica contida nos combustíveis fósseis e biomassa;
- Energia atômica de minerais radioativos;
- Energia geotérmica proveniente do interior da Terra
- Energia cinética dos ventos na atmosfera
- Energia cinética das correntes dos oceanos
- Energia solar diretamente através de coletores e dispositivos fotovoltaicos.

Nas duas últimas décadas vem se intensificando a utilização de outras energias renováveis, além da hidráulica, devido ao esgotamento das fontes de combustíveis fósseis. Dentre essas, destacam-se a geração de energia de origem do movimento das marés, do vento, do aquecimento geotérmico, a energia solar e a geração por biomassa, sendo que a energia eólica é a que mais tem se desenvolvido.

As fontes não renováveis utilizadas atualmente são: energia termelétrica de combustíveis fósseis, energia term nuclear e energia geotérmica. Essas fontes não serão descritas detalhadamente, pois não são o foco deste trabalho. As fontes de energia renováveis serão apresentadas de uma forma detalhada no capítulo 3.

## **2.5. ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

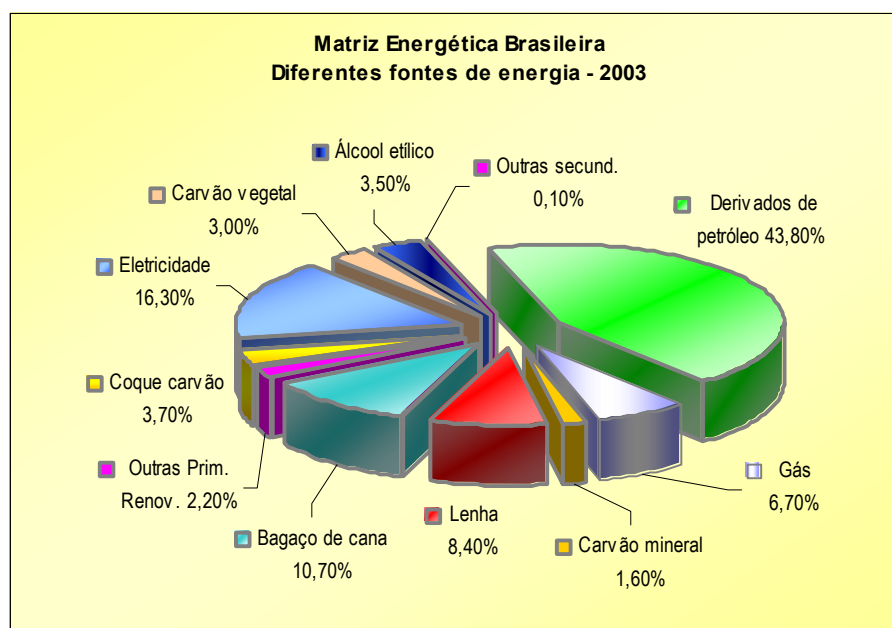
Segundo Balanço energético Nacional de 2004, publicado pelo Ministério de Minas e Energia – MME, a matriz energética brasileira apresenta uma composição conforme mostrado na Tabela 2.2 e Figura 2.4, destacando-se uma grande participação das energias renováveis representadas pela Hidroeletricidade e Biomassa (MME, 2004a).

**TABELA 2.2 – MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA**

<i>Fonte de energia</i>	<i>%</i>
Gás	6,7
Carvão mineral	1,6
Lenha	8,4
Bagaço de cana	10,7
Outras fontes prim. Renováveis	2,2
Coque de carvão mineral	3,7
Eletricidade	16,3
Carvão vegetal	3,0
Álcool etílico	3,5
Outras secundárias - alcatrão	0,1
Subtotal derivados de petróleo	43,8

FONTE: MME, 2004a.

**FIGURA 2.4 – MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA**



FONTE: MME, 2004a.

Por dispor da maior bacia hidrográfica do mundo e precipitação acima da média anual, é natural e compreensível que o Brasil tenha feito historicamente sua opção pelo

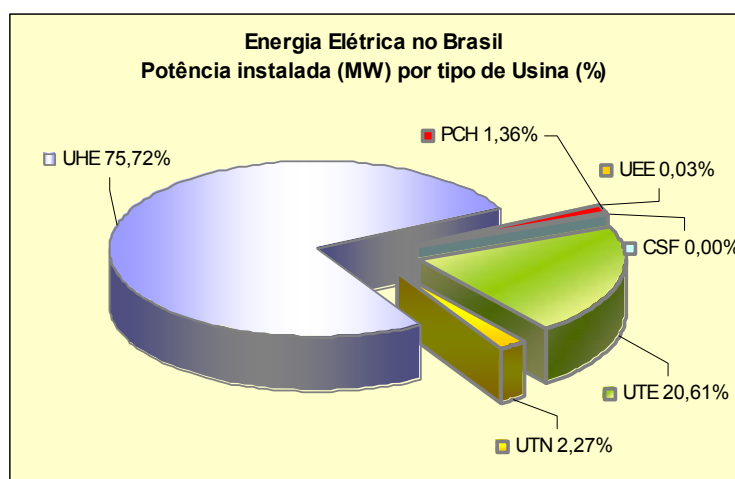
recurso hidroenergético. Hoje, a capacidade de geração do Brasil é representada pelas usinas hidrelétricas que dão sustentação ao desenvolvimento nacional e ao parque industrial brasileiro, respondendo por 75,62 % do total de energia gerada no país, segundo Tabela 2.3 e Figura 2.5 (ANEEL, 2004). As características físicas e geográficas do Brasil foram determinadas para implantação de um parque gerador de energia elétrica de base predominantemente hídrica. A energia de origem hídrica é hoje a segunda maior fonte de eletricidade no mundo e o Brasil, que detém 15% das reservas mundiais de água doce disponível, só utiliza um quarto de seu potencial.

**TABELA 2.3 – POTÊNCIA INSTALADA NO BRASIL POR TIPO DE USINA**

Tipo de Usina	Potência (MW)	%
UHE – Usinas Hidrelétricas	66.976	75,72
UEE – Usina Eólio-elétrica	29	0,03
PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas	1.207	1,36
CSF – Central Solar Fotovoltaica	0,02	0,00
UTE – Usina Termoelétrica	18.233	20,61
UTN – Usina Termonuclear	2.007	2,27
Total	88.452	100,00

FONTE: ANEEL, 2004.

**FIGURA 2.5 – ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**



FONTE: ANEEL, 2004.



## 2.6. ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

A civilização do combustível fóssil, iniciada no século XIX, teve seu apogeu no final do século XX e tende a declinar em poucas décadas. A diminuição dos estoques de combustíveis fósseis exigirá que as sociedades alterem sua matriz energética, em direção a energias renováveis e com baixo impacto ambiental. Para ser sustentável e garantir o alimento necessário à população humana, o desenvolvimento precisa basear-se em padrões de consumo alimentar e energético que não esgotem as fontes de sustento humano. Noutras palavras, o desenvolvimento sustentável precisa basear-se numa matriz energética durável, apoiando-se sobre uma base de recursos naturais renováveis (RIBEIRO, 2003).

Durante a pesquisa sobre energia e sustentabilidade foram identificados três estudos importantes que tratam do tema, abordando diretrizes e políticas mundiais e para a América do Sul. O primeiro relatório, já referenciado em capítulos anteriores é o *“The Role of Hydropower in Sustainable Development - IHA White Paper”* elaborado pela, *International Hydropower Association*, e apresentado no III Fórum Mundial da Água realizado no Japão em março de 2003.

O segundo relatório, publicado no ano 2000, que também trata do tema no nível mundial é o *“World Energy Assessment – Energy and the Challenge of Sustainability”*, que foi patrocinado pelas Nações Unidas através do UNDP – *United Nations Development Program* e coordenado pelo Prof. José Goldemberg, da Universidade de São Paulo (USP).

O terceiro relatório, concluído em Novembro de 2002, *“Proyecto Cono Sur Sustentable - Propuestas de Políticas Energeticas Sustentables para el Cono Sur”*, foi desenvolvido com o apoio da Fundação Heinrich Böll e coordenação do Prof. Célio Bermann da USP e teve como objeto de estudo o setor energético da Argentina, Brasil, Chile, Paraguai e Uruguai.

A seguir, são apresentadas as principais considerações, conclusões e recomendações referentes à discussão sobre “Energia e Sustentabilidade” descritas nos três relatórios citados.

### **2.6.1. Energia e desenvolvimento sustentável: Enfoque da Associação Internacional de Hidroeletricidade - IHA.**

O primeiro relatório enfoca a energia como um bloco básico do edifício para o desenvolvimento. O acesso à energia disponível e confiável dá suporte a todos os objetivos do desenvolvimento sustentável, porém a pobreza é um desafio multifacetado e para que o problema seja enfrentado de uma forma adequada, são necessárias políticas específicas que contemplem todos os aspectos do mesmo. A eletrificação por si só não pode garantir promessas de desenvolvimento (IHA, 2003).

A IHA – *International Hydropower Association* em seu relatório *The Role of Hydropower in Sustainable Development* apresentou as metas internacionais de desenvolvimento definidas em conjunto por vários organismos internacionais que atuam em programas de desenvolvimento. As principais instituições de desenvolvimento internacional – incluindo as Nações Unidas (ONU), a Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OCED), o Fundo Monetário internacional (FMI) e o Banco Mundial – afirmam que estão trabalhando para desenvolver um conjunto de metas comuns de desenvolvimento internacional.

As discussões estão enfocando a integração destas metas de desenvolvimento internacionais com o conjunto de 7 proposições definidas na “Declaração do Milênio” pela ONU que são (IHA, 2003):

1. Erradicação da pobreza e da fome;
2. Alcance universal da educação primária;
3. Alcance de igualdade de gênero e direitos para as mulheres;
4. Redução da mortalidade infantil;
5. Melhoria da saúde materna;
6. Combate a AIDS, malária e outras doenças;
7. Assegurar sustentabilidade ambiental.

Enfrentar os desafios descritos acima é uma grande tarefa para a qual o sucesso depende de um contínuo e coordenado compromisso entre agências federais, governos estaduais e locais, comunidade científica, organizações não governamentais, e indústrias. Para tanto, torna-se também necessário o acompanhamento, sistematização e conhecimento sobre informações, processos e práticas ambientais globais e regionais para dar subsídios aos tomadores de decisão para que possam intervir nos processos

de gestão orientados para objetivos de ação que permitam a mobilização de recursos e forças sociais na busca da sustentabilidade.

Segundo a IHA (2003) a eletricidade representa um importante papel da no Desenvolvimento Sustentável contribuindo com os objetivos da Declaração do Milênio, conforme descrito na Tabela 2.4

A discussão sobre sustentabilidade apresentada pela IHA no relatório aqui discutido mostra como a energia pode contribuir para que as metas do desenvolvimento sustentável sejam atingidas. Analisando o papel da eletricidade nestas metas é possível identificar algumas diretrizes e indicadores que podem ser utilizados para compor uma lista de indicadores globais e regionais que permitam a quantificação desta contribuição.

### **2.6.2. Energia e desenvolvimento sustentável: Enfoque da ONU – Organização das Nações Unidas**

Ainda é possível um futuro sustentável? As análises efetuadas na elaboração do relatório “*World Energy Assessment – Energy and the Challenge of Sustainability*”, pela ONU utilizando cenários de energia indicaram que é possível reforçar os objetivos do desenvolvimento sustentável utilizando novos recursos de energia e opções tecnológicas. Essas análises sugerem que (UNDP, 2000):

- Continuar ao longo do caminho atual de desenvolvimento do sistema de energia não é compatível com os objetivos do desenvolvimento sustentável;
- A concretização de um futuro sustentável requererá maior confiança na combinação de eficiência mais alta de energia, recursos renováveis, e tecnologias de energia avançadas;
- Uma condição prévia para alcançar um futuro de energia compatível com objetivos de desenvolvimento sustentável está em encontrar formas de acelerar o progresso de novas tecnologias ao longo da cadeia de inovação de energia, de pesquisa e desenvolvimento, incentivo, e difusão destas tecnologias;
- Prover serviços de energia para áreas rurais é um desafio particular. Mas também oferecer oportunidade de melhoria considerável na qualidade de vidas de 1 bilhão de pessoas dentro de um período relativamente pequeno é

também parte do desafio. Propostas promissoras incluem soluções descentralizadas, tecnologias apropriadas, arranjos de crédito inovadores e envolvimento local na tomada de decisão.

Na elaboração dos cenários foram utilizados os indicadores de sustentabilidade apresentados na Tabela 2.5 (UNDP, 2000).

**TABELA 2.4 - A ELETRICIDADE E AS METAS DA DECLARAÇÃO DO MILÊNIO**

<i>A eletricidade e as metas da Declaração do Milênio</i>		
1	Reduzir pela metade a proporção de pessoas que vivem em pobreza extrema até 2015.	<p>Auxiliando no resgate das pessoas para fora de pobreza:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Provendo eletricidade relativamente barata e confiável</li> <li>▪ Energizando processos industriais e atividades comerciais que provêm oportunidades de emprego e renda</li> <li>▪ Proporcionando produtividade crescente estendendo tempo produtivo além do crepúsculo através da iluminação</li> <li>▪ Melhorando produtividade dando potência a eletrodomésticos elétricos mais eficientes</li> <li>▪ Facilitando bombeamento de água para uso doméstico</li> <li>▪ Aumentando segurança de produção de alimentos através sistemas de irrigação</li> <li>▪ Colaborando no desenvolvimento nacional, melhorando o PIB (Produto Interno Bruto)</li> </ul>
2	Alcance universal da educação primária em todos os países até 2015	<p>Oportunidades melhoradas para educação:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduzindo o tempo que as crianças e mulheres têm que gastar em atividades domésticas</li> <li>▪ Facilitando serviços básicos para o funcionamento de escolas</li> </ul>
3	Eliminando disparidade de gênero para todos os níveis de educação até 2015	
4	Reduzindo em dois terços a taxa de mortalidade de crianças abaixo de cinco anos até 2015	<p>Redução de mortalidade:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Facilitando serviços básicos para hospitais e dispensários</li> <li>▪ Melhorando qualidade do ar em recintos fechados e ao ar livre</li> <li>▪ Facilitando refrigeração confiável para armazenar medicamentos sensíveis como antibióticos e vacinas</li> </ul>
5	Reduzindo em três quartos a taxa de mortalidade materna até 2015	
6	Detendo e invertendo a expansão de HIV/AIDS, como também a incidência de malária e outras doenças até 2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Facilitando refrigeração adequada para armazenar medicamentos sensíveis como antibióticos e vacinas</li> <li>▪ Aumentando a consciência com relação aos fatores de risco, facilitando troca de informação por sistemas de comunicação</li> <li>▪ Contribuindo na infra-estrutura de programas de monitoramento da saúde</li> </ul>
7	Implementação de estratégias nacionais para desenvolvimento sustentável em todos os países até 2005, para assegurar que as tendências na perda de recursos ambientais sejam invertidas efetivamente nos níveis global e nacionais até 2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Evitando depleção de recursos naturais globais protegendo terras comuns através da escolha apropriada de opções de geração de eletricidade</li> <li>▪ Preservando ecossistemas vulneráveis de depleção de seus recursos evitando, por exemplo, o alagamento de bosques em regiões áridas.</li> </ul>

FONTE: IHA - *International Hydropower Association*, 2003.

**TABELA 2.5 – INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DEFINIDOS PELA ONU**

<b><i>INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE Utilizados nos cenários estudados pela WEA</i></b>
1. Erradicação da pobreza
2. Redução das diferenças relativas de renda
3. Promoção de acesso a energia universal
4. Crescimento da disponibilidade de energia
5. Redução de impactos adversos à saúde
6. Redução da poluição do ar
7. Limitar o uso de elementos radioativos de longa vida
8. Limitar uso de materiais tóxicos
9. Limitar emissões de gases efeito estufa (GHG – <i>Green house gas</i> )
10. Aumentar o uso de energia pelas populações nativas
11. Melhorar a eficiência do suprimento de energia
12. Crescimento da eficiência no uso final
13. Acelerar difusão de tecnologia
14. Independência do mercado internacional de energia
15. Promover maior eficiência energética
16. Incrementar confiança (dependência) de energias renováveis
17. Acelerar desenvolvimento e utilização de novas tecnologias de energia

FONTE: “*World Energy Assessment – Energy and the Challenge of Sustainability*” – UNDP, 2000.

#### **2.6.2.1. Políticas energéticas para o desenvolvimento sustentável**

As principais políticas que buscam evitar que se persevere ao longo de um padrão de energia que não é sustentável, sugeridas pelo grupo que desenvolveu o estudo são:

##### **a. Promover maior eficiência nos mercados de energia**

Políticas que reduzam as distorções de mercado promoveriam a obtenção de energia sustentável através de fontes renováveis, aplicação de medidas de eficiência energética, novas tecnologias com “emissões zero”, além de uma posição de mercado consideravelmente melhor relativa àquela de usos e práticas atuais.

**b. Complementar a reestruturação do Setor Energético com instrumentos regulatórios que encorajem a energia sustentável**

A reestruturação contínua pelo mundo inteiro da indústria de energia – em grande parte dirigida pela globalização crescente da economia – conduzirá para mercados de energia mais eficientes economicamente. O processo poderia ser reforçado se os governos fixassem metas que definam as características de desempenho para qualificar as tecnologias de energia sustentáveis (por exemplo, especificando indicadores, limites de emissão da poluição de ar ou padrões mínimos de eficiência em indústrias, máquinas e veículos).

**c. Mobilizar investimentos adicionais em energia sustentável**

Políticas comerciais, legislação financeira, bem como também incentivos, podem ser necessários para encorajar companhias privadas a investir em energia sustentável ou custear os riscos associados a tais investimentos.

**d. Incentivar a inovação tecnológica**

Apoio adequado para um conjunto de novas tecnologias avançadas e promissoras seria uma forma de assegurar que estas opções estejam disponíveis quando a necessidade por elas se intensificar.

**e. Liderança tecnológica apoiando a capacitação em países em desenvolvimento**

As economias em desenvolvimento precisam avançar no desenvolvimento de seus recursos – humano, natural, e tecnológico – criando sistemas de energia apropriados às suas próprias circunstâncias. Mas também precisam de ajuda, como transferência de tecnologia e financiamento e capacitação.

**f. Encorajar maior cooperação no nível internacional**

O processo contínuo de globalização faz com que idéias, finanças, e energia fluam de um país para outro. Modos produtivos de mudança poderiam incluir esforços nacionais combinados, por exemplo, na obtenção de tecnologias de energias renováveis, harmonização internacional de impostos ambientais e mercado de emissões, como também padrões de eficiência de energia para produtos industrializados e importações de maquinaria usada e veículos. A necessidade de ações de cooperação em energia está clara na Agenda 21 que emergiu da Convenção das Nações Unidas, ocorrida no Rio de Janeiro em 1992 (Rio-92).

### **2.6.3. Políticas energéticas sustentáveis para o Cone Sul**

O estudo “*Proyecto Cono Sur Sustentable: Propuestas de Políticas. Energeticas Sustentables para el Cono Sur*” foi elaborado por um grupo de trabalho coordenado por Bermann (2002), a partir dos estudos desenvolvidos em cada país sobre o tema Sustentabilidade Energética. Os países participantes foram o Chile, Uruguai, Paraguai, Argentina e Brasil. Como resultado parcial do trabalho citado, foram apresentados os pilares para a sustentabilidade energética no Cone Sul, envolvendo aspectos como a dependência e vulnerabilidade; a segurança energética e a qualidade; equidade (índices de eletrificação, carências energéticas e gastos energéticos); energia e meio ambiente; energia e democracia e potencial de sustentabilidade da região. Os pilares ou indicadores de sustentabilidade utilizados no estudo analisado estão descritos na Tabela 2.6.

**TABELA 2.6 – PILARES OU INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE**

<b>INDICADORES</b>	<b>Fatores ou Aspectos</b>
<b>Dependência e Vulnerabilidade</b>	Grau de independência energética em relação ao petróleo e gás natural
<b>Segurança Energética e Qualidade</b>	Assegurar o aumento da oferta em função do aumento da demanda de consumo
<b>Equidade</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Índices de eletrificação;</li><li>▪ Carências energéticas;</li><li>▪ Gastos energéticos</li></ul>
<b>Energia e Meio Ambiente</b>	Emissão de gases de efeito estufa: <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Efeito da contaminação do ar devido aos mesmos;</li><li>▪ Efeitos danosos sobre a saúde associados aos mesmos</li></ul>
<b>Energia e Democracia</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Baixa participação dos órgãos de regulação</li><li>▪ Dificuldades de acesso a informações</li><li>▪ Ausência de conhecimento técnico-científico adequado</li><li>▪ Necessidade da construção de consensos</li><li>▪ Construção de uma estratégia energética sustentável e democrática, através de instâncias de participação dos diversos segmentos da sociedade.</li></ul>
<b>Potencial de Sustentabilidade</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Utilização racional dos recursos</li><li>▪ Reduzir a ineficiência energética</li><li>▪ Desenvolvimento de tecnologias novas e renováveis</li><li>▪ Incentivar o aproveitamento dos micros e pequenos potenciais hidrelétricos</li><li>▪ Capacitação tecnológica brasileira com respeito aos equipamentos</li></ul>

FONTE: BERMANN, 2002.

### **2.6.3.1. Critérios considerados na construção de cenários sustentáveis**

Os critérios adotados para a construção de cenários sustentáveis no estudo em questão consideraram as condições de sustentabilidade ambiental. As mais amplas estão relacionadas com o impacto global da matriz, considerando questões como mudança climática, esgotamento e substituição de recursos naturais energéticos não renováveis, desde a extração dos combustíveis até o uso final. Posteriormente, foram incluídos os impactos locais e regionais como contaminação, perda da biodiversidade etc. Foram também consideradas no conjunto, restrições a combustíveis fósseis, energia nuclear, grandes represas e meios de transporte em função do impacto local.

As condições de sustentabilidade social também foram levadas em conta. Estas têm a ver com a equidade dentro da sociedade e entre as regiões, supondo que o cenário desejável satisfaz as necessidades de todos por meio de restrições ao consumo global e particular dentro de um espaço plural. Desta maneira foram definidas restrições globais, por exemplo, limites físicos do uso social de um recurso e particulares como: limites, proibição ou penalização a um modo de uso final por seu impacto limitado no espaço e tempo. Considerando todos esses fatores a análise procurou-se um equilíbrio dos impactos sociais chegando ao resultado final do projeto que foi apresentado na forma de uma proposta de políticas e mecanismos para a sustentabilidade energética na região. Os principais itens da proposta do estudo foram:

#### **a. Incorporação das externalidades**

As alternativas energéticas baseadas em combustíveis fósseis devem incorporar os custos de sua utilização em termos de degradação ambiental e danos à saúde pública. A geração de energia através de hidrelétricas deve considerar os custos do manejo adequado da bacia hidrográfica, os custos sociais da deslocação das populações, que devem receber como compensação indenizações justas para garantir suas recomposições física, econômica e social.

#### **b. Adoção de um Sistema de Geração Distribuída**

Sistemas de geração distribuída são aqueles relativamente pequenos que são conectados diretamente à rede de distribuição (média e baixa tensão). A integração destes sistemas ao atual Sistema, reduziria a utilização das redes elétricas implicando na redução das perdas de energia. Este sistema também incentivaria o desenvolvimento de energias alternativas, pois permitiria aos interessados em gerar se instalarem no local mais propício e mais próximo da rede de transmissão.



### **c. O Estado como inspirador e planejador do nosso futuro energético**

Ao estado compete ativar a definição de uma nova política energética, seja como promotor, regulador, planejador ou eventualmente como operador mas especialmente lhe diz respeito assumir liderança na determinação dos objetivos. É seu dever desenhar e aplicar uma estratégia energética consistente com o desenvolvimento sustentável, que concilie a expansão dos sistemas com os desafios de longo prazo não considerados pelo mercado.

### **d. Restrições às atividades eletrointensivas**

As atividades de produção de bens intensivos em energia – a mineração e transformação do cobre no Chile; alumínio primário no Brasil e Argentina, aço no Brasil e Argentina; ligas de ferro no Brasil; papel e celulose nos cinco países – devem ser reduzidas, abandonando-se a tradição da região de exportadora de bens primários para o mercado internacional. As atuais plantas de produção eletrointensivas devem ser reformadas, estendendo o processo produtivo às etapas de transformação, de modo que os bens sejam resultado de um processo de maior agregação de valor, com uma conseqüente valorização no mercado internacional.

### **e. Marco regulatório para o uso eficiente de energia**

O marco regulatório para o uso eficiente da energia deverá abranger um conjunto de atividades da cadeia energética; isto é, aquelas relacionadas com a exploração, exportação, transformação, transporte, distribuição e o uso final da energia, tanto pelas empresas energéticas como pelo consumidor individual. O conjunto de leis, normas, regulamentos e instrumentos econômicos, que compõe o marco regulatório, deverá assegurar a devida incorporação das externalidades que derivam de cada etapa da cadeia.

Concluindo o relatório os autores afirmam:

Este trabalho “PROPOSTAS DE POLÍTICAS SUSTENTÁVEIS PARA O CONE SUL” pode ter uma grande importância política, por se constituir num poderoso instrumento de informação e formação, nas mãos e cabeças dos movimentos sociais, organizações sindicais, ativistas ambientalistas e todos aqueles que têm o objetivo de transformar os países integrantes do Cone Sul em uma região de justiça, equidade e integridade ambiental, onde a energia será de todos e para todos (BERMANN, 2002, p. 6).

Os indicadores apresentados pelo projeto Cone Sul Sustentável, representam questões de sustentabilidade muito importantes para os países que participaram do projeto e estas questões estão também muito bem contempladas no conjunto de diretrizes e indicadores propostos pelo relatório.

#### **2.6.4. Indicadores de sustentabilidade na geração de energia elétrica**

Para descrever um meio, e como nele se processará a implantação de uma usina são usados dois enfoques: um é o qualitativo, em que se examina o ambiente e revisam-se as características do empreendimento, procurando identificar as áreas sensíveis e críticas à ação prevista, e a outra é o quantitativo, em que medindo encontram-se valores e índices dos elementos que compõem o ambiente. Essas mensurações destinam-se a conhecer a escala dos impactos sobre os fatores antes qualificados.

Para se conhecer esses fatores, no entanto, existem algumas dificuldades. A mensuração direta dos elementos não é uma empreitada viável, tanto pela complexidade dos fatores, como pelo tempo e custo que isso dispenderia. Como esses conhecimentos são imprescindíveis, recorre-se a métodos indiretos (de mensuração) que identifiquem o ambiente e permitam previsões e interpretações das reações que ali ocorrem (MÜLLER, 1995).

Utilizam-se, então, indicadores socioeconômicos e ambientais sensíveis às intervenções. Esses indicadores são, em geral, uma expressão quantitativa que revela o estado de um ambiente ou descreve seu funcionamento (QUIROGA, 2002). Ao mesmo tempo, os indicadores permitem estimar as mudanças que ali ocorrem, provocadas pela intervenção conhecida. Considerando a amplitude dos elementos socioambientais, os indicadores serão igualmente medidos tanto nos meios biofísicos como nos socioeconômicos, com procedimentos padronizados de registros, documentos e depoimentos orais (MÜLLER, 1995).

Os indicadores sociais informam sobre as pressões exercidas pelo homem sobre o meio, assim como a sua eficiência para transformar os recursos naturais em seu benefício, operar seus sistemas econômicos e de relações sociais, promover os ajustes comportamentais para suprir suas necessidades de nutrição, saúde e habitação e satisfazer as aspirações emocionais (MÜLLER, 1995).

O *Battelle Columbus Laboratories* nos Estados Unidos (BATTELLE, 2001), que desenvolveu uma lista de 78 parâmetros ambientais para denunciar diversos tipos de impactos, recomenda escolher como indicadores ambientais os fatores do meio que:

- Representem a qualidade do meio;
- Sejam facilmente mensuráveis na natureza;
- Respondam aos impactos que a proposta provocaria;
- Sejam avaliáveis ao nível do projeto.

Segundo Müller (1995), na seleção dos indicadores, define-se também o nível de detalhamento das informações com que se trabalhará. Uma escolha de muitos indicadores ou extremamente detalhados, em lugar de dar maior precisão, geram dificuldades no processamento, na interpretação dos resultados e conclusão (escala e importância) sobre os impactos. Por outro lado, escolher poucos indicadores ou indicadores muito superficiais pode tornar as informações insuficientes para a constatação do impacto do empreendimento (MÜLLER, 1995).

Para que esses fatores possam ser usados como indicadores, é importante definir-se uma unidade de mensuração, considerando medições simples e combinadas, de acordo com os conhecimentos disponíveis (QUIROGA, 2002). É também recomendável que, na coleta dos dados, sejam obedecidos métodos estatísticos apropriados, para se obter resultados significativos. Os indicadores podem evidenciar impactos ambientais, sociais e econômicos, negativos (custo) e positivos (benefício) e a avaliação e solução dos efeitos socioambientais de um empreendimento de geração de energia

#### **2.6.5. Diretrizes políticas e indicadores globais e regionais**

O processo de estabelecimento de indicadores e metas de desenvolvimento sustentável é parcialmente científico e parcialmente político. A ciência descreve o impacto de um determinado poluente atmosférico no ambiente, no entanto, o processo político, mais abrangente, determina se estes impactos são prioritários para o momento político em questão (AMARAL, 2002; ICONS, 2003).

Do ponto de vista científico, as diretrizes políticas e indicadores sugeridos pelos três relatórios internacionais apresentados neste capítulo seguem uma linha de prioridades em função da gravidade dos impactos ambientais da geração de energia já

conhecidos. Do ponto de vista político, as prioridades são diferenciadas em função dos interesses políticos também diferenciados dos grupos políticos que patrocinaram tais estudos. Independente destas divergências de prioridades, a lista de diretrizes políticas e indicadores recomendados pelos estudos é bastante completa e fornece uma boa direção para estudos desta natureza desde que sejam contempladas as especificidades de cada estudo em particular. Sintetizando os resultados dos três estudos analisados decidiu-se criar uma lista de diretrizes políticas e indicadores (que agrupassem cada um deles e os parâmetros a eles correlatos) julgados aplicáveis ao setor elétrico brasileiro os quais são mostrados na Tabela 2.7.

**TABELA 2.7 –INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE GLOBAIS E REGIONAIS**

<b>INDICADORES</b>	<b>Parâmetros ou aspectos</b>
<b>1. Melhoria da qualidade de vida</b>	Erradicação da pobreza
	Melhorar oportunidades de acesso à educação
	Redução mortalidade infantil e materna
	Redução das diferenças relativas de renda
<b>2. Promoção de acesso a energia universal</b>	Aumento de índices de eletrificação
	Redução de carências energéticas
	Aumentar o uso de energia por populações rurais
<b>3. Crescimento da disponibilidade de energia</b>	Aproveitamento dos micro e pequenos potenciais hidrelétricos
	Redução da ineficiência energética
<b>4. Crescimento da eficiência no uso final</b>	Melhorar a eficiência do suprimento de energia
	Promover Segurança e Qualidade Energética
<b>5. Novas tecnologias de energia</b>	Acelerar desenvolvimento, utilização e difusão de novas tecnologias.
	Incrementar confiança (dependência) de energias renováveis
<b>6. Independência do mercado internacional de energia</b>	Diminuir dependência e vulnerabilidade Energética
	Promover independência energética em relação ao petróleo e gás natural
	Promover desenvolvimento de energias alternativas
<b>7. Promover integração da Geração de energia com a proteção ao Meio Ambiente</b>	Limitar emissões de gases efeito estufa (GHG – <i>Green house gas</i> )
	Redução da poluição do ar
	Limitar o uso de elementos radioativos de longa vida
	Limitar uso de materiais tóxicos
	Utilização racional dos recursos
	Redução da ineficiência energética
	Preservar ecossistemas vulneráveis
	Redução de impactos adversos à saúde
<b>8. Promover integração da Energia e Democracia</b>	Através da participação social na política energética
	Participação dos órgãos de regulação
	Promover acesso do público à informação

Analisando-se o conjunto de indicadores sintetizados nesta pesquisa, conclui-se que a energia elétrica, principalmente as obtidas de fontes renováveis podem ser consideradas sustentáveis. Essa conclusão é obtida pelo fato de que as energias

renováveis atendem a todos os indicadores, com maior ou menor intensidade, com pelo menos um parâmetro ou aspecto associado a cada indicador conforme pode ser observado na Tabela 2.7.

## **2.7. OPÇÕES DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E SEUS IMPACTOS**

No Manual de Inventário Hidrelétrico da ELETROBRAS (1997), o impacto ambiental é definido como uma alteração causada por um aproveitamento ou conjunto de aproveitamentos sobre o sistema ambiental. Neste contexto, entende-se por sistema ambiental o conjunto dos elementos existentes (físico-bióticos, socioeconômicos) na área de estudo, incluindo seus atributos ou qualidades, as funções que exercem nos processos e suas interações.

Impacto ou efeito ambiental pode ser também definido como o resultado de uma ação sobre um ser, uma comunidade ou uma região. Refere-se às modificações observadas entre o processo dinâmico anterior e o novo estado criado pela ação introduzida. Os impactos ambientais são considerados frente a um objetivo pretendido, relativamente ao estado final produzido, positivos ou negativos. O princípio de custo-benefício, que deve incluir tanto os valores quantitativos como os qualitativos, é um dos adotados para avaliar o balanço entre os efeitos positivos e os negativos de uma ação proposta e serve para orientar a decisão quanto a efetuar-la ou não (MÜLLER, 1995).

A avaliação dos impactos ambientais deve contemplar a identificação das alterações desfavoráveis e a identificação das ações que evitem a ocorrência total ou parcial dos impactos (controle), das ações que reduzam as conseqüências dos impactos (mitigação) e das ações que compensem os impactos quando a reparação é impossível (ELETROBRAS, 1997).

Dada a grande variedade de fontes de energia primárias e tecnologias de conversão, ao se comparar as vantagens ambientais relativas a cada uma delas algumas questões difíceis de responder são também levantadas. Através de uma perspectiva ambiental, a comparação de opções de fontes geradoras deve estar baseada em uma análise que considere todos os impactos gerados durante o ciclo de vida do processo de produção para cada alternativa disponível (GAGNON et al., 2002). A avaliação do ciclo de vida - ACV (*Life-Cycle Assessment* – LCA) se dá numa perspectiva de âmbito mais amplo, porque segue cada opção do começo ao fim,

avaliando os impactos ambientais de todos os passos do processo, do berço ao túmulo, incluindo a extração de recursos, processamento e transporte de combustíveis, construção das usinas, produção da eletricidade e disposição do resíduo (CHEHEBE, 1998; IHA, 2003).

Todo uso de fontes de energia modifica o meio ambiente e traz conseqüências indesejáveis. A queima de combustíveis fósseis, como carvão, óleo e gás, traz, em diferentes extensões, impactos adversos para a saúde ambiental e humana. Apesar das tecnologias de mitigação destes efeitos, as emissões de contaminantes atmosféricos estão causando aquecimento global, chuvas ácidas, fumaça e graves doenças respiratórias (BAJAY et al., 2000; SAWIN, 2003).

Combustíveis não fósseis também têm efeitos prejudiciais. A principal preocupação pública é sobre segurança operacional, tratamento e armazenamento de resíduo perigoso, e até mesmo a proliferação de armas no campo da energia nuclear. Porém, já existe conhecimento tecnológico para mitigar estes problemas e já é possível também reduzir o tamanho das unidades de produção de energia para reduzir custos.

Grandes empreendimentos hidrelétricos também têm gerado opiniões controversas, principalmente por causa das populações que devem ser retiradas da área a ser inundada, assuntos ecológicos e gerenciamento ineficiente da vazão nos rios (MÜLLER, 1995). Tais problemas normalmente são o resultado de mitigação de impacto insuficiente devido à legislação inadequada.

A utilização de biomassa em larga escala traz consigo o impacto das monoculturas e perda de biodiversidade, competição por uso de terra agrícola e recursos de água, e impactos negativos da colheita e queima.

Energia eólica e solar são criticadas como incertas e impossíveis de prever. Na energia eólica em particular, destacam-se a alteração visual da paisagem pelas torres e turbinas, o ruído e mortalidade de pássaros em algumas localidades. Quanto à energia solar, a fabricação de células solares fotovoltaicas produz resíduos perigosos e ainda é bastante cara (SEDA, 2002; CEPEL, 2003).

A energia maremotriz (de barragem de estuários) causa patamares de lama cobertos por água que prejudicam o acesso de pássaros a comida. Espécies migratórias podem também ser afetadas e há indícios também que os gradientes de salinidade das águas podem também ser alterados (IHA, 2003).

Toda escolha de uma opção de fonte de geração de eletricidade exige uma avaliação apropriada, que envolverá um estudo e negociação de “custo x benefícios”, além de uma compreensão correta dos impactos e adoção de medidas compensatórias adequadas, com o objetivo de fornecer serviços de suprimento de energia sustentáveis.

No Brasil, os projetos de empreendimentos geradores de energia implantados a partir de 1986 tiveram que ser adequados à legislação ambiental, que passou a exigir o EIA/RIMA – Estudo e Relatório de Impacto Ambiental e também um Plano Básico Ambiental (PBA) com as ações corretivas ou compensatórias dos impactos ambientais causados pelos empreendimentos. Este marco legal representou um grande avanço, pois os empreendedores passaram a prestar mais atenção aos aspectos ambientais e a investir na minimização dos impactos negativos e maximização dos impactos positivos.

### **3. ENERGIAS RENOVÁVEIS**

#### **3.1. PANORAMA MUNDIAL**

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*), reconhece-se nos registos climatológicos um padrão resultante da atividade humana. Durante o ano 2000, os cientistas do IPCC reviram os modelos utilizados naquele reconhecimento e fortaleceram ainda mais os seus argumentos constatando que realmente existe uma influência humana discernível no nosso clima. Até 2100, a temperatura na superfície terrestre poderá aumentar de 1,4 a 5,8 °C, o que quase duplica a projeção anterior. A queima de combustíveis fósseis para a geração de energia, ao originar emissões de dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, constitui a principal causa do efeito estufa e do conseqüente aquecimento global (IPCC, 2001).

Neste contexto, as reduções definidas no Protocolo de Kyoto são modestas, quando comparadas com as necessárias para estabilizar o clima. Apesar dos países (com exceção dos EUA) responsáveis por um quarto das emissões globais terem prometido reduzir, até ao ano 2010, as suas emissões de gases de efeito estufa para 50% menos do que os níveis de 1990, à luz das projeções mais recentes do IPCC, a redução teria que ser de, pelo menos, 80% para abrandar o aquecimento global até níveis aceitáveis (IPCC, 2001; *European Commission*, 1997).

Vale salientar que o cumprimento dos objetivos impostos pelo Protocolo de Kyoto será muito difícil de alcançar se não houver uma vontade firme no desenvolvimento das energias renováveis através da adoção de uma política energética direcionada, com o potencial para reduzir a poluição do ar principalmente as concentrações de CO<sub>2</sub>, o aquecimento global, as mudanças climáticas e as chuvas ácidas.

Na maioria dos casos, com exceção da energia da biomassa, as tecnologias de geração de energia elétrica a partir de recursos renováveis não requerem um processo de combustão, responsável, normalmente, pelos impactos mais significativos. No caso da biomassa, o efeito de absorção de CO<sub>2</sub> durante a fase vegetativa do recurso contrabalança as emissões deste mesmo gás, na sua combustão. Em geral, o caráter descentralizado das fontes renováveis faz com que as necessidades de transformação e transporte da energia final sejam menores (a eletricidade pode ser produzida mais perto do ponto de injeção no sistema de distribuição), resultando também em menores



impacto globais. Contudo No caso da geração hidroelétrica a localização da central geradora não é totalmente livre e o investimento no transporte pode ser considerável.

A opção pela produção de eletricidade a partir das energias renováveis é também vantajosa no nível macroeconômico, pela segurança, diversificação e disseminação de centros eletroprodutores. A utilização dos recursos naturais endógenos permite a redução da dependência energética do exterior, o que é significativamente importante, pois reduziria as importações. O fomento das energias renováveis pode contribuir de forma decisiva para a criação de novos postos de trabalho, com boas perspectivas, especialmente para as pequenas e médias empresas (*European Commission, 1997*).

Observando-se as tendências no setor energético é possível perceber que os próximos anos se caracterizarão por uso diversificado das fontes de energia. A meta de redução dos gases causadores do efeito estufa, bem como a diminuição dos estoques dos combustíveis fósseis, contribui para que as fontes alternativas, especialmente as renováveis e as não-poluentes, ganhem um impulso inédito. Por outro lado, o conceito de geração distribuída, que vem sendo cada vez mais difundido na engenharia dos sistemas energéticos, aponta para uma participação crescente das fontes alternativas na geração de eletricidade.

### **3.2. PANORAMA BRASILEIRO**

No Brasil, 41% da matriz energética é renovável, enquanto a média mundial é de 14% e nos países desenvolvidos, de apenas 6%, segundo dados do Balanço Energético Nacional - edição 2003.

No Brasil, a produção de energia elétrica baseia-se atualmente em cerca de 79% na hidroeletricidade. O restante provém principalmente de usinas térmicas, que operam com carvão, diesel e gás natural, e de usinas nucleares. O uso da biomassa ocupa um lugar de importância, não tanto no seu aproveitamento na geração de energia elétrica, mas sob a forma de combustível biológico. Entretanto, representa ainda uma pequena parcela quando comparado ao uso dos combustíveis fósseis no sistema de transporte no país, que prioriza o sistema rodoviário e o uso de derivados de petróleo. A recente crise energética despertou o país para a possibilidade de economia e redução de impactos através de medidas de eficiência energética e para o potencial privilegiado do Brasil em termos de fontes renováveis alternativas de energia (ORTIZ et al., 2002).

O Brasil apresenta ainda uma forte dependência das grandes centrais geradoras de energia, controladas pelo setor privado ou estatal, em sistemas desverticalizados ou não, com uma clara tendência de liberalização do mercado de energia e, mais recentemente, com a possibilidade de operação de produtores independentes. Portanto, verifica-se um período de transição e a necessidade de uma urgente reorientação da política energética no Brasil, onde se discuta o modelo econômico a regulatório a ser adotado e onde se busque o estabelecimento de metas para o aumento da participação das fontes alternativas renováveis de energia e de eficiência energética, as quais devem ter seu potencial prioritariamente aproveitado no caminho da construção de um futuro sustentável (ORTIZ et al., 2002).

No Brasil, as preocupações com o desenvolvimento de leis e regulamentos para a promoção de eficiência energética e para a ampliação das fontes alternativas de energia se fortaleceram a partir da recente crise no setor. Uma série de medidas e programas têm sido apresentados no âmbito da Secretaria de Energia do Ministério de Minas e Energia e a ANEEL, desde a sua criação em 1997, estabelece normas e regulamentos para orientar os agentes no setor. Na Câmara e no Senado, diversos projetos foram recentemente aprovados e devem beneficiar as iniciativas de investimento e o crescimento da indústria no Brasil. Entre estes estão: i) Lei 4673/2001 que criou o Programa Prioritário de Desenvolvimento da Energia Eólica do Nordeste – PRODEENE ii) e Lei 10.438/2002 que instituiu Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA (MME, 2004b).

Neste sentido destaca-se também o PRODEEM – Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios que é um programa do Governo Federal que foi instituído em 1994 e é também coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME).

### **3.2.1. PRODEEM – Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios**

Esse programa tem por objetivo atender às localidades isoladas, não supridas por energia elétrica pela rede convencional, obtendo esta energia de fontes renováveis locais, de modo a promover desenvolvimento social e econômico auto-sustentável. Para a implementação do programa foram desenvolvidas parcerias com diversos organismos nacionais e internacionais:

Um total de 20% dos recursos é destinado para trabalhos de P&D e demonstração da aplicação dessas energias alternativas; mais de 30% tem como destino os projetos de energia termo-solar para aquecimento da água de habitações populares, e outros 30% são para projetos de energia fotovoltaica, eólica e centrais hidrelétricas, destinados a sistemas isolados de pequeno porte; uma cota de 15% custeará projetos a serem desenvolvidos por cooperativas de produtores, usuários e produtores independentes de energia elétrica em área rural; a cota final de 5% caberá ao PRODEEM.

### **3.2.2. PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica**

O PROINFA é um importante instrumento para a diversificação da matriz energética nacional, garantindo maior confiabilidade e segurança ao abastecimento. O Programa, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), estabelece a contratação de 3.300 MW de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN), produzidos por fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), sendo 1.100 MW de cada fonte.

Criado em 26 de abril de 2002, pela Lei nº 10.438, o PROINFA foi revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003, que assegurou a participação de um maior número de estados no Programa, o incentivo à indústria nacional e a exclusão dos consumidores de baixa renda do pagamento do rateio da compra da nova energia. Em março de 2004 foi assinado o decreto que regulamentou o PROINFA e também a portaria que estabeleceu os valores econômicos para cada fonte de energia beneficiada, tornando públicos os guias de habilitação e autorizando a abertura da chamada pública para a contratação dos projetos pela Eletrobrás. A chamada pública foi aberta no dia 6 de abril, e a Eletrobrás incumbida de receber os projetos dos empreendedores interessados (MME, 2004b).

O PROINFA conta com o suporte do BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social), que criou um programa de apoio a investimentos em fontes alternativas renováveis de energia elétrica. A linha de crédito prevê financiamento de até 70% do investimento, excluindo apenas bens e serviços importados e a aquisição de terrenos. Os investidores têm que garantir 30% do projeto com capital próprio.

A Eletrobrás, no contrato de compra de energia de longo prazo, assegura ao empreendedor uma receita mínima de 70% da energia contratada durante o período de financiamento e proteção integral quanto aos riscos de exposição do mercado de curto prazo. Os contratos terão duração de 20 anos e envolverão projetos selecionados que devem entrar em operação até dezembro de 2006.

Com a implantação do PROINFA, estima-se que serão gerados 150 mil empregos diretos e indiretos durante a construção e a operação dos empreendimentos. Os investimentos previstos do setor privado são da ordem de R\$ 8,6 bilhões. Uma das exigências da Lei nº 10.762 é a obrigatoriedade de um índice mínimo de nacionalização de 60% do custo total de construção dos projetos. O Brasil detém as tecnologias de produção de maquinário para uso em PCH's e usinas de biomassa e está avançando na tecnologia eólica, com duas fábricas instaladas, uma no Sudeste e outra no Nordeste.

Os critérios de regionalização, previstos na Lei nº 10.762, estabelecem um limite de contratação por Estado de 20% da potência total destinada às fontes eólica e biomassa e 15% para as PCH's, o que possibilita a todos os Estados que tenham vocação e projetos aprovados e licenciados a oportunidade de participarem do programa. A limitação, no entanto, é preliminar, já que, caso não venha a ser contratada a totalidade dos 1.100 MW destinados a cada tecnologia, o potencial não-contratado será distribuído entre os Estados que possuírem as licenças ambientais mais antigas. Para participarem do Programa, os empreendimentos terão de ter licença prévia de instalação (MME, 2004b).

Em relação ao abastecimento de energia elétrica do país, o PROINFA é um instrumento de complementaridade energética sazonal à energia hidráulica, responsável por mais de 90% da geração do país. Na região Nordeste, a energia eólica serve como complemento ao abastecimento hidráulico, já que o período de chuvas é inverso ao de ventos. O mesmo ocorre com a biomassa nas regiões Sul e Sudeste, onde a colheita de safras propícias à geração de energia elétrica (cana-de-açúcar e arroz, por exemplo) ocorre em período diferente do chuvoso. A produção de 3,3 mil MW a partir de fontes alternativas renováveis dobrará a participação na matriz de energia elétrica brasileira das fontes eólica, biomassa e PCH, que atualmente respondem por 3,1% do total produzido e, em 2006, podem chegar a 5,9%.

A entrada de novas fontes renováveis evitará a emissão de 2,5 milhões de toneladas de gás carbônico/ano, ampliando as possibilidades de negócios de Certificação de Redução de Emissão de Carbono, nos termos do Protocolo de Kyoto. O Programa também permitirá maior inserção do pequeno produtor de energia elétrica, diversificando o número de agentes do setor (ANEEL, 2004).

### **3.3. ENERGIA HIDRELÉTRICA**

A produção de energia elétrica a partir de um aproveitamento hidrelétrico combina a existência de um volume de água escoado por um rio com a de um desnível topográfico que permite transformar a energia potencial e cinética da água em trabalho no veio de uma máquina hidráulica – a turbina. Esse trabalho, por sua vez é utilizado para acionar um gerador elétrico transformando-o em energia elétrica.

Em termos genéricos, uma instalação típica compreende uma obra de retenção, normalmente uma barragem formando um reservatório, um circuito de derivação em superfície livre ou sob pressão, uma central hidroelétrica e a interligação à rede elétrica. O trabalho mecânico é transformado em energia elétrica no gerador sendo levada através de cabos ou barras condutoras dos terminais do gerador até o transformador elevador, onde tem sua tensão elevada para adequada condução, através de linhas de transmissão, até os centros de distribuição e consumo. Nestes locais, através de transformadores redutores, a energia tem sua tensão reduzida a níveis adequados para o consumo (MINGACHO et al., 2003).

As barragens são construídas para aumentar a energia potencial da água e também para garantir um fluxo de água constante através das turbinas que movimentam os geradores. Quando em um sistema hidroelétrico existe um reservatório com capacidade de armazenar um volume que permita regularizar a vazão este volume pode ser considerado como energia armazenada disponível que poderá ser imediatamente utilizada quando o sistema elétrico requisitar (CRAIG et al., 2001).

A queda d'água é uma forma de energia mecânica usada diretamente para movimentar as turbinas e geradores, portanto, esse processo de dois estágios apresenta uma eficiência (ou fator de capacidade) de 80 a 90% na conversão de energia potencial em eletricidade enquanto nos sistemas térmicos que utilizam combustível a eficiência corresponde a 35 a 45% (CRAIG et al., 2001).

A natureza dotou cada região do planeta com um número diferente de opções energéticas. Além disso, criou o desafio para a humanidade descobri-las, avaliar o volume, desenvolver técnicas para seu uso e empregar todo o seu potencial de utilização econômica. O conhecimento dos recursos e reservas energéticas é fundamental para se planejar o desenvolvimento nacional. Apesar da energia hidrelétrica ser considerada uma fonte limpa de energia, ela pode acarretar conseqüências socioambientais em função do alagamento de grandes áreas.

Construir uma barragem pode implicar em impactos que envolvem remover povoados, desalojar pessoas, alterar ou extinguir ecossistemas, acabar com florestas e sítios históricos, que ficarão submersos, alterar a flora e fauna, além de outros. Muitas vezes o curso natural do rio é alterado pelo desvio da água, causando interferência nos ciclos naturais, reprodução e dispersão de peixes e outros animais aquáticos (EPA, 2003). Após os impactos iniciais, a energia seria limpa, mas em algumas usinas a decomposição da biomassa inundada pode produzir poluentes e reduzir o nível de oxigênio da água devido ao excesso de matéria orgânica (CRAIG et al., 2001; MÜLLER, 1995).

### **3.3.1. Energia hidrelétrica no Brasil**

Por dispor da maior bacia hidrográfica do mundo, é natural e compreensível que o Brasil tenha feito historicamente sua opção por este recurso energético. Hoje, a capacidade de geração do Brasil é representada pelas usinas hidrelétricas que dão sustentação ao desenvolvimento nacional e ao parque industrial brasileiro, respondendo por 78,98% do total de energia gerada no país (ANEEL, 2004). As características físicas e geográficas do Brasil foram determinadas para implantação de um parque gerador de energia elétrica de base predominantemente hídrica. A energia de origem hídrica é hoje a segunda maior fonte de eletricidade no mundo e o Brasil, que detém 15% das reservas mundiais de água doce disponível, só utiliza um quarto de seu potencial.

### **3.3.2. Impactos das hidrelétricas**

No caso de uma hidrelétrica, as alterações biofísicas na área de implantação e na área de influência do empreendimento começam, efetivamente, com as derivações ou desvios dos rios, necessários para as construções principais, porém o efeito mais

crítico acontece no período do enchimento do reservatório, quando ocorre a submersão dos sistemas bióticos, abióticos e sociais daquela área.

Durante a fase dos estudos, quando não houve, ainda, trabalhos efetivos no sítio da obra, mas onde a circulação de técnicos e depois a presença de topógrafos e hidrólogos ensejam curiosidades e expectativas entre os populares, já estão presentes alguns impactos. Isso se vê tanto na população que será efetivamente afetada, como naquelas que, por falta de informações precisas, comuns nessa fase preliminar, imaginam que serão de alguma forma atingidas pelo empreendimento.

Outros impactos são observados durante a construção do empreendimento, quando tem início a desestabilização social das comunidades localizadas tanto em torno da obra, como das situadas na região do reservatório – as que ficarão inundadas e as que estarão nas margens do lago – envolvendo ações de relocação de populações e restauração da infra-estrutura regional. Nesse período, os impactos têm alta relevância social (MÜLLER, 1995).

Outro grupo de impactos surge com a formação do reservatório, prolongando-se durante os primeiros tempos de estabilização física e biológica do novo ambiente. Os efeitos são observados à montante e à jusante, incluindo aqueles relacionados com outros cursos d'água, usados para acelerar o enchimento e para suprir o fluxo do rio represado a jusante. Nesse período, os impactos têm maior relevância nos aspectos naturais, físicos e bióticos.

A terceira fase, a de operação do aproveitamento, trará ainda alguns novos e contínuos impactos. Os impactos também não são restritos ao espaço físico inundado. Uma represa causa alterações nas águas de jusante, tanto na sua qualidade físico-química e hidrobiológica, como na sua quantidade, ou seja, na vazão, controlada na operação da represa (ELETROBRAS, 1997; TVA, 2003).

Como **impactos positivos** ou vantagens e **impactos negativos** ou desvantagens da energia hidrelétrica pode-se enumerar (IHA, 2003):

### **3.3.2.1. Aspectos econômicos**

- **Positivos**

- Promove o desenvolvimento regional - normalmente em zonas rurais, como exemplo pode ser citado o caso dos municípios ribeirinhos ao reservatório de Itaipu que ganharam praias artificiais, o que incentivou o

turismo local. Além disso, os municípios têm um aporte financeiro proveniente dos *royalties*, que permite à administração dos mesmos implantar infra-estrutura com padrão de primeiro mundo;

- Alta eficiência energética;
  - Não consome água, isto é, deixa o recurso disponível para outros usos;
  - Facilidade de absorver carga quando interligada no sistema elétrico regional;
  - Longa vida útil (50 a 100 anos);
  - Avanço tecnológico e geração de empregos para a região;
  - Proporciona independência energética para exploração dos recursos naturais;
  - Melhora as condições de trabalho e produtividade agrícola, isto é agricultores relocados através do incentivo e orientação (durante a implantação do PBA) de técnicas agrícolas mais adequadas e alternativas. Como exemplo deste impacto positivo pode-se citar a mudança de culturas agrícolas tradicionais para culturas orgânicas, com aumento significativo da produção a cada ano, no Reassentamento da Usina Hidrelétrica (UHE) de Salto Caxias no Rio Iguaçu.
- **Negativos**
    - Alto investimento inicial;
    - A produção depende das vazões que são função das condições climáticas variáveis.

### **3.3.2.2. Aspectos sociais**

- **Positivos**
  - Deixa a água disponível para outros usos;
  - Permite o uso múltiplo dos reservatórios como prevenção de enchentes, abastecimento de água, irrigação, navegação, recreação e ecoturismo (HYDRO-QUÉBEC, 2002);
  - Melhora a acessibilidade ao local através de construção e melhora de estradas;
  - Melhora condições de vida das populações vizinhas;



- A usina é construída com grande participação da mão-de-obra local;
- Sustenta os modos de vida através de fornecimento de energia, alimento (produto de pesca, irrigação de plantações) e abastecimento de água para dessedentação humana e animal. Atualmente 1,6 bilhão de pessoas no mundo não têm acesso à eletricidade e 1,1 bilhão não têm suprimento adequado de água potável (IHA, 2003).
- **Negativos**
  - Inundação permanente para formação de reservatórios, provocando remanejamento involuntário das comunidades;
  - Altera o regime hidrológico do rio;
  - Modificação dos padrões de uso do solo;
  - Facilita propagação de doenças de veiculação hídrica;
  - Afeta modos de vida (IHA, 2003).

### 3.3.2.3. Aspectos ambientais

- **Positivos**
  - Não polui a atmosfera, com baixa emissão de gases de efeito estufa;
  - Não produz resíduos;
  - Não consome recursos renováveis;
  - Cria novos ecossistemas fluviais com aumento de produtividade;
  - Permite, através de monitoramento, melhor conhecimento de dados ambientais da área de influência (bacia hidrográfica, por exemplo), contribuindo desta forma para uma melhoria da gestão ambiental desta unidade (HYDRO-QUÉBEC, 2002);
  - Permite, através de estudos, aumento do conhecimento e manejo de espécies (IHA, 2003).
- **Negativos**
  - Formação dos reservatórios através da inundação permanente de habitats, que podem provocar perda ou modificação da biodiversidade;
  - Perda ou modificação de habitat de peixes e barreira para migração;
  - Modificação na qualidade da água no reservatório e à jusante;
  - Modificação do regime hidrológico;

- Sedimentação ou assoreamento de reservatórios (IHA, 2003).

O discurso sobre a energia hidrelétrica aqui apresentado, não tem como objetivo fazer apologia dos grandes empreendimentos, uma vez que não são somente razões técnicas que definem o porte das barragens. A decisão por uma grande, média ou pequena barragem depende do volume do corpo d'água, suas características topo-altimétricas e de uma gama de considerações, com as necessidades do mercado e oportunidades econômicas, aspectos políticos, avaliações de ordem social e das fragilidades ambientais das localidades. Algumas vezes são usos compartilhados (ou múltiplos) que estabelecem a cota máxima da elevação das águas: as barragens destinadas à navegação e de apoio a esta, ou cujo fim é a regularização da vazão e controle de cheias, ou irrigação, aqüicultura e muitos outros casos. Na maioria das vezes, os custos são os fatores restritivos. Esses custos são tanto os da obra, diretos, como os indiretos e associados, relativos aos aspectos socioambientais, de implantação de usos múltiplos e promoção do desenvolvimento regional. As diferenças socioambientais entre as pequenas e grandes barragens, no fundo, serão na escala e na intensidade de impactos causados sobre a população residente e o ecossistema primitivo. Quanto maior o vulto da obra hidráulica construída, tanto maior a modificação das condições naturais anteriores. A tendência atual é o incentivo ao desenvolvimento de pequenas e médias centrais hidrelétricas que apresentam a melhor relação custo benefício (DUNN, 2003). Nas regiões rurais os sistemas de pequena escala já são economicamente superiores à extensão das linhas de transmissão, e ambientalmente preferíveis à dependência contínua de geradores a diesel.

### **3.4. ENERGIA DA BIOMASSA**

Através da fotossíntese, as plantas capturam energia do Sol e a transformam em energia química. Esta energia pode ser convertida em eletricidade, combustível ou calor. As fontes orgânicas que são usadas para produzir energias usando este processo são chamadas de biomassa, portanto, entende-se por biomassa a matéria orgânica de origem animal ou vegetal que pode ser utilizada na produção de energia (TWIDELL & WEIR, 1986). Da mesma maneira que a energia hidráulica e outras fontes renováveis, a biomassa é uma forma indireta de energia solar, pois resulta da conversão da energia solar em energia química por meio da fotossíntese, base dos processos biológicos dos seres vivos. Estima-se a existência de 2 trilhões de toneladas

de biomassa no globo terrestre, ou seja, cerca de 400 toneladas *per capita*, o que, em termos energéticos, corresponde a oito vezes o consumo mundial de energia primária, hoje da ordem de 400 EJ<sup>1</sup> ao ano. Uma das principais vantagens da biomassa é o seu aproveitamento direto por meio da combustão da matéria orgânica em fornos ou caldeiras. Atualmente, a biomassa vem sendo bastante utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de co-geração e no suprimento de eletricidade de comunidades isoladas da rede elétrica (GRAUER e KAWANO, 2001).

Os combustíveis mais comuns da biomassa são resíduos agrícolas, madeira e plantas como cana-de-açúcar, colhidas com o propósito de gerar energia. No entanto, é possível converter o lixo municipal em combustíveis para o transporte, para as indústrias e mesmo para residências. Já existem milhares de casas e indústrias que utilizam biomassa como energia. De acordo com o Banco Mundial, de 50% a 60% da energia nos países em desenvolvimento provém da biomassa, e metade da população mundial cozinha com madeira (MINGACHO et al., 2003).

### **3.4.1. Biomassa no Brasil**

Provavelmente as principais fontes de energia do século XXI serão de origem biológica, produzidas a partir da biotecnologia. A Agência Internacional de Energia (AIE) calcula que dentro de mais ou menos vinte anos cerca de 30% do total de energia consumido pela humanidade será proveniente da biomassa. A abundância das fontes de biomassa disponíveis no Brasil, a vasta gama de processos de transformação utilizados para sua valorização e a diversidade de energéticos obtidos para uso pelo consumidor final levam o país a desenvolver um amplo espectro de atividades no campo da biomassa.

A produção de energia elétrica a partir da biomassa, atualmente, é muito defendida como uma alternativa importante para países em desenvolvimento e também outros países. Programas nacionais começaram a ser desenvolvidos visando o incremento da eficiência de sistemas para a combustão, gaseificação e pirólise da biomassa.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (edição 2003), a participação da biomassa na matriz energética brasileira é de 27%, a partir da utilização de lenha de

---

<sup>1</sup> 1 EJ = 10<sup>18</sup> Joule

carvão vegetal (11,9%), bagaço de cana-de-açúcar (12,6%) e outros (2,5%). O potencial autorizado para empreendimentos de geração de energia elétrica, de acordo com a ANEEL, é de 1.376,5 MW, quando se consideram apenas centrais geradoras que utilizam bagaço de cana-de-açúcar (1.198,2 MW), resíduos de madeira (41,2 MW), biogás ou gás de aterro (20 MW) e licor negro (117,1 MW). Neste ano, três novas centrais geradoras a biomassa (bagaço de cana) entraram em operação comercial no país, inserindo 59,44 MW à matriz de energia elétrica nacional. Projeções da Agência Internacional de Energia indicam que o peso relativo da biomassa na geração mundial de eletricidade deverá passar de 10 TWh, em 1995, para 27 TWh em 2020 (IEA, 1998; ELETROBRAS, 2002).

Os recursos renováveis representam cerca de 20% do suprimento total de energia no mundo, sendo 14% proveniente de biomassa e 6% de fonte hídrica. No Brasil, a proporção da energia total consumida é cerca de 35% de origem hídrica e 25% de origem em biomassa, significando que os recursos renováveis suprem algo em torno de 2/3 dos requisitos energéticos do País (ELETROBRAS, 2002).

No setor de papel e celulose (cascas de árvore, cavacos e licor negro), o excedente seria de 1.000 MW. Como não existe a obrigatoriedade de compra do excedente produzido pelo co-gerador, as concessionárias não se interessam. Ou, quando compram, oferecem preços pouco competitivos, e por isso o investimento não é compensador para o co-gerador.

No Brasil, cerca de 30% das necessidades energéticas são supridas pela biomassa sob a forma de: lenha para queima direta nas padarias e cerâmicas, carvão vegetal para redução de ferro gusa em fornos siderúrgicos e combustível alternativo nas fábricas de cimento do norte e do nordeste. No sul do país queima-se carvão mineral, álcool etílico ou álcool metílico para fins carburantes e para a indústria química.

O Brasil ainda apresenta a vantagem de desenvolver, há mais de 20 anos, o Proálcool (Programa do Álcool), com uma produção anual de 90 milhões de toneladas de bagaço de cana (safra de 2000).

O bagaço de cana e outros resíduos combustíveis são utilizados para geração de vapor para produzir eletricidade, como nas usinas de açúcar e álcool, que não necessitam de outro combustível, pelo contrário ainda sobra bagaço para indústria de celulose. Caso utilizado de forma eficiente, isto forneceria um excedente de 4 mil MW

ao sistema energético brasileiro. No entanto, assim como no caso das energias eólica e solar, faltam financiamento e políticas adequadas.

O BNDES acabou de lançar um programa para a implementação de co-geração no setor de biomassa, no qual o empreendedor poderá usar como garantia o contrato de longo prazo com a concessionária.

### **3.4.2. Biodiesel**

O biodiesel, fabricado a partir de óleos derivados de plantas oleaginosas, como palma, buriti e soja também poderia ser usado nos geradores de energia de comunidades isoladas. Outra opção seria adicionar biodiesel, na proporção de até 3%, ao diesel utilizado no setor de transportes brasileiro. Esta medida melhoraria a condição ambiental nas cidades, diminuindo significativamente a emissão de poluentes.

A utilização de óleos vegetais para substituir combustíveis fósseis data da utilização satisfatória do motor diesel, em 1900. Entretanto, os problemas ocasionados pelo uso de óleos in natura fomentaram o desenvolvimento e a obtenção do biodiesel, que não exige mudanças nos motores.

Os estudos desenvolvidos pelo Pró-Óleo entre 1973 e 1986, no Brasil, analisaram, sob o ponto de vista técnico, o biodiesel derivado de praticamente todos os óleos vegetais disponíveis. Sua aplicação foi evitada pelo Contra-Choque do Petróleo, que reduziu os preços dos derivados do óleo cru (KAZAY e LEGEY, 2001).

As pesquisas internacionais mais recentes, feitas na década de 1990, fomentaram um sistema de plantio e produção de biodiesel na Europa. Há quatro anos, a Alemanha tem 100 mil veículos circulando com biodiesel puro. Os resultados são tão positivos que as montadoras mantêm a garantia para os veículos novos que utilizarem este combustível.

A retomada do assunto no Brasil deve-se à necessidade de reduzir as importações de óleo diesel, das vantagens do combustível limpo para a saúde das pessoas, além da possibilidade de comercialização dos certificados de redução de emissões de gases estufa e do incomensurável benefício social da oferta de postos de trabalho para a produção de biodiesel.

A Resolução 180/98 da ANP (Agência Nacional de Petróleo), que regulamenta o uso de combustíveis não-especificados, requer a realização de testes e a emissão de relatório para que seja concedida a autorização para comercialização do produto no

varejo. Esses testes medem as emissões de poluentes, além das mesmas características analisadas pelos testes realizados no âmbito do Pró-Óleo.

### **3.4.3. Resíduos urbanos**

O aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos vem sendo feito há décadas na maioria dos países do Hemisfério Norte. Esse aproveitamento pode ser realizado pela conservação de energia, obtida por intermédio da reciclagem de papéis, plásticos, vidros e metais, assim como pela geração, mediante o uso dos restos alimentares para produção de combustíveis que serão consumidos por usinas termelétricas.

O Brasil produz 20 milhões de toneladas desses resíduos por ano, dos quais 65% são restos alimentares e os demais 35% de recicláveis (papéis, plásticos, vidros e metais). O custo para a execução da coleta seletiva desses materiais é de US\$ 150/tonelada para os recicláveis e de US\$ 20/tonelada para os demais. É possível reduzir estes custos, pois a média internacional da coleta seletiva é de US\$ 50/tonelada. A conservação por meio da reciclagem pode ofertar cerca de 30 TWh ao país, quase 10% do consumo atual, ao custo de US\$ 35/MWh, abaixo dos valores médios do PROCEL (Programa de Conservação de Energia Elétrica) para o ano 2000, na faixa de US\$ 40/MWh. A geração, que pode agregar mais 7% à oferta, deve consorciar algumas das rotas tecnológicas disponíveis, mas todas elas são a inserção de um estágio nas usinas termelétricas tradicionais, qual seja, o beneficiamento dos resíduos para obtenção do combustível (ELETROBRÁS, 2004).

Os atuais vazadouros de lixo dispõem de biogás, decorrente da decomposição da matéria orgânica em ambiente anaeróbico, que deve ser recuperado. Entretanto, esse modelo não deve ser fomentado, pois a utilização de áreas para dispor lixo é cada vez mais combatida pela sociedade, seja pelo fato de impossibilitar o uso para outro fim, seja pelo aumento de custo de transporte, visto que os espaços disponíveis estão cada vez mais distantes das cidades.

Para os resíduos que serão gerados, existem várias tecnologias para produzir combustível, além de subprodutos, e para reduzir a quantidade de material a ser disposto. Uma delas é a digestão acelerada, que produz biogás e adubo, podendo ter aproveitamento energético similar ao caso acima. Outra linha de beneficiamento envolve a pirólise e a gaseificação, que utilizam energia térmica e reagentes para

separar os gases presentes na matéria. Essas tecnologias possibilitam a utilização de um combustível cotado em moeda nacional, muitas vezes com custo negativo (como a disposição em vazadouros será evitada, o custo dessa operação pode ser repassado às usinas que consumirem os resíduos), disponível exatamente junto aos centros de carga e passível de compensar emissões de gases do efeito estufa das usinas movidas a gás natural o que pode fomentar as Usinas Termelétricas Híbridas (UTHs) (MINGACHO et al., 2003). Seus pontos negativos são o maior investimento (por terem um estágio a mais que as demais UTEs) e a atratividade pouco menor, de 19%, em comparação com os 21% das UTEs. Entretanto, a maior atratividade das UTEs decorre do aumento dos valores normativos para a geração feita com gás natural

#### **3.4.4. Impactos ambientais**

##### **➤ Vantagens**

- Em geral, salvo algumas exceções, são energias "limpas", isto é, que não produzem poluição e nem se esgotam e, pelo contrário, até podem contribuir para eliminar parte da poluição devido ao uso produtivo que fazem do lixo e outros resíduos (GRAUER e KAWANO, 2001);
- Contribui para conservação dos recursos naturais, pois a energia é obtida pela combustão de matéria orgânica proveniente de culturas energéticas (renováveis), resíduos agrícolas e urbanos;
- Geração de energia em sistemas de co-geração e em comunidades isoladas;
- Baixa emissão de CO, se a queima for completa mediante adequada oxigenação da combustão (MINGACHO et al., 2003)..

##### **➤ Desvantagens**

- Erosão e empobrecimento dos solos em culturas energéticas;
- Comprometimento da qualidade da água pela contaminação de herbicidas e águas residuais do processo de resfriamento das centrais de combustão;
- Emissão de particulados, exigindo sistemas de filtros (MINGACHO et al., 2003).

### **3.5. ENERGIA DO MAR**

Existem três maneiras de produzir energia usando o mar: as ondas, as marés ou deslocamento das águas e as diferenças de temperatura dos oceanos:

#### **3.5.1. A energia das ondas**

A energia cinética do movimento das ondas pode ser usada para pôr uma turbina em funcionamento. A elevação da onda numa câmara de ar provoca a saída do ar lá contido; o movimento do ar pode fazer girar uma produzindo energia elétrica através do gerador. Quando a onda se desfaz e a água recua, o ar desloca-se em sentido contrário passando novamente pela turbina, entrando na câmara por comportas especiais normalmente fechadas (INETI, 2001; EPRI, 2005).

Esta é apenas uma das maneiras de retirar energia das ondas. Atualmente, utiliza-se o movimento de subida/descida da onda para dar potência a um êmbolo que se move para cima e para baixo num cilindro. O êmbolo pode por um gerador a funcionar. Os sistemas para retirar energia das ondas são ainda muito pequenos e apenas suficientes para iluminar uma casa ou algumas bóias de aviso por vezes colocadas no mar (INETI, 2001; EPRI, 2005).

#### **3.5.2. A energia térmica dos oceanos**

O último tipo de energia oceânica usa as diferenças de temperatura do mar. A água do mar é mais quente á superfície porque está exposta aos raios solares. Pode-se usar as diferenças de temperatura para produzir energia, no entanto, são necessárias diferenças de 38° Fahrenheit entre a superfície e o fundo do oceano. Esta fonte de energia está sendo usada no Japão e no Hawaii, mas apenas como demonstração e experiência (INETI, 2001; EPRI, 2005).

#### **3.5.3. A energia das marés**

As marés são o resultado da combinação de forças produzidas pela atração do Sol e da Lua e do movimento de rotação da Terra que levam à subida e descida da água dos oceanos e mares: as marés. O movimento vertical da água dos oceanos, associado à subida e descida das marés, é acompanhado por um movimento horizontal, denominado por correntes das marés. Estas correntes têm uma periodicidade idêntica à das oscilações verticais. Efeitos das zonas terrestres (bacias



hidrográficas e baías, estreitos e canais) provocam restrições a estes movimentos periódicos podendo daí resultar elevadas amplitudes ou elevadas velocidades da corrente da maré.

O aproveitamento energético das marés é obtido através de um reservatório formado junto ao mar, através da construção de uma barragem, contendo uma turbina e um gerador. O aproveitamento é feito nos dois sentidos: na maré alta, a água enche o reservatório, passando através da turbina, e produzindo energia elétrica, na maré baixa, a água esvazia o reservatório, passando novamente através da turbina, agora em sentido contrário ao do enchimento, e produzindo energia elétrica (INETI, 2001; EPRI, 2005).

Para que este sistema funcione bem são necessárias marés e correntes fortes. Tem que haver um aumento do nível da água de pelo menos 5,5 metros da maré baixa para a maré alta. Existem poucos sítios no mundo onde se verifique tamanha mudança nas marés. A maioria das instalações de centrais de energia das ondas existentes são de potência reduzida, situando-se no alto mar ou junto à costa, operando para fornecimento de energia elétrica a faróis isolados ou carregamento de baterias de bóias de sinalização. As instalações de centrais de potência média apenas têm interesse econômico em casos especiais de geometria da costa (INETI, 2001).

#### **3.5.4. Panorama mundial**

A idéia de extrair a energia acumulada nos oceanos, utilizando a diferença da maré alta e da maré baixa, não é nova. Já no século XII, havia na Europa moinhos submarinos, que eram instalados na entrada de estreitas baías — o fluxo e o refluxo das águas moviam as pedras de moer. Mas os pioneiros da exploração moderna das marés foram os habitantes de Husum, pequena ilha alemã no mar do Norte. Ali, por volta de 1915, os tanques para o cultivo de ostras estavam ligados ao mar por um canal, onde turbinas moviam um minigerador elétrico durante a passagem da água das marés; a eletricidade assim produzida era suficiente para iluminar o povoado (THORPE, 2001).

O número de locais no mundo em que esta situação ocorre é reduzido. Nos países como a França, o Japão e a Inglaterra este tipo de energia gera eletricidade. No Brasil, temos cidades com grandes amplitudes de marés, como São Luís - Baía de São Marcos, no Maranhão - com 6,8 metros e em Tutóia com 5,6 metros. Mas nestas

regiões, infelizmente, a topografia do litoral não favorece a construção econômica de reservatórios, o que impede seu aproveitamento (THORPE, 2001).

Em Portugal, há uma central na ilha do Pico nos Açores. A central é do tipo de coluna de água oscilante, com uma turbina *Wells* de eixo horizontal qual aciona um gerador elétrico de velocidade variável, com a potência de 400 KW (FALCÃO, 1995).

Na Europa, foi construída uma central de produção de energia das marés em La Rance (França), a 10 km da desembocadura do rio Rance no Canal da Mancha. Neste local a amplitude da maré é de 13 metros. As turbinas da central funcionam quando enche e quando esvazia o estuário do rio Rance. Está em funcionamento desde 1966 e produz cerca de 550 GWh anualmente (INETI, 2001).

O exemplo francês estimulou os soviéticos em 1968, a instalar perto de Murmansk, no mar de Barents, Círculo Polar Ártico, uma usina piloto de 20 MW, que serviria de teste para um projeto capaz de gerar 100 mil MW. A usina exigiria a construção de um gigantesco dique de mais de 100 quilômetros de comprimento. Mas a idéia foi arquivada quando se verificou que seria economicamente inviável.

Os canadenses, em 1984, acionaram uma usina experimental de 20 MW, instalada na baía de Fundy (na fronteira com os Estados Unidos, na costa Leste), onde o desnível de 20 metros entre as marés é o maior do mundo. Na usina de Rance, por exemplo, a diferença é de 13,5 metros (THORPE, 2001).

O Centro de Ciência e Tecnologia da Marinha do Japão estuda formas de obter energia das ondas do mar. Para tanto, começou a testar em julho um gerador flutuante que atende pelo estranho nome de Baleia Poderosa. É uma balsa que foi ancorada na entrada de uma baía com sua frente apontada para a direção das ondas, mede 50 metros de comprimento por 30 de largura e 12 de profundidade, e é dividida internamente em três compartimentos, todos cheios de ar. Trata-se de um sistema engenhoso que converte a energia das ondas em energia pneumática. O balanço das ondas faz com que o nível da água no interior das câmaras suba e desça sem parar, fazendo-as funcionar como pistões gigantes. Quando o nível do mar sobe, a água comprime o ar que é afunilado na direção de uma turbina, movendo suas pás e gerando 110 kW de eletricidade (THORPE, 2001).

### **3.5.5. Panorama brasileiro**

A primeira usina de ondas para a geração de energia elétrica das Américas vai funcionar no Ceará com recursos da (Financiadora de Estudos e Projetos) FINEP que participará com 50% dos R\$ 3,5 milhões necessários ao projeto. O volume de recursos, ainda em estudo, contempla a instalação de um projeto-piloto, com monitoramento pelo prazo de dois anos. O projeto está sendo coordenado pelo programa de Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE e UFC, 2005).

O desenvolvimento da tecnologia para a implantação do projeto envolve a Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE), da UFRJ, e Eletrobrás em parceria com o governo do Ceará e já passou da fase de testes. O próximo passo será a implantação do protótipo que prevê a instalação de duas células no Terminal Portuário do Pecém em São Gonçalo do Amarante, permitindo monitorar, acompanhar o desempenho, aprimorar a tecnologia e passar ao estágio comercial. A proposta, que deverá ser implementada a partir de outubro de 2005, envolve a geração de 50 kW, no total, volume que permite abastecer uma pequena fábrica ou atender 20 famílias. A pesquisa consumiu, até agora, cerca de R\$ 600 mil, recursos financiados pela Eletrobrás e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), além dos recursos aplicados pela COPPE, envolvida no projeto desde 2001 (ESTEFEN, 2005).

Dois laboratórios de grande porte da COPPE estão conduzindo os estudos - o de Tecnologia Submarina e o Tanque Oceânico. A equipe de Engenharia Oceânica trabalha no desenvolvimento da tecnologia para a usina - estruturada para comportar 20 módulos, no prazo de 2 anos, criando estrutura para 500 kW de potência instalada - com suporte em pesquisa associada à produção de petróleo. O processo envolve a movimentação de flutuadores pelas ondas do mar que por meio de braços mecânicos aciona bombas hidráulicas da usina. Essas bombas captam água tratada de um reservatório, através de uma tubulação em circuito fechado, alimentando um vaso de pressão, com acumulador hidropneumático. Esse conjunto fornece um jato d'água numa pressão equivalente a de uma queda d'água de 500 metros de altura e aciona a turbina hidráulica que, acoplada a um gerador, produz eletricidade. A tecnologia é 100% nacional e, no segundo estágio, a equipe vai trabalhar junto com a Universidade Federal do Ceará (UFC), encarregada de acompanhar a monitoração dos

equipamentos do protótipo e dos dados ambientais adquiridos, no período de 24 meses. Além disso, vai contribuir na definição das fundações no quebra mar, onde será instalada a unidade. A usina apresenta flexibilidade para aplicações ao longo da costa e tem condições de suprir comunidades em ilhas isoladas (ESTEFEN, 2005).

No Brasil, as ondas atingem entre 2 a 3 metros de altura, especialmente no Ceará, onde ventos alísios geram ondas com altura e período muito regulares. Essa é uma característica interessante torna o Estado também atrativo aos investimentos em eólica. A energia por ondas, baseada em dispositivos utilizados no mundo e diferentes dos nacionais, mostra que o custo do megawatts instalado é similar ao da eólica, mas o projeto piloto vai permitir quantificar melhor o custo, em termos de rendimento e adequação às condições locais (COPPE e UFC, 2005).

O Brasil tem 8.500 quilômetros de costa marítima, o que demonstra o grande potencial para geração de energia elétrica pela força das ondas que tem ganhado força nas últimas décadas por se tratar de energia limpa e renovável. Com este projeto, o Brasil estará se colocando no seleto grupo dos países, como Inglaterra e Escócia, que estão avaliando protótipos associados a essa tecnologia.

### **3.5.6. Impactos ambientais e socioeconômicos**

A desvantagem de se utilizar este processo na obtenção de energia é que o fornecimento não é contínuo e apresenta baixo rendimento. As centrais são equipadas com conjuntos de turbinas bulbo, totalmente imersas na água. A água é turbinada durante os dois sentidos da maré, sendo de grande vantagem a posição variável das pás para este efeito. No entanto existem problemas na utilização de centrais de energia das ondas que requerem cuidados especiais: as instalações não podem interferir com a navegação e têm que ser robustas para poder resistir às tempestades, mas suficientemente sensíveis para ser possível obter-se energia de ondas de amplitudes variáveis.

### **3.6. ENERGIA SOLAR**

A energia solar pode ser captada diretamente na forma de calor, ou indiretamente por coletores que a armazenam pelo aquecimento de fluidos (líquidos ou gasosos). Contudo, é a energia solar fotovoltaica, fruto da conversão direta em

eletricidade, a forma que tem apresentado o desenvolvimento mais notável nos últimos anos. Ela é produzida por uma diferença de potencial elétrico nas faces opostas de uma junção semicondutora, quando da absorção da luz (ELETROBRAS, 2004; INETI, 2001).

### **3.6.1. O efeito fotovoltaico**

A transformação da radiação eletromagnética (a luz solar) em energia elétrica é feita por células fotovoltaicas, ou células solares, que podem ser entendidas como dispositivos semicondutores que produzem uma corrente elétrica quando expostos à luz.

Os semicondutores mais comuns são os formados por elementos do grupo IV da tabela periódica, em especial silício (Si) e germânio (Ge), submetidos à dopagem (troca de alguns átomos da estrutura cristalina por átomos de outros elementos). Se a dopagem é feita com átomos pentavalentes, o cristal resultante é do tipo N. Se feita com átomos trivalentes, o cristal é do tipo P. Quando um cristal N é unido a um P forma-se uma junção P-N e surge um campo elétrico na região da junção (INETI, 2001; RODRÍGUEZ, 2002).

Quando a célula é exposta à luz (que, no nível atômico, atua como um fluxo de partículas chamadas fótons), parte dos elétrons do material iluminado absorve fótons e, graças à essa energia extra, se afastam dos átomos.

Os elétrons livres vagueiam pelo semicondutor até serem puxados pelo campo elétrico existente na área da junção e, através de uma ligação externa, são levados para fora da célula, ficando disponíveis para uso (energia elétrica).

Um conjunto de células fotovoltaicas interligadas forma um módulo. Os módulos são encapsulados com materiais que garantam rigidez mecânica, protejam as células contra danos e condições climáticas, evitem que a umidade do ar atinja os contatos elétricos e conduzam bem o calor, para reduzir a temperatura de trabalho das células.

A disposição das células solares é importante: quanto mais células são interligadas em série, maior a tensão alcançada no módulo, e quanto mais células atuam em paralelo (ou quanto maior a superfície de cada célula), maior a corrente. A mesma lógica vale também para a conexão de módulos em um gerador fotovoltaico (INETI, 2001; RODRÍGUEZ, 2002).

### **3.6.2. Impactos ambientais e socioeconômicos**

#### **3.6.2.1. Vantagens da energia fotovoltaica:**

Os sistemas fotovoltaicos apresentam uma série de vantagens (ELETROBRAS, 2004 ; INETI, 2001 e RODRÍGUEZ, 2002):

- Sistemas bastante simples, onde inexistem peças mecânicas móveis.
- Característica modular;
- Prazo curto de instalação;
- Elevado grau de confiabilidade, e exigem baixa manutenção;
- Representam uma fonte de energia elétrica renovável, silenciosa e não poluente.
- Baixas perdas durante a transmissão (a geração e o consumo são próximos);
- É uma fonte energética com atrativos para o acoplamento à rede elétrica pública (espécie de mini-usinas).
- Os painéis solares são construídos com base na tecnologia do silício e têm experimentado redução de custos desde suas primeiras aplicações em satélites. Há um grande potencial para a redução de custos dos equipamentos para a energia fotovoltaica podendo-se esperar que ela possa vir a ser uma alternativa economicamente viável na geração de potência elétrica para o futuro próximo.
- A energia solar térmica é amplamente utilizada principalmente para aquecimento de água em regiões de clima quente e ensolarado. Instalados em casas, edifícios, hospitais, etc., os coletores solares podem substituir com vantagens o uso dos chuveiros elétricos. Especialistas do setor acreditam que no Brasil o chuveiro elétrico seja responsável por 7% de todo o consumo nacional de energia. A vantagem é econômica, já que o chuveiro é o aparelho que mais consome energia nas residências.
- Outra vantagem é economia para o sistema elétrico, que geralmente fica sobrecarregado no início da noite (horário de ponta), no horário em que boa parte dos brasileiros está com seus chuveiros ligados.

#### **3.6.2.2. Desvantagens da energia fotovoltaica**

As desvantagens do sistema fotovoltaico são:

- A célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, pois cada elétron que a deixa é substituído pelo retorno de outro. Quando há necessidade de armazenamento o mais comum é a utilização de baterias tipo chumbo-ácido.
- A mais tradicional das tecnologias fotovoltaicas (Silício Cristalino c-Si) apresenta robustez e confiabilidade, em contrapartida os custos de produção são elevados e praticamente já se esgotaram as possibilidades para reduzi-los;
- Eficiência ao redor de 15% a 25% e a tecnologia de filmes finos apresenta uma eficiência de 7 a 10% para os painéis comerciais. A área deve ser levada em conta na análise econômica quando da opção por uma ou outra
- Há o problema de toxicidade , sendo assim, os painéis solares devem ter um descarte de modo adequado ou serem submetidos à reciclagem.
- O processo de reciclagem ainda não atingiu um nível de desenvolvimento satisfatório além de apresentar custos muito altos.

### **3.6.3. Tecnologias disponíveis**

Para aplicações terrestres, dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se por ordem decrescente de utilização: o silício cristalino (c-Si); o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H ou simplesmente a-Si); o telureto de cádmio (CdTe) e compostos relacionados ao disseleneto de cobre e índio (CuInSe<sub>2</sub> ou CIS) e ao disseleneto de cobre, gálio e índio (CuInGaSe<sub>2</sub> ou CIGS). Neste último aparecem elementos altamente tóxicos (Cd, Te, Se) ou muito raros (Ga, Te, Se, In, Cd), ou ambos (INETI, 2001).

### **3.6.4. Sistemas autônomos e sistemas interligados à rede elétrica pública**

Os sistemas solares fotovoltaicos podem ser classificados, basicamente, em duas categorias: Autônomos e Interligados à rede elétrica local. A diferença entre ambos consiste na orientação dos painéis solares e a existência ou não de um sistema acumulador de energia (bateria).

O sistema autônomo precisa de um sistema acumulador de energia. É parte imprescindível dada a intermitência da geração fotovoltaica e apresenta componentes de mais alto custo. Por exemplo, uma bateria tem uma vida útil 4 a 6 vezes menor do que a dos painéis. Entretanto os custos desse sistema se comparam à extensão da

rede elétrica pública para atender pequenas demandas em locais de difícil acesso. Em localidades remotas, que não contam com fornecimento de energia elétrica convencional ou em regiões de difícil acesso à rede elétrica, sistemas fotovoltaicos isolados podem ser a solução. Neste caso, a energia gerada deve ser parcialmente armazenada em bancos de baterias. O excesso de energia gerado durante períodos de elevada radiação solar, ou de baixo consumo, pode ser armazenado, para uso durante a noite, por exemplo. Sistemas fotovoltaicos podem ser a fonte principal de energia para consumo residencial e outras atividades, como o bombeamento de água para irrigação (RODRÍGUEZ, 2002; GUELLER, 2002).

A outra situação possível envolve a utilização de um sistema de geração fotovoltaico como uma fonte de eletricidade conectada em paralelo com a rede elétrica, em co-geração. Neste sistema, o consumidor utiliza primariamente a energia gerada localmente em painéis fotovoltaicos. Qualquer diferença entre o consumo e a geração local é fornecida ou consumida pela rede de energia, dispensando o uso de baterias. Do ponto de vista do consumidor, a vantagem é a redução direta do custo da conta de eletricidade. Do ponto de vista do sistema de energia, as vantagens são a liberação de capacidade de geração e transmissão de energia, o nivelamento da curva de carga, a redução de custos e a descentralização da geração.

Apresenta-se como ótima opção no verão quando o consumo de equipamentos domésticos como ar condicionado causa um pico de consumo para ser atendido pelas concessionárias de eletricidade.

A indústria fotovoltaica apresenta uma média de crescimento de 15% ao ano. Em termos absolutos, no entanto, a produção anual de painéis solares ainda é insignificante, tanto no contexto energético mundial, como em relação aos níveis de produção mundial de células fotovoltaicas necessárias para que o seu potencial de redução de custos seja realizado.

### **3.6.5. Utilização de aquecimento solar**

Os sistemas fotovoltaicos têm recebido grande atenção da comunidade técnica internacional. Como consequência, têm sido apontados como umas das grandes oportunidades no setor energético neste princípio de milênio. A produção mundial de painéis fotovoltaicos vem crescendo expressivamente. Essa tendência é fruto de um



grande esforço tecnológico e político, no sentido de reduzir custos e melhorar a eficiência e a confiabilidade dos painéis (INETI, 2001).

Os sistemas fotovoltaicos vêm recebendo grande atenção em vários países. Projetos como Niewland (complexo residencial de 5 mil casas, com 1 MW de capacidade de geração fotovoltaica), na Holanda, assim como outros igualmente expressivos, nos EUA, Japão, Israel e Alemanha, são indicativos da determinação desses países em promover a utilização da energia fotovoltaica em centros urbanos. Nesses países, a energia elétrica é essencialmente gerada por usinas termelétricas a carvão, o que aumenta o interesse na energia solar, sob o ponto de vista ambiental (KAZAY e LEGY, 2001).

Painéis fotovoltaicos são disponíveis hoje em várias apresentações, além da clássica forma plana: como telhas, laminados flexíveis, placas semitransparentes etc. Isto possibilita a integração dos painéis fotovoltaicos às edificações, com um mínimo de impacto arquitetônico. A co-geração em edifícios comerciais permite a redução de custos e é particularmente vantajosa quando se lembra que as atividades nesses prédios se concentram durante o dia, no período de disponibilidade da energia solar.

No caso do Brasil, a extensão territorial e os níveis elevados de radiação solar, durante todo o ano e em praticamente todo o seu território, estão entre os principais fatores que justificam uma política de apoio à co-geração fotovoltaica.

Segundo dados da Eletrobrás, em 1998 havia 17,5 milhões de chuveiros elétricos no Brasil. A energia elétrica usada para aquecer água para o banho, responde por 26% do consumo doméstico brasileiro e a mais de 6% do consumo elétrico nacional. Para o banho de uma pessoa exige-se a inundação de uma área de 56 m<sup>2</sup>. Em duas semanas o Sol irradia à Terra uma quantidade de energia equivalente à de todas as reservas mundiais de carvão, gás e petróleo (LABSOLAR, 2000).

A economia produzida com o uso de coletores solares para o aquecimento da água pode chegar a 50% na conta do consumidor residencial. Israel tem 70% das casas contando com aquecimento de água via coletores solares.

No Brasil utiliza-se mais de 67% do consumo nacional de energia elétrica, apenas para o fim de aquecimento de água. O aquecimento solar tem totais condições de se tornar a opção brasileira de aquecimento de água com custos competitivos, tecnologia própria e uma imensa riqueza energética através de uma fonte inesgotável de energia, o Sol (ELETROBRÁS, 2004).

### 3.6.6. Energia solar no Brasil

Várias instituições de pesquisa e universidades brasileiras realizam intenso trabalho de pesquisa no campo da modelagem da radiação solar e transferência radiativa vinculada à pesquisa climática. A Universidade de São Paulo, através de seu Instituto de Astronomia e Geofísica (USP/IAG), tem trabalhado ativamente na parametrização das propriedades radiativas de aerossóis e nuvens objetivando o aprimoramento dos modelos climáticos. O INPE/CPTEC (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos) possui também um modelo de transferência radiativa, GL 1.0, que emprega imagens do satélite GOES-E no espectro visível e infravermelho para prover diária, semanal e mensalmente gráficos solares horizontais globais com resolução em solo de aproximadamente 12 km x 12 km para algumas regiões selecionadas do Brasil (Sul-Sudeste e Nordeste) com propósitos climatológicos. O LABSOLAR (Laboratório de Energia Solar) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) desenvolveu, em colaboração com o INPE e o GKSS (Alemanha), o modelo BRASIL-SR que é coerentemente utilizado na avaliação de recursos de energia solar no Brasil (SWERA, 2005).

O primeiro Atlas de Radiação Solar de Superfície por técnica de satélite no Brasil foi publicado em 1998 através de um acordo de colaboração entre UFSC, INPE e INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Ele fornece a mais abrangente avaliação da radiação solar de superfície sobre um plano horizontal para o Brasil, baseada no modelo de transferência radiativa física espectral validada em solo. O BRASIL-SR utiliza dados de satélite como entrada, médias diárias, mensais e anuais de dados de radiação horizontal global, fornecidos em resolução de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , juntamente com informações sobre variabilidade e zonas climáticas. O algoritmo emprega dados digitais do satélite GOES-8 no canal visível (0.52 a 0.72  $\mu\text{m}$ ). Uma nova versão deste modelo foi desenvolvida pelo INPE e está agora em processo de validação (SWERA, 2005).

No que concerne a dados solares de estações de superfície, o CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito) disponibilizou através da Internet um software que dá ao usuário acesso a um banco de dados de médias diárias de radiação solar horizontal global para o território brasileiro baseadas na interpolação de 350 estações de superfície do CENSOLAR-1993. Esse banco de

dados foi extensivamente utilizado para implementação do projeto PRODEEM. Nesta mesma linha, a Universidade de Pernambuco, através de seu grupo de pesquisa de Fontes Alternativas de Energia (FAE), publicou em 1996 um Atlas Solar do Brasil baseado na compilação interpolada de aproximadamente 30 anos de dados de superfície da rede de actinógrafos e piranômetros do INMET (cerca de 571 estações de superfície) (CRESESB, 2005).

O Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR) da Universidade Federal de Santa Catarina possui intensa capacitação em pesquisa e aplicação de energia solar e avaliação de recursos de energia. O LABSOLAR tem duas estações BSRN/WMO (*Baseline Surface Radiation Network — World Meteorological Organization*), uma em Santa Catarina, sul do Brasil, e outra em Balbina, norte do Brasil, na região amazônica. Ambas são estações de radiação solar de primeiro grau, produzindo dados de radiação direta, global e difusa no plano horizontal para a extensão espectral solar visível e infravermelha, juntamente com diversas variáveis meteorológicas de interesse. O LABSOLAR controla quatro outros sítios de radiação no estado de Santa Catarina e instalará dentro em breve três sítios adicionais na região amazônica em colaboração com o governo alemão. Estas estações são principalmente utilizadas como sítios de validação para o modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, desenvolvido conjuntamente com o INPE. Entre outras instalações direcionadas à pesquisa e desenvolvimento tecnológico dos projetos de energia solar, é importante mencionar as instalações para calibração dos pireliômetros e piranômetros. Em parceria com o INPE, o LABSOLAR organiza e hospeda um arquivo histórico de imagens do Brasil dos satélites METEOSAT (1994-95) e GOES-8 (1996 à 2003) no alcance espectral visível e infravermelho. Em 1998, o LABSOLAR lançou o primeiro Atlas de Radiação Solar do Brasil derivado de satélite, em colaboração com o INPE e INMET e está preparando uma versão atualizada desse Atlas (LABSOLAR, 2000).

## 4. ENERGIA EÓLICA

A Energia Eólica tem sua origem a partir do vento – atmosfera em movimento – que é a associação entre a energia solar e a rotação planetária. Todos os planetas envoltos por gases no sistema solar demonstram a existência de distintas formas de circulação atmosférica e apresentam ventos em suas superfícies. A circulação atmosférica constitui-se de um mecanismo solar-planetário permanente. Sua duração é da ordem de bilhões de anos. O vento é considerado fonte renovável de energia (AMARANTE et al. , 2001).

Os primeiros aproveitamentos da força dos ventos foram em máquinas para produzir trabalho, na moagem de grãos, serrarias e bombeamento d'água. Mais tarde, foram de grande importância na fabricação de papel, em produção de óleos vegetais e até em grandes projetos de drenagem (USDOE, 1996).

### FIGURA 4.1 – PARQUE EÓLICO NOS ESTADOS UNIDOS



FONTE: USDOE, 2004.

#### 4.1. HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA

É impossível apontar o momento na História, quando o homem parou de vagar em torno da Terra na busca de alimento e abrigo e começou a refletir sobre as forças que governavam a sua existência. Sua primeira e débil tentativa de entender o meio

ambiente tornou-se a base da ciência. Quando foi que o homem começou a raciocinar sobre as forças da natureza e como ele poderia tirar proveito delas?

Desde os mais antigos tempos da história, as pessoas têm utilizado a energia do vento. Acredita-se que foram os egípcios por volta de 5000 a.C. os primeiros a fazer uso prático do vento. Em torno do ano 2800 a.C., a energia do vento conduziu barcos ao longo do Rio Nilo, quando se começou a usar velas para ajudar a força dos remos dos escravos. Eventualmente, as velas ajudavam o trabalho da força animal em tarefas como moagem de grãos e bombeamento de água.

Por volta de 200 a.C., moinhos de vento simples apareceram esparramados ao redor do mundo. Os persas começaram a usar a força do vento poucos séculos antes de Cristo, e pelo ano 700 d.C., estavam construindo moinhos de vento verticais elevados para serem usados como força nas mós, na moagem de grãos.

Outras civilizações do Oriente Médio, mais notavelmente os muçulmanos, continuaram onde persas deixaram e construíram seus próprios moinhos de vento. No século XI, os habitantes do Oriente Médio usavam intensivamente moinhos de vento para produção de alimentos e provavelmente a idéia foi levada para a Europa pelos comerciantes e participantes das cruzadas. Entretanto, acredita-se que foram os holandeses que desenvolveram o moinho de vento horizontal com hélices, adaptando-o para escoar lagos e pântanos no delta do Rio Reno através de bombeamento de água, para moagem de grãos e operações de serraria. A força do vento e da água logo se tornaram as fontes primárias da energia mecânica medieval inglesa (USDOE, 1996).

Durante a Idade Média, melhoramentos técnicos continuaram a ocorrer como na fabricação de lâminas aerodinâmicas, desenhos de engrenagens e, de forma geral, os desenhos dos moinhos de vento. As máquinas mais velhas eram os moinhos de vento em pilar com o propelente montado no topo do pilar assentado no chão. O pilar servia como pivô que permitia ao obreiro direcionar seu moinho de vento da melhor forma na direção do vento.

Os desenhos dos moinhos em poste, ou pilastra, logo foram desenvolvidos dentro de um capitel, no qual os mancais eram partes do capitel que seguravam as lâminas. As pessoas tinham que direcionar sua máquina de vento até a invenção, em 1750, da ventoinha, um direcionador automático acionado pelo próprio vento.

Quando os colonizadores trouxeram a tecnologia dos moinhos de vento para o Mundo Novo no final do século XIX, começaram a usá-los para bombear água para

fazendas e ranchos e mais tarde para gerar eletricidade para casas e indústria Os primeiros moinhos de vento nas novas colônias inglesas eram duplicatas das máquinas inglesas. Muitos dos desenhos melhorados na Holanda eram virtualmente ignorados (USDOE, 1996).

Em torno do ano 1850, Daniel Halliday começou a desenvolver o que se tornou o famoso moinho de vento americano de fazenda. Usado principalmente para bombear água, essa máquina é o familiar moinho de vento multi-lâmina, ainda visto hoje em muitas áreas rurais.

A primeira notícia que se tem registrado sobre o aproveitamento de energia eólica para a produção de energia elétrica data de 1887 nos Estados Unidos, quando Charles F. Brush construiu o que se acreditava ser a primeira turbina de operação automática (WINDPOWER, 2003).

No início do século, tem-se também notícia de alguns dos primeiros desenvolvimentos nessa área creditados aos dinamarqueses.

Para a geração de energia elétrica, também nos Estados Unidos, a partir da década de 1930, iniciou-se uma ampla utilização de pequenos aerogeradores para carregamento de baterias, o que favoreceu o acesso à energia elétrica aos habitantes do meio rural (AMARANTE et al., 2001).

A industrialização, primeiro na Europa e depois na América, conduziu a um gradual declínio do uso de moinhos de vento. A máquina a vapor europeia substituiu os moinhos de vento no bombeamento de água. Nos anos trinta, os programas de Administração da Eletrificação Rural trouxeram energia elétrica barata para a maioria das áreas rurais nos Estados Unidos.

Porém, a industrialização também reduziu o desenvolvimento de moinhos de vento maiores para gerar eletricidade.

As turbinas de vento, como eram comumente chamadas, apareceram na Dinamarca já em 1890 (PETERSEN, 1981). Muitos países europeus também construíram enormes geradores de vento. Durante os anos 1950 e 1960, os franceses construíram desenhos avançados de unidades de 100 kW a 300 kW. Os alemães construíram geradores de vento para fornecer energia extra para suas linhas de distribuição, mas por causa da rígida competição dos geradores de combustível fóssil, essas máquinas experimentais foram descartadas.

Nos anos quarenta, a maior turbina de vento daquele tempo começou a operar no topo da montanha Vermont, nos Estados Unidos. Esta turbina, com a capacidade de 1.25 megawatts, gerou energia elétrica e alimentou a rede de distribuição local por vários meses durante Segunda Guerra Mundial, mas a escassez de material devido à época da guerra e a carência de dinheiro trouxe um fim a este projeto depois que os ventos quebraram uma das lâminas de 8 toneladas.

A moderna turbina de vento de eixo vertical, incluindo uma convencional de duas lâminas foi inventada pelo engenheiro francês chamado D. G. Darrieus. Diferente das turbinas convencionais, que são reorientadas de acordo com o vento, esta é unidirecional, isto é, aceita o vento de qualquer direção vinda. Como o seu rotor e suas partes elétricas são na parte inferior da turbina, sua manutenção é muito mais prática, além de permitir uma variabilidade de aplicações elétricas e mecânicas maiores que as demais (MORETTI, 1986).

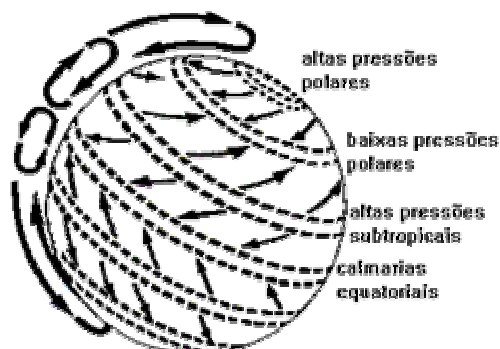
## **4.2. O VENTO**

### **4.2.1. Mecanismos de geração dos ventos**

A energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do Sol, isto porque os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra.

As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Conseqüentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares (CRESEB/CEPEL, 2004). O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos. A Figura 4.2 apresenta esse mecanismo.

**FIGURA 4.2 - FORMAÇÃO DOS VENTOS DEVIDO AO DESLOCAMENTO DAS MASSAS DE AR.**



FONTE: CRESESB/CEPEL, 2004

Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam 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 e podem ser classificados em:

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.
- Contra-Alísios: ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes.
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos.
- Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

Tendo em vista que o eixo da Terra está inclinado de  $23,5^\circ$  em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, 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 e compreendem as monções e as brisas.

As monções são ventos periódicos que mudam de direção a cada seis meses aproximadamente. Em geral, as monções sopram em determinada direção em uma estação do ano e em sentido contrário em outra estação.

Em função das diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol, inerentes a cada tipo de superfície (tais como mares e continentes), surgem as brisas que se caracterizam por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa. No período diurno, devido à maior capacidade da terra



de refletir os raios solares, a temperatura do ar aumenta e, como consequência, forma-se uma corrente de ar que sopra do mar para a terra (brisa marítima). À noite, a temperatura da terra cai mais rapidamente do que a temperatura da água e, assim, ocorre a brisa terrestre que sopra da terra para o mar. Normalmente, a intensidade da brisa terrestre é menor do que a da brisa marítima devido à menor diferença de temperatura que ocorre no período noturno.

Sobrepostos ao sistema de geração dos ventos descrito acima se encontram os ventos locais, que são originados por outros mecanismos mais específicos. São ventos que sopram em determinadas regiões e são resultantes das condições locais, que os tornam bastante individualizados. A mais conhecida manifestação local dos ventos é observada nos vales e montanhas. Durante o dia, o ar quente nas encostas da montanha se eleva e o ar mais frio desce sobre o vale para substituir o ar que subiu. No período noturno, a direção em que sopram os ventos é novamente revertida e o ar frio das montanhas desce e se acumula nos vales.

#### **4.2.2. Características do vento**

O vento é uma forma de energia cinética resultante da radiação solar. O vento resulta da circulação de massas de ar, causada por diferenças de pressão em regiões distintas da Terra. Essas diferenças de pressão têm origem térmica e estão relacionadas com a radiação solar e com os processos de aquecimento das massas de ar continentais e marítimas. Irregularidades da superfície, corpos de água, vegetação e rotação da terra também modificam os padrões de fluxo de vento (WALLACE & HOBBS, 1977).

O anemógrafo de uma estação meteorológica registra, ao longo do tempo (Figura 4.3), uma informação que, em princípio, é válida apenas para o exato local e altura em que está o sensor. Este vento medido é a resultante - naquele ponto específico - de movimentos atmosféricos que ocorrem em diferentes escalas (DEWI e SCHULTZ, 1993):

- **Escala sinótica:** de ordem planetária, de centenas a milhares de quilômetros, na qual se incluem, por exemplo, os ventos alísios, o Minuano, massas polares e frentes frias, centros ciclônicos e anticiclônicos de pressão. No Estado do Paraná, o Sistema Meteorológico do Paraná – SIMEPAR é o

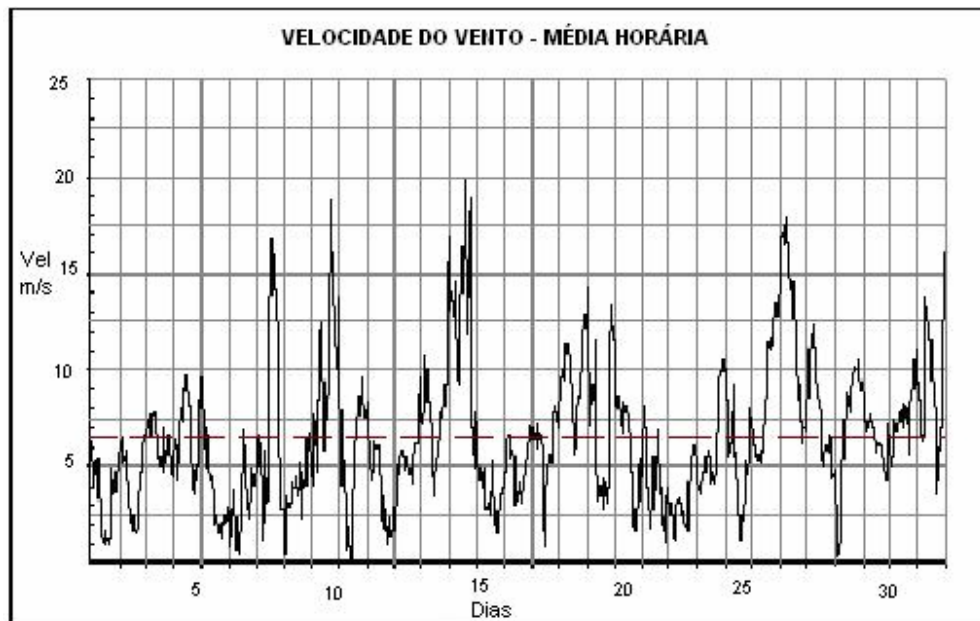
órgão adequado para subsidiar e fornecer informações relativas aos mecanismos de escala sinótica que determinam a distribuição e regime de ventos;

- **Mesoescala:** escala regional, da ordem de 1 km a 100-200 km com influências de relevo, brisas marinhas e brisas “serra-vale”, diferenças de temperatura entre áreas urbanas e rurais, e tempestades causadas por grandes fenômenos convectivos/cúmulus-nimbus. Influências de mecanismos na mesoescala puderam ser detectadas pelas medições do Projeto VENTAR, como, por exemplo, diferenças entre os regimes diários de vento na Ilha do Mel e nos campos gerais do segundo planalto (COPEL, 1999).
- **Microescala:** escala local, da ordem de 1 metro a 1 quilômetro, onde ocorrem turbulências, convecção, efeitos de relevo, sombras aerodinâmicas de obstáculos tais como escarpas, edificações, vegetação e todos os efeitos associados a atrito na camada limite de superfície - que se estende até 50-600 m de altura - sobre terrenos com variados graus de rugosidade (água, areia, restingas, matas, florestas, campos, centros urbanos, etc) e que também é afetada pelo gradiente vertical de temperatura. Este é um problema complexo, para o qual a literatura existente apenas apresenta algumas poucas diretrizes gerais, para relevos planos ou elevações com características geométricas simples.

Segundo Schultz (2002):

O Estado do Paraná é constituído por uma área de 199.554 km<sup>2</sup>, com uma distribuição complexa de relevo e rugosidade, e onde interagem os efeitos nas diversas escalas atmosféricas. O regime de ventos sobre o Estado sofre fortes influências dos deslocamentos de frentes frias, as quais são intermitentes e cuja passagem produz variações de 360° em direção de vento, no sentido anti-horário da rosa-dos-ventos.

**FIGURA 4.3 – REGISTRO ANEMOGRÁFICO MENSAL**



FONTE: DEWI, 1993

#### **4.2.3. A velocidade do vento**

A velocidade do vento varia com a localização geográfica e a altitude, constatando-se alterações instantâneas, diárias, sazonais e anuais. Dentro de certos limites de comportamento atmosférico, considera-se que para altitudes menores que 100m, a variação da velocidade de vento com a altura do solo pode ser expressa pela fórmula empírica (LYSEN, 1982; GIPE, 1993).

$$v(h) = v_1 \left[ \frac{h}{h_1} \right]^\alpha \quad (4.1)$$

Onde:

$v_1$  – velocidade na altura  $h_1$  (conhecida),

$v(h)$  – velocidade na altura  $h$ ,

$h$  – altura para a qual se quer determinar a velocidade  $v(h)$ ,

$h_1$  – altura em que ocorre velocidade  $v_1$ , geralmente 10 m,

$\alpha$  - coeficiente dependente da natureza do terreno, como ilustrado na Tabela 4.1.

**TABELA 4.1 – RUGOSIDADE PARA CÁLCULO DA VELOCIDADE DO VENTO**

<b>Tipo de Terreno</b>	<b>Z<sub>0</sub> (m)</b>	<b>α</b>
<i>Gelo ou Lama plana</i>	10 <sup>-5</sup> a 3.10 <sup>-5</sup>	
<i>Mar Calmo</i>	2. 10 <sup>-4</sup> a 3.10 <sup>-4</sup>	
<i>Areia</i>	2.10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-3</sup>	0,10
<i>Neve</i>	10 <sup>-3</sup> a 6.10 <sup>-3</sup>	
<i>Gramma Baixa</i>	10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>-2</sup>	0,13
<i>Estepe</i>	10 <sup>-2</sup> a 4.10 <sup>-2</sup>	
<i>Gramma Alta</i>	4.10 <sup>-2</sup> a 4.10 <sup>-1</sup> .	0,19
<i>Floresta</i>	10 <sup>-1</sup> a 1	
<i>Subúrbio</i>	1 a 2	0,32
<i>Cidade</i>	1 a 4	

FONTE: SILVA, 2003.

Para terrenos satisfazendo os requisitos de uniformidade de aspereza a seguinte lei logarítmica, oriunda da fórmula de Prandtl, é válida com alto grau de aproximação,

$$\frac{v(z)}{v(h)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}$$

em condições adiabáticas (ROHATGI & NELSON, 1994; LYSEN, 1982; GIPE, 1993):

Onde: (4.2)

*h* - altura para a qual se deseja conhecer a velocidade,

*v(h)* – velocidade média do vento na altura *h*,

*v(z)* – velocidade de referência (conhecida),

*z* - altura de referência,

*z<sub>0</sub>* . “altura da rugosidade” obtida da tabela 4.1 em função do tipo de solo.

O potencial eólico de um local é estimado a partir de curvas de duração de velocidade do vento. Segundo os padrões da *World Meteorological Organization*, as medições devem ser efetuadas na altura de 10 m do solo e preferencialmente em

intervalos de 10 minutos. Esta última proposta é baseada na análise espectral da velocidade de vento para a qual as flutuações da velocidade de vento durante um mês ocorrem significativamente em freqüências correspondentes a períodos entre 10 h e 100 h e para períodos menores que 5 minutos, sendo que, esta segunda categoria denomina-se rajada. Não ocorrem significativas variações de vento para períodos entre 5 minutos e 10 horas, onde o comportamento da turbina eólica pode ser considerado quase-estático (USDOE, 1997).

As flutuações do vento constituem fenômeno estocástico que pode ser representado por métodos estatísticos. Em termos de análise estatística, o regime de vento em um determinado local é representado por funções de distribuição obtidas de medições efetuadas em um determinado período. Entre as funções mais utilizadas destacam-se a distribuição de velocidade média de vento e a distribuição de freqüência de ocorrência da velocidade de vento. Enquanto a primeira representa o valor da velocidade média de vento em intervalos de tempo determinados (meses, dias, horas, etc.), a segunda identifica o número de ocorrências (quantas horas por mês, por exemplo) de um determinado valor de velocidade de vento (PARK, 1981; WALLACE & HOBBS, 1977).

Os registros da densidade de probabilidade podem ser descritos por expressões analíticas. Têm sido sugeridas várias distribuições probabilísticas para descrever o regime de ventos, mas a distribuição de Weibull é normalmente considerada como a mais adequada a qual é expressa por sua função densidade de probabilidade (Figuras 4.4 e 4.5) (SEDEFIAN, 1980; LYSSEN, 1982; GIPE, 1993).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left\{ - \left[ \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \right\} \quad (4.3)$$

Onde:

$f(v)$  = função densidade de probabilidade,

$k$  = fator de forma,

$c$  = velocidade característica,

$v$  = velocidade do vento,

$k$  e  $c$  são parâmetros dependentes do local,

A velocidade média anual do vento  $u_{ma}$  calcula-se através de:

$$u_{ma} = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (4.4)$$

Onde

$u_{ma}$  – velocidade média anual,  
 $f(v)$  = função densidade de probabilidade,  
 $v$  = velocidade do vento.

Na prática têm-se distribuições discretas da velocidade média do vento em classes de 1 m/s, pelo que a velocidade média anual se calcula, de forma aproximada, por:

$$u_{ma} = \sum_{v=0}^{v_{max}} v f(v) \quad (4.5)$$

Onde

$u_{ma}$  – velocidade média anual,  
 $v$  = velocidade do vento,  
 $f(v)$  = função densidade de probabilidade.

A função Gamma –  $\Gamma$  relaciona os parâmetros  $c$  e  $k$  da distribuição de Weibull com as características da velocidade do vento – média anual e variância, através das relações seguintes (SEDEFIAN, 1980; SMEDMAN-HÖGSTRÖM, et al., 1978; LES GOURIERES, 1982; GIPE, 1993):

$$u_{ma} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4.6)$$

$$\sigma^2 = c^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left( \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right)^2 \right] \quad (4.7)$$

Onde:

$u_{ma}$  = velocidade média anual,

$c$  = velocidade característica,

$k$  = fator de forma ,

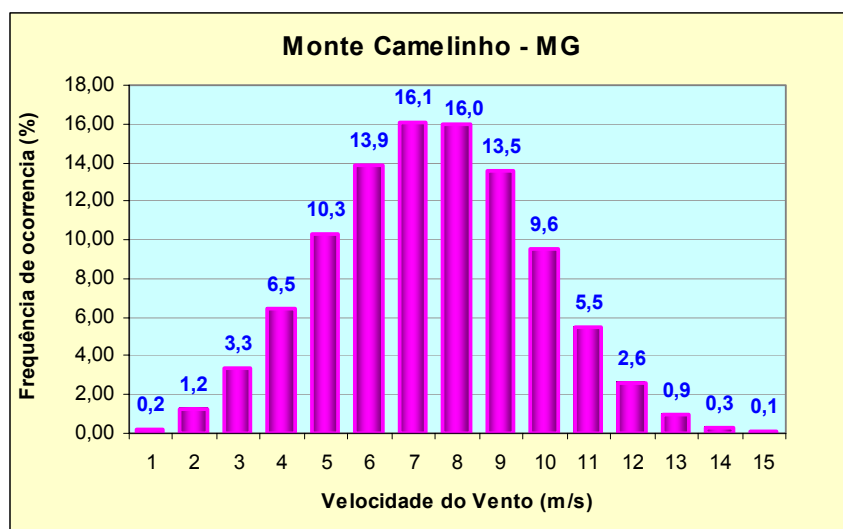
$\sigma^2$  – variância,

$\Gamma$  – função Gamma definida como:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$$

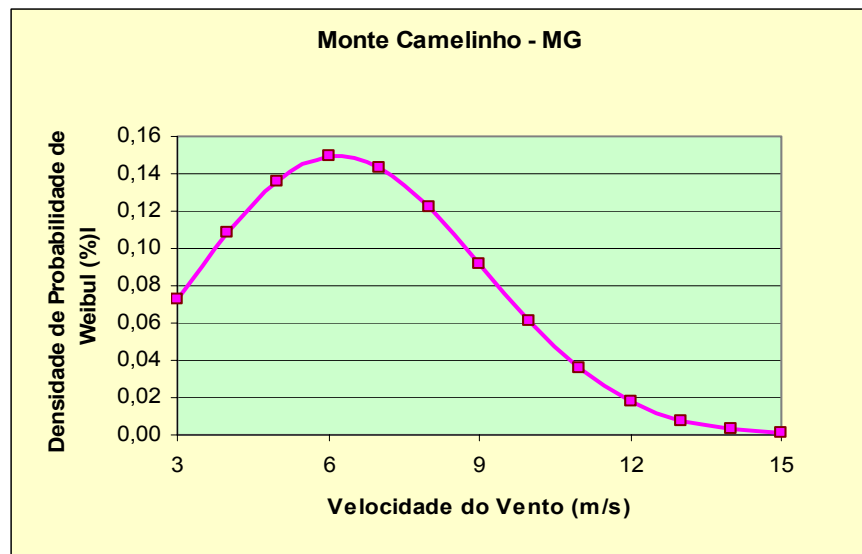
É possível também se utilizar distribuição mais simples, conhecida como distribuição de Rayleigh, que é um caso especial da distribuição de Weibull para fator de forma igual a 2 (PARK, 1981; GIPE, 1993; CASTRO, 1998).

**FIGURA 4.4 – FREQUÊNCIA DA OCORRÊNCIA DE UMA DETERMINADA VELOCIDADE DE VENTO EM MONTE CAMELINHO -1996**



FONTE:CEMIG, 1998

**FIGURA 4.5 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA WEIBULL (k=2,75 E c=6,4)**



FONTE:CEMIG, 1998.

Para a definição dos limites de operação de uma turbina eólica e para a análise da viabilidade econômica do aproveitamento energético é também necessário ter-se informação referente à probabilidade ou frequência de ocorrência das diferentes velocidades do vento.

Analisando uma curva típica de distribuição probabilística Weibull, por exemplo, constata-se que:

- A função densidade de probabilidade apresenta assimetria positiva, isto é, baixas velocidades do vento apresentam maior probabilidade de ocorrência que velocidades elevadas.
- As baixas velocidades, apesar da sua elevada probabilidade de ocorrência, têm um potencial energético tão baixo que pouco contribuem para a energia produzida anualmente.
- As altas velocidades do vento, apesar de possuírem um elevado conteúdo energético, apresentam baixas probabilidades de ocorrência.

Desta forma, é economicamente pouco significativo o aproveitamento das velocidades do vento muito baixas ou muito altas (CASTRO, 1998).



### **4.3. SISTEMA EÓLICO**

Um sistema eólico é constituído por vários componentes que devem trabalhar em harmonia de forma a propiciar um maior rendimento final. Para efeito de estudo global da conversão eólica devem ser considerados os seguintes componentes (CRESEB/CEPEL, 2004).

- Vento: Disponibilidade energética do local destinado à instalação do sistema eólico.
- Rotor: Responsável por transformar a energia cinética do vento em trabalho mecânico de rotação.
- Transmissão e Caixa Multiplicadora: Responsável por transmitir a potência mecânica entregue pelo eixo do rotor até a carga. Alguns geradores não utilizam este componente; neste caso, o eixo do rotor é acoplado diretamente à carga.
- Gerador Elétrico: Responsável pela conversão do trabalho mecânico em energia elétrica.
- Mecanismo de Controle: Responsável pela orientação do rotor, controle de velocidade, controle da carga etc.
- Torre: Responsável por sustentar e posicionar o rotor na altura conveniente.
- Sistema de Armazenamento: Responsável por armazenar a energia para produção de energia firme a partir de uma fonte intermitente.
- Transformador: Responsável pelo acoplamento elétrico entre o aerogerador e a rede elétrica.
- Acessórios: São os componentes periféricos.

A Figura 4.6 apresenta as diversas partes constituintes de um sistema eólico.

#### **4.3.1. Turbinas (rotores) eólicos**

##### **4.3.1.1. Componentes principais**

Uma turbina eólica com eixo horizontal é apresentada esquematicamente na figura 4.6. Nesta figura são mostrados apenas os componentes mais importantes e as dimensões não são exatamente proporcionais às reais. Deve-se observar também que nem todos os tipos de turbinas eólicas possuem todos estes componentes. São

possíveis modificações do modelo apresentado, assim como da localização de cada componente (PARK, 1981; LE GOURIERES, 1982; ASME, 1994).

#### 4.3.1.2. Classificação das turbinas eólicas

A divisão das turbinas eólicas por tamanho é usual, porém diferenciada. Normalmente as turbinas eólicas são divididas por potência instalada (potência nominal) em pequenas, médias e grandes conforme a Tabela 4.2 (ASME, 1994).

**TABELA 4.2 – CLASSIFICAÇÃO E USO DAS TURBINAS EÓLICAS**

<i>Porte</i>	<i>Potência</i>	<i>Utilização</i>
<i>Pequeno</i>	Até 80kW	Consumo local com fornecimento do eventual excedente de energia para a rede.
<i>Médio</i>	De 80kW a 500kW	Consumo local com fornecimento do excedente de energia para a rede ou só fornecimento para a rede.
<i>Grande</i>	Maior que 500kW	Fornecimento de energia para a rede.

FONTE: ASME, 1994.

Uma outra divisão por tamanho é apresentada por Molly (1990), na qual a seleção é feita pelo diâmetro do rotor **D** ou pela sua área **A** (MOLLY apud DEWI, 1993).

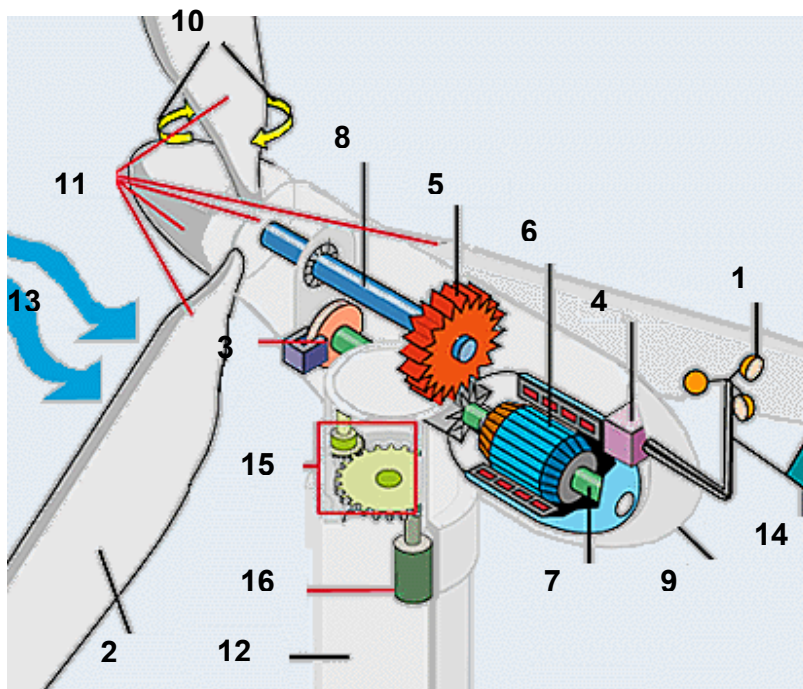
**TABELA 4.3 – CLASSIFICAÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS PELO DIÂMETRO E ÁREA**

<i>Porte</i>	<i>Diâmetro do rotor(m)</i>	<i>Área varrida pelo rotor (m<sup>2</sup>)</i>
<i>Pequeno</i>	Até 16	Até 200
<i>Médio</i>	De 16 a 45	De 200 a 1600
<i>Grande</i>	Maior que 45	Maior que 1600

FONTE: MOLLY, 1990 apud DEWI, 1993.

A classificação das turbinas eólicas segundo o tamanho não está relacionada com aspectos econômicos. A decisão da implantação economicamente viável de turbinas eólicas depende também do local e da finalidade, ou seja, consumo próprio ou fornecimento para a rede.

**FIGURA 4.6 – COMPONENTES DE UM SISTEMA EÓLICO**



1 – Anemômetro	5 – Caixa multiplicadora	9 - Nacele	13 – Direção do vento
2 – Pá	6 – Gerador	10 - Pitch	14 – Medidor de direção do vento
3 – Disco de Freio	7 – Eixo de alta velocidade	11 - Rotor	15 – Engrenagem de Posicionamento
4 – Controlador de velocidade	8 – Eixo de baixa velocidade	12 - Torre	16 – Motor da engrenagem

FONTE: CRESEB/CEPEL, 2004.

#### 4.3.1.3. Tipos de turbinas eólicas modernas

##### A. Turbinas eólicas de eixo horizontal

As turbinas eólicas de eixo horizontal (Figura 4.7) apresentam quase que exclusivamente rotores com uma, duas ou três pás. Os motivos pelos quais se emprega um número pequeno de pás são (PARK, 1981; DEWI, 1993; GIPE, 1993; USDOE, 1996):

- Maior velocidade de rotação torna a geração de energia elétrica mais barata, com a diminuição dos custos do gerador e caixa de multiplicação.
- Diminuição dos custos materiais pelo emprego de um número menor de pás.
- Adoção de flanges articuladas nos rotores de uma ou duas pás, que possibilita a redução dos esforços mecânicos.

A seguir são descritos os diferentes tipos de turbina segundo o número de pás (PARK, 1981; DEWI, 1993; GIPE, 1993; USDOE, 1996).

**Rotor de Três Pás** - Atualmente, o rotor de três pás é o mais empregado em turbinas eólicas. É o tipo de rotor com menor número de pás onde se consegue controlar mais facilmente os problemas advindos dos esforços dinâmicos, ou seja, representa maior segurança quanto aos problemas dinâmicos. As pás são normalmente conectadas a um cubo rígido, que é de simples fabricação, requer pouca manutenção e não sofre desgastes. Contudo, todas as forças atuantes nas pás são transmitidas ao cubo, gerando esforços relativamente grandes nos flanges das pás e em seus componentes subseqüentes. As turbinas eólicas de três pás possuem velocidade de rotação inferior àquelas de duas ou uma pá. Para se obter uma velocidade de rotação maior, as pás deveriam ser mais esbeltas, o que causaria problemas estruturais e até problemas de emissão de ruídos.

**Rotor de Duas Pás** – O rotor de duas pás pode girar a uma velocidade de rotação maior, o que ocasiona gastos menores com a caixa de multiplicação e com o gerador, bem como menores *nacele* e peso do rotor. Entretanto, os problemas aerodinâmicos a serem resolvidos nos rotores de duas pás são bem maiores. Devido ao desbalanceamento de massa do rotor em relação à torre durante uma rotação, ocorrem enormes esforços adicionais de torção e flexão, os quais devem ser cuidadosamente considerados durante a fase de projetos. A utilização de cubos balanceados reduz os problemas mencionados.

**Rotor de Uma Pá** - O rotor de uma pá destaca-se em relação aos demais pela capacidade de alcançar velocidades de rotação bem superiores. Isto faz com que os gastos com caixa de multiplicação e gerador sejam reduzidos. A massa no topo da torre e da turbina eólica são inferiores as das turbinas com um número maior de pás. A desvantagem é que além de um desbalanceamento maior, ocorrem esforços dinâmicos que devem ser limitados através da escolha do tipo de conexão *nacele-torre* e do tipo de cubo a ser empregado.

**Rotores de Quatro ou Mais Pás** – Turbinas eólicas com quatro ou mais pás não têm praticamente nenhuma relevância para a geração de energia elétrica, devido à baixa velocidade de rotação intrínseca. Esse tipo de turbina eólica é empregado quase que exclusivamente para o bombeamento d'água.

**FIGURA 4.7 – ROTORES DE TRÊS PÁS**



FONTE: USDOE, 2004.

Considerando-se que o vento sopra de diferentes direções, a posição do rotor e o direcionamento conforme o sentido do vento são de grande importância nas turbinas eólicas de eixo horizontal.

As turbinas eólicas são diferenciadas com relação à direção do vento se o rotor está posicionado na frente ou atrás da torre (PARK, 1981; DEWI, 1993; GIPE, 1993; USDOE, 1996):

- Rotor a barlavento: está a montante da torre, ou seja, o rotor se posiciona com relação à direção de onde vem o vento sempre na frente da torre.
- Rotor a sotavento: está à jusante ou atrás da torre.

A maioria das turbinas eólicas de eixo horizontal apresenta rotores a barlavento. Além da posição do rotor, é também necessário que o seu eixo se mantenha sempre alinhado com a direção do vento, de modo a captar o máximo possível da energia eólica. O alinhamento pode ser obtido através de:

- Autodirecionamento que ocorre pelo posicionamento do centro aerodinâmico da *nacele*, que é excêntrico ao eixo da torre. Por motivos mecânicos esse tipo de direcionamento funciona somente quando o rotor está girando.
- Direcionamento com o auxílio de leme aéreo que por razões mecânicas, somente pode ser utilizado em rotores com pequenos diâmetros.

- Acionamento forçado que é atualmente a forma mais utilizada de direcionamento e pode ser feito das seguintes maneiras:
- Com um pequeno rotor lateral de eixo horizontal perpendicular ao eixo do rotor principal, que através de uma caixa de redução move a *nacelle* até que o eixo do rotor principal esteja posicionado paralelamente ao sentido do vento. Estes rotores laterais foram muito empregados nos velhos moinhos de vento holandeses.
- Com acionamento elétrico ou hidráulico em que o eixo do rotor é posicionado em paralelo à direção do vento através de um sistema de acionamento auxiliar (p. ex. motor elétrico). Este sistema é o mais empregado atualmente.

## B. Turbinas eólicas de eixo vertical

As turbinas de eixo vertical (Figura 4.8), que atualmente desempenham um papel secundário, seguem duas linhas principais. O rotor *Savonius*, que não será detalhado neste trabalho, é do tipo de arrasto, tem baixa eficiência e só é empregado quando se requer a entrada em operação com baixas velocidades do vento e potências reduzidas. O rotor *Darrieus* emprega principalmente a força de sustentação no perfil das pás, do mesmo modo que as turbinas eólicas de eixo horizontal (PARK, 1981; DEWI, 1993; GIPE, 1993; USDOE, 1996).

- **Rotor Darrieus** – Tem como vantagem não requerer nenhum tipo de direcionamento, pois está sempre voltado ao vento. O gerador e os controles encontram-se ao nível do solo e são, portanto de fácil acesso e manutenção. Suas pás são de simples construção e têm forma de catenária. Como o rotor fica situado próximo ao solo, a geração de energia é sensivelmente inferior se comparada com a de um gerador de eixo horizontal. O controle deste tipo de turbina eólica é difícil e, em geral, não entram em operação sozinhas, necessitando um motor de partida.
- **Rotor H-Darrieus** – Apresenta as pás em posição semelhante à letra H e tem como vantagem uma construção das pás ainda mais simples. Suas pás encontram-se a uma altura comparável à das turbinas eólicas de eixo horizontal, por conseguinte a geração de energia também é da mesma

ordem. Além disso, o controle da potência (ver a seguir) pode ser semelhante aos das turbinas eólicas de eixo horizontal.

**FIGURA 4.8 – ROTOR DARRIEUS**



FONTE: USDOE, 2004.

#### **4.3.1.4 Controle de potência e de rotação das turbinas eólicas**

As turbinas eólicas são projetadas de maneira que atinjam a potência nominal com velocidades do vento que ocorram freqüentemente. Devem ser previstos dispositivos de limitação da rotação e da potência para se evitar esforços excessivos nos componentes mecânicos e/ou elétricos de uma turbina eólica quando ocorrem velocidades do vento superiores à velocidade de vento nominal (para a qual a turbina eólica fornece a potência nominal). Para isto existem dois tipos básicos de controle, ambos baseados em princípios aerodinâmicos (PARK, 1981; DEWI, 1993; GIPE, 1993; USDOE, 1996).

##### **A. Pelo estol**

O estol, descolamento passivo do escoamento do ar ao longo das pás do rotor, causa o aumento das forças de arrasto e a diminuição das de sustentação. Na faixa de operação próxima da velocidade nominal, o escoamento atinge o perfil aerodinâmico das pás em condições ótimas. Para que isso ocorra, as pás são fixadas ao cubo com

um ângulo específico para cada turbina. Com rotação constante ou praticamente constante e com o aumento da velocidade do vento, o ângulo de ataque (ângulo entre a corda do perfil e a direção do vento) vai crescendo até que o escoamento se descole da face superior das pás, fenômeno chamado de estol, semelhante ao que ocorre nas asas dos aviões.

O estol faz com que a força de sustentação diminua e aumente o arrasto. Para rotação constante a pá pode ser montada de maneira que, quando a velocidade do vento ultrapasse a velocidade nominal, a potência gerada se mantenha praticamente constante. Normalmente as curvas de potência (potência x velocidade do vento) de turbinas com estol demonstram que, para velocidade do vento ligeiramente superior à velocidade nominal, há uma queda da potência, mas, se a velocidade continuar a crescer, a potência volta a ter uma pequena elevação. As turbinas das classes pequena e média geralmente são reguladas por estol (têm pás fixas). Este tipo de regulagem para grandes turbinas é tido como arriscado devido à dimensão dos esforços e à estabilidade dinâmica. O campo de utilização deste tipo de regulagem é o das turbinas eólicas para fornecimento exclusivo de energia para a rede.

#### **B. Pelo ajuste ativo do ângulo de passo da pá (pitch)**

Regula a força de sustentação nas pás por meio da alteração de seu ângulo de ataque. Neste tipo de regulagem de potência, o ângulo de ataque nas pás pode ser ajustado continuamente, de maneira a otimizar a captação de energia pelo rotor.

A regulagem *pitch* possibilita uma entrada em operação suave e não requer partida com fonte externa. Na faixa de velocidade superior à nominal e inferior à de início de operação, o ajuste do ângulo de passo regula a captação de energia para o fornecimento da potência nominal.

O ajuste do ângulo de passo da pá requer peças móveis adicionais no cubo do rotor e, portanto, maiores custos mecânicos do que as turbinas de pás fixas. O ajuste do ângulo de passo pode ser utilizado em turbinas de qualquer tamanho e é indicado sempre que se necessita controlar a potência da turbina.



### 4.3.2. Torre

As torres das turbinas eólicas podem ser de três tipos: treliçadas, tubulares estaiadas e tubulares livres. Os materiais empregados são o concreto e o aço. Para turbinas eólicas pequenas e médias, as torres são na sua grande maioria de aço, as grandes já utilizam normalmente as de concreto. A tendência dos últimos anos vem sendo a utilização das torres tubulares livres, apesar de terem paredes grossas para suportar todos os esforços possíveis e por isto serem muito pesadas. O argumento favorável a esta torre pode ser a sua estética, uma vez que recebendo uma pintura com cores adequadas, a aceitação pela população das torres tubulares livres é bem melhor do que a das treliçadas ou tubulares estaiadas (PARK, 1981; DEWI, 1993; GIPE, 1993; USDOE, 1996).

### 4.3.3. Aerodinâmica

A razão entre a velocidade de rotação  $\omega$  (m/s) da extremidade da pá de uma turbina de raio  $r$  (m) e a velocidade do vento,  $u$  (m/s), resulta num parâmetro adimensional designado por velocidade específica ou razão de velocidades na ponta da pá  $\lambda$  (*TSR – Tip Speed Ratio*) (SHARP, 1990):

$$\lambda = \frac{\omega r}{v} \quad (4.8)$$

Onde:

$\lambda$  – velocidade na ponta da pá ou velocidade específica,

$\omega$  – velocidade de rotação (m/s),

$v$  - velocidade do vento (m/s).

Se a velocidade angular do rotor for pequena, a perturbação induzida no escoamento pelo movimento do rotor é pequena, ao contrário, se a velocidade for alta, o rotor funcionará como uma parede contra o vento. Portanto, a velocidade de rotação deverá ser compatibilizada com a velocidade do vento de forma a obter a máxima eficiência de conversão, isto é, um coeficiente de potência  $C_p$  máximo.

O estudo teórico do comportamento dos aerogeradores definiu expressões analíticas que descrevem o comportamento das grandezas relevantes. Para a variação

de  $C_p$  com  $\lambda$ , uma das expressões mais citadas na literatura é (SOLOOTWEG, apud CASTRO 1998):

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} - 0,035} \quad (4.9)$$

$$C_p = 0,22\left(\frac{116}{\lambda_i} - 5\right)\exp\left(-\frac{12,5}{\lambda_i}\right) \quad (4.10)$$

Onde:

- $\lambda$  – velocidade na ponta da pá,
- $\lambda_i$  – função de  $\lambda$  (equação 4.9),
- $C_p$  – coeficiente de potência.

Constata-se também que o valor de  $\lambda$  ( $\lambda_0$ ), para o qual se verifica a máxima eficiência na conversão de energia está relacionado com o número de pás da turbina,  $n$ , através da seguinte expressão (SOLOOTWEG, apud CASTRO 1998):

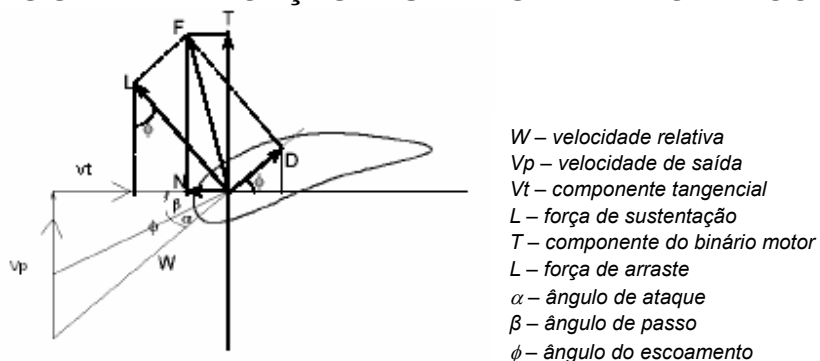
$$\lambda_0 = \frac{4\pi}{n} \quad (4.11)$$

Onde:

- $\lambda_0$  – velocidade na ponta da pá para máxima eficiência na conversão,
- $n$  – número de pás da turbina.

Assim, a elevada velocidade específica requer um pequeno número de pás; no caso de uma turbina de duas pás, o coeficiente de potência máxima ocorre para um valor de  $\lambda$  próximo de seis.

**FIGURA 4.9 – SISTEMA DE FORÇAS ATUANTES NA PÁ DO AEROGERADOR**



FONTE: CASTRO, 1998

A geometria das pás, cuja seção reta tem a forma de um perfil de asa, determina a quantidade de energia que é extraída para cada velocidade do vento.

As grandezas intervenientes são as seguintes (ASME, 1994; SILVA, 2004):

- O vetor velocidade relativa do vento,  $\mathbf{w}$ , que atua no elemento da pá e que resulta de duas componentes: a velocidade do vento,  $\mathbf{v}_p$ , e a velocidade tangencial da pá,  $\mathbf{v}_t$ .
- O ângulo de ataque,  $\alpha$  definido como sendo o ângulo entre a linha que une os bordos de entrada e de saída do perfil alar (linha de corda) e o escoamento relativo; o ângulo de passo,  $\beta$ , que é o ângulo entre o plano de rotação da pá e a superfície por esta varrida.
- O vetor força,  $\mathbf{F}$ , que pode ser decomposto em duas componentes: uma, que atua na mesma direção da velocidade relativa designada por resistência,  $\mathbf{D}$ , outra que é perpendicular designada por sustentação,  $\mathbf{L}$ .

O vetor força  $\mathbf{F}$  pode ser decomposto na direção do plano de rotação da turbina e na direção perpendicular, obtendo-se a componente que contribui para o movimento da pá,  $\mathbf{N}$ , e a componente que contribui para o binário motor,  $\mathbf{T}$ .

Para que o desempenho da pá possa ser descrito, independentemente do seu tamanho e da velocidade com que está animada, é usual dividir a força de sustentação  $\mathbf{L}$  e a força de arraste,  $\mathbf{D}$ , pela força experimentada pela secção reta,  $\mathbf{a}$ , de uma pá, animada da velocidade do vento,  $\mathbf{v}$ . Os coeficientes de sustentação,  $\mathbf{C}_L$ , e de arraste,  $\mathbf{C}_D$ , do rotor são dados por:

$$C_L = \frac{L}{1/2 \rho v^2 a} \quad (4.12)$$

$$C_D = \frac{D}{1/2 \rho v^2 a} \quad (4.13)$$

Onde:

$C_L$  – coeficiente de sustentação

$L$  – força de sustentação

$C_D$  – Coeficiente de arraste

$D$  – força de arraste

$\rho$  – massa específica do ar

$v$  – velocidade do vento

$a$  – seção reta da pá

O coeficiente de sustentação, para os perfis normalmente utilizados em turbinas eólicas, apresenta um valor máximo para um ângulo de ataque em torno de  $10^\circ$  a  $15^\circ$ , verificando-se, a partir deste valor, um decréscimo.

O coeficiente de arraste mantém-se aproximadamente constante até se atingir um ângulo de ataque para o qual o coeficiente de sustentação atinge o seu máximo; para valores de  $\alpha$  superiores, o coeficiente de arrastamento apresenta um crescimento acentuado. Este coeficiente depende fortemente da rugosidade da pá e de efeitos de fricção.

Para que se extraia do vento a máxima potência possível, a pá deve ser dimensionada de forma a apresentar um ângulo de ataque tal que a relação entre a sustentação e arraste seja máxima.

#### **4.3.4. Geradores eólicos**

A conversão da energia mecânica disponível no veio da turbina em energia elétrica é feita mediante o uso de um gerador síncrono (alternador) ou o assíncrono (de indução).

Se a apropriação da energia eólica for conduzida de forma que a exploração se faça mediante velocidade praticamente constante, o gerador de indução é a opção mais usada pelos fabricantes, tirando partido da sua grande simplicidade e robustez, e, conseqüentemente, do seu baixo preço.

A existência de um escorregamento entre a velocidade de rotação e a velocidade de sincronismo permite acomodar parte da turbulência associada ao vento tornando a operação deste tipo de máquinas mais suave. Ao contrário, o funcionamento síncrono do alternador não deixa margem para acolher as flutuações da velocidade do vento, tornando a operação dos geradores síncronos demasiado rígida.

Como principal desvantagem do gerador de indução vale ressaltar o fato deste trocar com a rede a energia reativa de excitação e, portanto, necessitar de equipamento adicional para corrigir o fator de potência.

#### 4.3.4.1. Sistemas de conversão de energia (CASTRO, 1998):

- Sistemas de conversão de energia eólica, equipados com geradores de indução diretamente ligados a uma rede de frequência constante e funcionando à velocidade praticamente constante, constituem o conceito chamado “CSCF – *Constant Speed Constant Frequency*” e representam a maioria das aplicações atualmente em operação.
- Nos últimos anos, o conceito CSCF vem sendo gradativamente abandonado e substituído pelo conceito chamado “VSCF – *Variable Speed Constant Frequency*” com o objetivo de maximização do aproveitamento da energia eólica.
- Na tentativa de aumentar o espectro de velocidades de rotação possíveis, os fabricantes dinamarqueses oferecem atualmente como equipamento *standard* sistemas conversores equipados com gerador de indução de rotor bobinado e escorregamento variável. Nesta montagem, designada na literatura por “DFIG – *Double Fed Induction Generator*” ou “DOIG – *Double Output Induction Generator*” o estator é diretamente ligado à rede e o rotor também é ligado à rede através de um sistema conversor *AC/DC/AC*<sup>2</sup> que, controlando o escorregamento, possibilita o envio de potência adicional para a rede.

A alternativa para sistemas de velocidade variável consiste num gerador síncrono ligado assincronamente à rede elétrica através de um sistema conversor *AC/DC/AC*. A utilização de um tipo especial de gerador síncrono, com um número elevado de pares de pólos, permite ao gerador acompanhar a velocidade de rotação da turbina, tornando a caixa de velocidades dispensável.

A ligação assíncrona isola a frequência do rotor da frequência da rede, oferecendo a possibilidade de o sistema funcionar de forma consistente em pontos de operação próximos do valor ótimo de  $\lambda$ . Por outro lado, a utilização de modernos conversores eletrônicos de potência funcionando com *IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)* permite controlar simultaneamente os trânsitos de energia ativa e reativa.

---

<sup>2</sup> *AC/DC/AC – Aternate Current/ Direct Current/ Alternate Current*

Os benefícios dos sistemas *VSCF* incluem:

- Aumento da produção de energia;
- Redução das fadigas nos componentes mecânicos;
- Redução do ruído a baixas velocidades do vento;
- Ligação suave à rede de frequência Constante;
- Eventual ausência de caixa de velocidades.

A possibilidade oferecida por alguns destes sistemas de dispensarem a caixa de velocidades é uma vantagem importante, pois diminuem as perdas e o ruído associado com baixas velocidades do vento e aumenta, em princípio, a confiabilidade do sistema.

Com a instalação destes equipamentos no terreno, torna-se necessário avaliar corretamente os seus potenciais efeitos negativos. Aspectos relacionados com a eficiência dos conversores eletrônicos, com a produção de harmônicas, com o comportamento do sistema elétrico em condições extremas de vento, com a compatibilidade eletromagnética, assumem, neste quadro, importância significativa (CASTRO, 1998).

#### **4.3.5. A potência eólica**

O termo “energia eólica” descreve o processo pelo qual o vento é usado para gerar energia mecânica ou eletricidade. Uma turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor e a transforma em energia elétrica. A fórmula apresentada a seguir calcula a potência gerada pelas turbinas eólicas (PARK, 1981; FRERIS, 1990; ROHATGI & NELSON, 1994).

$$P = \frac{W}{\Delta t} \quad (4.14)$$

Onde:

P – Potência,

W – trabalho,

$\Delta t$  – intervalo de tempo,

A potência **P** é igual ao trabalho **W** dividido pelo tempo; mas o trabalho realizado pelo vento, que neste caso é igual a sua energia cinética **Ec**, é (FRERIS, 1990; ASME, 1994):

$$W = E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (4.15)$$

Onde:

W – trabalho,

$E_c$  – energia cinética,

m – massa,

v – velocidade do vento.

Então:

$$P = \frac{\frac{mv^2}{2}}{\Delta t} = \frac{mv^2}{2\Delta t}, \quad (4.16)$$

Mas como:

$$\frac{m}{\Delta t} = \dot{m} = \rho \cdot v \cdot A, \quad (4.17)$$

Onde:

P – Potência,

m – massa,

v - velocidade do vento,

$\Delta t$  – Intervalo de tempo,

$\dot{m}$  – vazão mássica,

$\rho$ - massa específica do ar,

A – área varrida pelo rotor.

Temos:

$$P = \frac{\rho v^3 A}{2}, \quad (4.18)$$

Onde:

P – Potência,

m – massa,

v - velocidade do vento.

A – área varrida pelo rotor.

Vale ressaltar que esta regra é teórica e na prática, não se consegue converter toda essa potência (teórica) em potência útil. A taxa de conversão ( $\eta$  – rendimento) varia de 20 a 59%, quando o sistema funciona de maneira otimizada.

A potência captada por qualquer sistema de conversão de energia eólica é expressa pelo produto da potência disponível pelo rendimento de captação. Este rendimento é geralmente expresso sob a forma de um coeficiente de potência adimensional,  $C_p$ .

Existe um limite teórico referente à quantidade de energia que é possível extrair de um dado escoamento permanente. Este limite correspondente ao valor máximo de  $C_p$  de 16/27, ou seja, 59%, e resulta de duas reduções distintas: uma de 2/3 do fluxo através da turbina, associada ao alargamento do tubo de corrente, e outra de 8/9 referente a uma incompleta absorção de energia, ou seja, a uma velocidade na esteira da turbina diferente de zero. Desta forma, a principal limitação ao aproveitamento da energia do vento resulta da redução do fluxo de massa. Para manter o valor de  $C_p$  no máximo, é necessário que a velocidade do rotor acompanhe as variações da velocidade do vento, o que não é conseguido para sistemas eólicos em que o gerador está diretamente ligado à rede de frequência constante, que impõe velocidade constante; em conseqüência, estes sistemas, que constituem a maior parte dos sistemas de conversão de energia eólica em funcionamento, operam muitas vezes em regimes não otimizados (USDOE, 1996).

Da equação 4.18 pode-se constatar que se em determinada localidade a velocidade do vento aumenta em 10% a potência se eleva em 33%, o que demonstra como é importante a escolha de um lugar com vento mais veloz para o melhor aproveitamento da energia eólica. Com relação área varrida pelo rotor, se o diâmetro da hélice for dobrado e o vento permanecer constante a potência aumentará quatro vezes. Isto ocorre porque a área varia com o quadrado do raio, ou seja, dobrando-se a área do rotor aumenta-se a potência em quatro vezes.

A absorção de energia cinética reduz a velocidade do vento à jusante do disco do rotor que gradualmente recupera-se ao misturar-se com as massas de ar predominantes do escoamento livre. Das forças de sustentação aerodinâmica nas pás do rotor resulta uma esteira helicoidal de vórtices, a qual também gradualmente dissipa-se. Após alguma distância à jusante da turbina, o escoamento praticamente recupera as condições de velocidade originais e turbinas adicionais podem ser



instaladas, minimizando as perdas de desempenho causadas pela interferência da turbina anterior (GOSWAMI, 1986; ASME, 1994).

Na prática, essa distância varia com a velocidade do vento, as condições de operação da turbina, a rugosidade de terreno e a condição de estabilidade térmica vertical da atmosfera. De modo geral, uma distância considerada segura para a instalação de novas turbinas é da ordem de 10 vezes o diâmetro  $d$ , se instalada a jusante, e 5 vezes  $d$ , se instalada ao lado, em relação ao vento predominante (ROSAS e ESTANQUEIRO, 2002).

A velocidade angular do rotor é inversamente proporcional ao diâmetro  $d$ . Usualmente, a rotação é otimizada no projeto, para minimizar a emissão de ruído aerodinâmico pelas pás. Uma fórmula prática para a avaliação da rotação nominal de operação de uma turbina eólica é:

$$rpm = \frac{1150}{d} \quad (4.19)$$

Onde:

rpm – rotação nominal da turbina,

d – diâmetro da turbina.

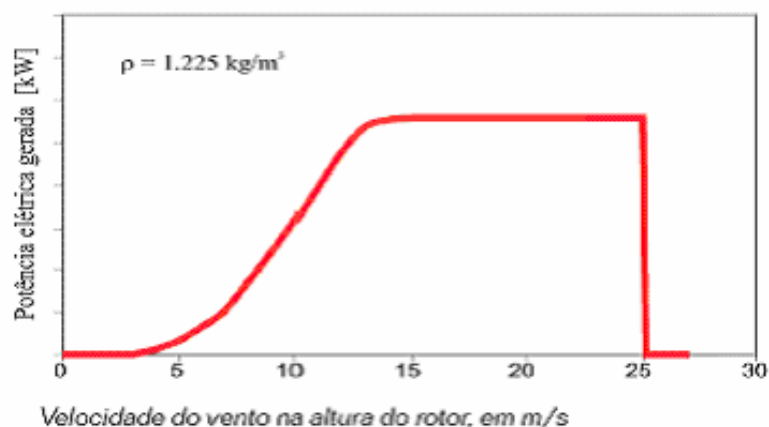
À medida que a tecnologia propicia dimensões maiores para as turbinas, a rotação reduz-se: os diâmetros de rotores no mercado atual variam entre 40 m e 80 m, o que resulta em rotações da ordem de 30 rpm a 15 rpm, respectivamente. As baixas rotações atuais tornam as pás visíveis e evitáveis por pássaros em vôo. Quanto aos níveis de ruído, turbinas eólicas satisfazem os requisitos ambientais mesmo quando instaladas a distâncias da ordem de 300m de áreas residenciais. Esses aspectos contribuem para que a tecnologia eólio-elétrica apresente o mínimo impacto ambiental, entre as fontes de geração na ordem de gigawatts. A figura 4.10 mostra uma curva típica de potência de turbinas eólicas.

Usualmente, a geração elétrica inicia-se com velocidades de vento da ordem de 2,5 - 3,0 m/s; abaixo desses valores, o conteúdo energético do vento não justifica o aproveitamento. Velocidades superiores a aproximadamente de 12,0 m/s a 15,0 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 turbina. Em ventos muito fortes ( $v > 25\text{m/s}$  no exemplo), atua o sistema automático de proteção. Ventos muito fortes têm ocorrência rara e não são importantes em termos de aproveitamento além da turbulência associada ser indesejável para a estrutura da máquina; nesse caso, a rotação das pás é reduzida (passo ou estol) e o sistema elétrico do gerador é desconectado da rede elétrica.

Turbinas eólicas de grande porte têm controle inteiramente automático, por meio de atuadores rápidos, software e microprocessadores alimentados por sensores duplos em todos os parâmetros relevantes. Usualmente, utiliza-se telemetria de dados para monitoramento de operação e auxílio a diagnósticos e manutenção. As curvas de potência fornecidas por fabricantes de turbinas, geralmente medidas por órgãos credenciados e independentes, usualmente referem-se a velocidades de vento quase instantâneas (médias de 10 minutos) e massa específica do ar  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  ( $15^\circ \text{C}$  ao nível do mar) (DWIA, 2003). No caso das temperaturas de grande parte do território brasileiro, correções para a massa específica do ar local são necessárias.

**FIGURA 4.10 – CURVA TÍPICA DE POTÊNCIA DE TURBINAS EÓLICAS**



FONTE: DWIA, 2003.

#### **4.3.6. Usinas eólicas**

Uma usina eólica é um conjunto de turbinas eólicas dispostas adequadamente em uma mesma área. Essa proximidade geográfica tem a vantagem econômica da diluição de custos: arrendamento de área, fundações, aluguel de guindastes e montagem, equipes de operação, manutenção e estoques de reposição. O “grau de

compactação” de um parque eólico depende de fatores aerodinâmicos e estruturais associados à interferência entre turbinas, devido fundamentalmente, ao fato de muitas turbinas passarem a operar na esteira das restantes. Desse funcionamento resultam uma diminuição do rendimento aerodinâmico de captação e, principalmente, um aumento acentuado dos esforços de fadiga a que as turbinas e respectivos componentes estão sujeitos (CASTRO, 1998).

Usinas eólicas com turbinas de projeto consolidado e equipes de manutenção adequadamente capacitadas apresentam fatores de disponibilidade típicos da ordem de 0,98.

#### **4.3.7. Fazendas eólicas “offshore”**

Uma nova opção que tem sido empregada recentemente é a instalação de aerogeradores no mar (*offshore*) uma vez que a velocidade do vento e a área de exploração disponível são maiores. A instalação é apenas limitada por razões de ordem prática tais como a profundidade (até 30 metros é suportável) e a atividades marítimas (pesca, rotas marítimas).

A Europa tem um grande potencial de produção de energia eólica “*offshore*” (Figura 4.11) a ser explorado, sendo que, países do Reino Unido, Alemanha e Dinamarca já têm vários projetos em andamento. Considerando-se apenas o problema da profundidade, estima-se que a potência disponível “*offshore*” no Reino Unido seja cerca de 380 TWh por ano; porém se forem consideradas todas as limitações, esse valor é reduzido para 120 TWh por ano (EWEA, 2003; DWIA, 2004).

A tecnologia usada nas instalações convencionais também é aplicável nas instalações marítimas, no entanto, as maiores diferenças referem-se ao ambiente hostil, os custos de instalação e a perda de energia na transmissão da potência para a costa. De uma maneira geral, estima-se que um parque eólico no mar custe 30 % mais caro que um parque equivalente em terra (EWEA, 2004).

**FIGURA 4.11 – FAZENDA EÓLICA OFF-SHORE**



FONTE: EWEA, 2004.

#### **4.3.8. Cálculos energéticos**

Uma condição necessária para a apropriação da energia contida no vento é a existência de um fluxo permanente e razoavelmente forte de vento. As turbinas modernas são projetadas para atingirem a potência máxima para velocidades do vento da ordem de 10 a 15 m/s.

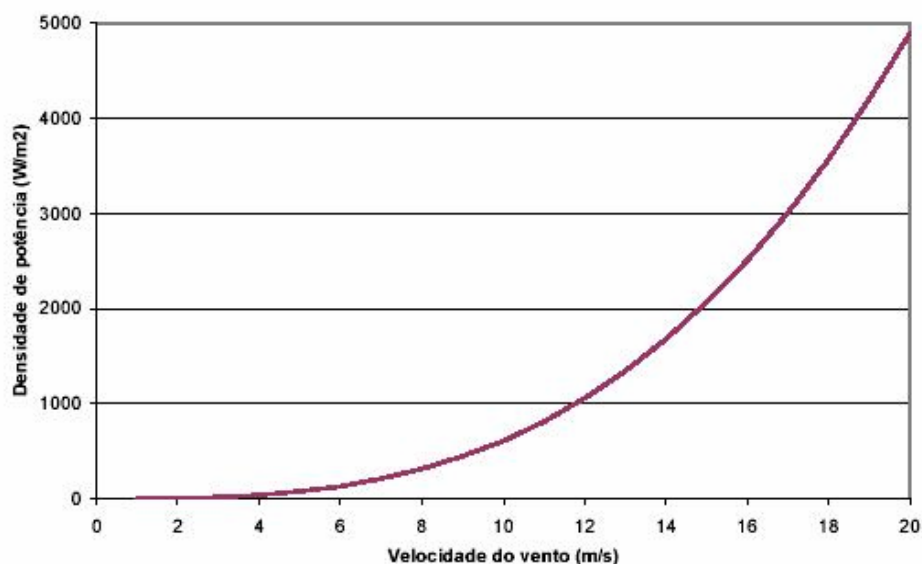
A energia disponível para uma turbina eólica é a energia cinética associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade uniforme e constante  $v$  (m/s).

Na unidade de tempo, aquela coluna de ar, ao atravessar a seção plana transversal  $A$  (m<sup>2</sup>) do rotor da turbina, desloca uma massa  $\rho \cdot A \cdot v$  (kg/s), em que  $\rho$  é a massa específica do ar ( $\rho = 1,225$  kg/m<sup>3</sup>), em condições normais de pressão e temperatura normais). A potência disponível no vento  $P$  (W) é, então, proporcional ao cubo da velocidade do vento.

A informação sobre o recurso eólico de um local independentemente das características das turbinas a instalar, pode ser apresentada em termos da densidade

de potência disponível no vento  $W/m^2$ , isto é, potência por unidade de área varrida pelas pás da turbina (Figura 4.12).

**FIGURA 4.12 – DENSIDADE DE POTÊNCIA DISPONÍVEL NO VENTO.**



FONTE: CASTRO, 1998.

#### 4.3.8.1. Coeficiente de potência – $C_p$

A equação 4.18 indica a potência disponível no vento na ausência de turbina. Esta potência não pode ser integralmente convertida em potência mecânica no veio da turbina, uma vez que o ar, depois de atravessar o plano das pás, tem de sair com velocidade não nula para permitir a continuidade do seu fluxo. A aplicação de conceitos da mecânica de fluídos permite demonstrar a existência de um máximo teórico para o rendimento da conversão eólico-mecânica: o seu valor é 59,3% e é conhecido por Limite de Betz. Seu valor depende basicamente da relação entre a velocidade na ponta da pá do aerogerador  $\lambda$  e a velocidade do vento e do ângulo de passo da mesma pá  $\beta$  (CASTRO, 1998).

O rendimento efetivo da conversão numa turbina eólica depende da velocidade do vento e é dado por (CASTRO, 1998):

$$FC(v) = \frac{P_m}{P_{disp}} \quad (4.21)$$

Onde:

FC – rendimento (ou fator de capacidade),

$P_m$  – potência mecânica no veio da turbina,

$P_{disp}$  – potência disponível no vento,

v – velocidade do vento.

Embora a definição de **FC** seja a dada pela equação 4.21, os fabricantes de aerogeradores têm por hábito incluir o rendimento do gerador elétrico no valor de FC, mas a expressão usada na prática é (CASTRO, 1998):

$$FC(v) = \frac{P_e}{P_{disp}} \quad (4.22)$$

Onde:

FC – rendimento aerodinâmico (ou fator de capacidade ou fator de aproveitamento),

$P_e$  – potência elétrica fornecida aos terminais do gerador

$P_{disp}$  – potência disponível no vento,

As turbinas eólicas são projetadas para gerarem a máxima potência a uma determinada velocidade do vento. Esta potência é conhecida como potência nominal e a velocidade do vento a que ela é atingida é designada por velocidade nominal do vento. Esta velocidade é ajustada de acordo com o regime de ventos no local, sendo habitual encontrar valores entre 12 a 15 m/s.

Para a adequação da velocidade do rotor ao gerador elétrico são usadas caixas de engrenagens multiplicadoras. Dessa forma a potência elétrica de saída do aerogerador é dada por:

$$P_e = P.C_p.\eta_m.\eta_g \quad (4.23)$$

Onde:

$P_e$  – Potência elétrica na saída do aerogerador

$P$  – Potência teórica

$C_p$  – Coeficiente de potência

$\eta_m$  – eficiência da caixa multiplicadora

$\eta_g$  – eficiência do gerador elétrico

Para aerogeradores atuais a eficiência da caixa multiplicadora e do gerador elétrico está entre 94% e 96 %.

#### 4.3.8.2. Energia elétrica

Uma vez obtida uma representação do perfil de ventos numa base de tempo alargada, o valor esperado para a energia elétrica produtível anualmente  $E_a$  é (CASTRO, 1998):

$$E_a = 8760 \int_{u_0}^{u_{\max}} f(\bar{u}) P_e(\bar{u}) d\bar{u} \quad (4.24)$$

Onde:

$E_a$  - energia elétrica produtível anualmente,

$u_0$  - velocidade de *cut-in*<sup>3</sup> (*partida*),

$u_{\max}$  - velocidade de *cut-out*<sup>4</sup> (*parada*),

$P_e(\bar{u})$  - característica elétrica (Potência) do sistema de conversão de energia eólica,

$f(\bar{u})$  - densidade de probabilidade da velocidade média do vento.

Habitualmente estão disponíveis distribuições discretas, sendo que a equação (4.24) se transforma em (CASTRO, 1998):

$$E_a = \sum_{u_0}^{u_{\max}} f_r(\bar{u}) P_e(\bar{u}) \quad (4.25)$$

Em que:

$f_r(\bar{u})$  - frequência (horas) de ocorrência da velocidade média do vento:

$$f_r(\bar{u}) = 8760 f(\bar{u}) \quad (4.26)$$

#### 4.3.8.3. Aplicação da metodologia de cálculo energia obtida do potencial eólico

Conhecendo de um local a velocidade média anual do vento, e/ou a distribuição da probabilidade da ocorrência das classes de velocidade e as características técnicas

<sup>3</sup> Velocidade de início de funcionamento do aerogerador

<sup>4</sup> Velocidade de parada automática de funcionamento do gerador. Acima dessa velocidade o sistema pode sofrer avarias em função de grandes vibrações que ocorreriam nas estruturas

de um sistema aerogerador (potência, dimensões, rendimento), é possível o cálculo do valor esperado da energia elétrica produzida anualmente, a utilização anual da potência instalada, variação do  $C_p$  com a velocidade do vento e a curva de duração anual de potência.

No capítulo 5 será mostrada uma aplicação desse cálculo com dados reais de estações de medição de vento em Minas Gerais e Paraná.

#### **4.4. IMPACTOS DA ENERGIA EÓLICA**

As principais vantagens (impactos positivos ou benefícios) e desvantagens (impactos negativos) apresentados pela energia eólica são listados a seguir.

##### **4.4.1. Vantagens**

- Produção de energia elétrica a partir de uma fonte renovável, sem emissão de poluentes atmosféricos;
- Pode ser complementar às redes tradicionais;
- Não consome combustível;
- Abundante - a Associação Europeia de Energia Eólica (EWEA) estima que, com políticas adequadas, a energia eólica poderia suprir 10% da energia mundial até o ano 2020, contribuindo para a redução da emissão global de óxidos de carbono (DWIA, 2002; EWEA, 2003 );
- Permite que o terreno ocupado pelos parques eólicos seja utilizado para outros fins, por exemplo, para uso agrícola;
- Está entre os sistemas de produção de energia elétrica mais seguros;
- Livre de perigos e baixo impacto ambiental;
- Boa vida útil dos equipamentos (20 anos em média);
- Custo de energia competitivo;
- As usinas eólicas são modulares, permitindo aumentar a quantidade de turbinas instaladas numa localidade, segundo o crescimento da demanda.
- Criação de postos de trabalho com a fabricação de equipamentos, implantação, operação e manutenção dos parques eólicos (DWIA, 2003; DWIA, 2004);
- Contribui para desenvolvimento socioeconômico permitindo acesso à energia elétrica de comunidades isoladas do sistema elétrico interligado.



#### **4.4.2. Desvantagens**

- Instável, está sujeita a variações do vento e a calmarias;
- Os equipamentos são caros e emitem ruídos;
- Impacto visual (efeito de sombras em movimento e reflexões intermitentes);
- Interferências eletromagnéticas (reflexões de ondas).
- Impactos ambientais.

#### **4.4.3. Impactos ambientais da energia eólica**

##### **4.4.3.1. Descrições ambientais que poderão ser afetadas na implantação de um parque eólico**

As Tabelas 4.4 a 4.7 mostram os tipos de impactos e permanência do impacto (P – Permanente; T– Temporário; E – Eventual) e intensidade (B – Baixo; M – Médio; A – Alto) nas diferentes descrições ambientais:

**TABELA 4.4 – IMPACTOS AMBIENTAIS NA PAISAGEM**

<i>Paisagem</i>	<i>Construção</i>	<i>Operação</i>
Sofre alteração da morfologia.	<b>P</b>	<b>P</b>
Destruição ou alteração da cobertura vegetal do terreno	<b>T</b>	<b>P</b>
Afetação da estrutura biofísica da paisagem pela introdução dos aerogeradores, subestação edifício de comando e estradas.	<b>P</b>	<b>P</b>
Possibilidade de desaparecimento de elementos característicos	<b>P</b>	<b>P</b>

A intensidade dos impactos (**B**, **M** ou **A**) na paisagem dependerá do tamanho do parque eólico, ou seja, do número de aerogeradores e da área ocupada pelo conjunto.

**TABELA 4.5 – IMPACTOS AMBIENTAIS NOS ECOSISTEMAS**

<i>Ecosistemas (Flora e Fauna)</i>	<i>Construção</i>	<i>Operação</i>
Destruição ou alteração da cobertura vegetal.	<b>T/B</b>	<b>P/B</b>
Desmatamento dos locais de repouso, alimentação e reprodução de espécies que utilizam a área do parque.	<b>P/B</b>	<b>P/B</b>
Perturbação nas aves e morcegos que utilizam a zona para alimentação e repouso, e no seu sucesso reprodutor.	<b>P/B</b>	<b>P/B–M</b>
Colisão de aves e morcegos nos aerogeradores e eletrificação em linhas elétricas.	-	<b>E/B–M</b>
Movimentação de pessoas e veículos causando acidentes com pequenos animais.	-	<b>E/B</b>

**TABELA 4.6 – IMPACTOS AMBIENTAIS NO AR, ÁGUA E SOLO**

<i>Qualidade do ar e da água e do solo</i>	<i>Construção</i>	<i>Operação</i>
Afetação de linhas de água por derrames eventuais de óleos, combustíveis e produtos.	<b>T/B</b>	-
Aumento de partículas sólidas transportadas pelos cursos d'água devido à escavação.	<b>P/B</b>	-
Emissão de poeiras e partículas.	<b>P/B</b>	-
Exposição do solo aos fenômenos erosivos, principalmente devido à falta de sistemas de drenagem.	<b>T/B</b>	-
Derrames de óleos e combustíveis decorrentes da utilização de máquinas e veículos.	<b>E/B</b>	<b>E/B</b>

**TABELA 4.7 – IMPACTOS AMBIENTAIS DO RUÍDO**

<i>Ruído</i>	<i>Construção</i>	<i>Operação</i>
Tráfego de veículos e máquinas de escavação	<b>T/M</b>	<b>E/B</b>
Ruído emitido pelos aerogeradores, causando incômodo para usuários e residentes na vizinhança.	-	<b>P/B–M</b>

**4.4.3.2. Impactos socioeconômicos na fase de construção e operação**

A identificação e caracterização dos elementos dos patrimônios existentes na área de implantação de um parque eólico permitirão determinar quais as medidas

necessárias para sua proteção e preservação durante a fase de construção e exploração (MENDES, 2002).

Os principais impactos na fase de construção e funcionamento são mostrados nas tabelas 4.8 e 4.9 onde P,T e E indicam respectivamente a permanência do impacto: permanente, temporário e eventual (MENDES, 2002; CASTRO, 1998).

**TABELA 4.8 – IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS NEGATIVOS NAS FASES DE CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO**

<i>Negativos</i>	<i>Construção</i>	<i>Operação</i>
Eventual danificação de elementos patrimoniais existentes na zona de implantação do parque eólico	<b>P/B-M</b>	-
Incômodo nas situações de proximidade de povoações ao parque eólico devido ao tráfego de veículos	<b>T/M</b>	<b>E/B</b>
Incômodo nas situações de proximidade de povoações ao parque eólico devido ao funcionamento da usina	-	<b>P/B</b>

**TABELA 4.9 – IMPACTOS POSITIVOS NAS FASES DE CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO**

<i>Positivos</i>	<i>Construção</i>	<i>Operação</i>
Divulgação de patrimônio existente na zona do parque eólico, que deverá ser documentado, sinalizado e conservado.	<b>P/A</b>	<b>P/A</b>
Utilização de mão-de-obra local para as obras de construção civil subestação.	<b>T/A</b>	-
Incentivo do comércio das localidades vizinhas do parque eólico.	<b>T/A</b>	<b>P/B</b>
Receitas locais resultantes dos contratos de arrendamento dos terrenos diretamente destinados ao parque eólico.	<b>P/A</b>	-
Criação de postos de trabalho para a operação e manutenção do parque eólico.	-	<b>P/B</b>
Melhoria de acessibilidades (estradas, benfeitorias).	-	<b>P/A</b>
Fonte de interesse didático / turístico, possibilitando a atração de outras receitas.	-	<b>P/A</b>
Aumento da capacidade de produção de energia (Sistema Interligado ou Região).	-	<b>P/A</b>
Emissões atmosféricas evitadas.	-	<b>P/A</b>

#### **4.4.4. Considerações sobre a instabilidade da energia eólica**

A desvantagem mais usualmente atribuída à energia eólica seria a falta de energia firme. As usinas hidrelétricas têm armazenamento de energia intrínseco na forma de energia potencial em seus reservatórios, as usinas termelétricas têm reservatórios de combustível, ao passo que as usinas eólicas dependem somente da energia cinética da atmosfera (AMARANTE et al., 2001).

A energia firme pode ser analisada considerando-se duas modalidades de regime de operação: i) operação isolada para atendimento da demanda de uma localidade específica ou ii) operação integrada a um sistema interligado.

A energia firme na modalidade de operação isolada corresponde à quantidade de energia produzida com confiabilidade de 95% a partir de uma curva de permanência de energias diárias. Para usinas eólicas, esse valor é normalmente muito baixo, o que impossibilita que as mesmas operem isoladas.

No caso de operação integrada, a energia firme de uma usina corresponde à geração observada ao longo do período crítico observado nos dados históricos utilizados para simulações (ELETROBRAS, 1996).

Outro conceito utilizado em otimização de sistemas interligados é o de energia garantida de uma usina, que pode ser definido como sendo um valor de referência tal que o fluxo de receita de compra e venda de energia, respectivamente nos períodos deficitário e superavitário, valorizado pelo custo marginal de operação, resulte nulo para um período suficientemente longo (ELETROBRAS, 1996).

A inserção de uma usina eólica em um Sistema Interligado não deve afetar o desempenho nem a otimização do mesmo, portanto com base nesses pressupostos pode-se calcular seus benefícios energéticos, os quais são avaliados com base nos conceitos de energia firme e energia garantida (COPEL, 1997).

Em 1998 foram realizados, na Universidade de Roskilde na Dinamarca, estudos com simulações em resolução horária para dois cenários de inserção de energia eólica no Sistema Elétrico Dinamarquês interligado ao Sistema Elétrico Europeu. No primeiro cenário, que considerou uma inserção de energia eólica correspondente a 37 % do consumo na Dinamarca, os resultados mostraram que essa situação poderia ocorrer sem prejuízo da segurança e estabilidade do sistema, pois haveria uma

complementaridade entre o sistema eólico dinamarquês e o sistema hidrelétrico da Suécia e Noruega (MEIBOM, SVENDSEN & SØRENSEN, 1999).

O segundo cenário considerou uma inserção energia eólica no sistema elétrico nórdico (incluindo Alemanha, Bélgica e Holanda) de aproximadamente 100% do consumo da Dinamarca. Os resultados obtidos demonstraram que o segundo cenário seria também viável tecnicamente no que se refere à segurança e estabilidade do sistema regional, desde que houvesse investimentos em linhas de transmissão da Dinamarca para a Suécia, porém essa alteração acresceria o custo médio da energia em 37% (SØRENSEN & MEIBON, 1999). Sabendo-se porém, que a inserção de energia eólica da Dinamarca substituiria usinas térmicas na Suécia, reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub>, o preço da energia poderia diminuir se ganhos ambientais decorrentes fossem computados (HOLTTINEN, 2004).

#### **4.4.5. Considerações adicionais sobre Impactos na fauna alada**

Os principais impactos da energia eólica sobre os pássaros são devido à colisão dos animais com as linhas e pás e distúrbios nas rotas de migração. As principais causas são listadas a seguir (MANWELL, apud EWEA, 2004):

- Morte ou ferimento causados pela rotação das pás;
- Eletrocussão nas linhas de transmissão;
- Alteração de habitat de migração;
- Redução do habitat disponível;
- Distúrbio na reprodução e crescimento.

Entre os efeitos ambientais de usinas eólicas sobre a fauna alada estão a colisão direta contra torres e pás, e os chamados distúrbios à reprodução, alimentação e repouso na vizinhança das turbinas. Temple (2002) afirma que nos Estados Unidos:

dos pássaros que atualmente estão ameaçados de extinção, 82% dos casos estão associados com perda de habitat dos quais, 44% por supressões excessivas de áreas, 37% por introdução de espécies exóticas e 12% por poluição química ou consequência de eventos naturais (TEMPLE, apud BIRDLIFE, 2003).<sup>5</sup>

Segundo relatório da Birdlife (2003) vários estudos mostram que num raio de

---

<sup>5</sup> Tradução livre da autora: “*of the birds currently endangered by extinction, 82% of the cases are associated with habitat loss, 44% with excessive take, 35% by introduction of exotics, and 12% by chemical pollution or the consequence of natural events.*”

600 m dos parques eólicos o número de pássaros tende a reduzir após a implantação do empreendimento, devido principalmente à: construção de edifícios, incremento das atividades humanas (de operação e manutenção) na área e ruído do movimento das pás (BIRDLIFE, apud EWEA, 2004).

Em relação ao controle de distúrbios e acidentes com a fauna alada, pesquisas mostram que se verifica uma predominância de acidentes fatais com morcegos e no período noturno. Acredita-se, porém, que as vítimas não excedam ao número daquelas vitimadas por quilômetro de auto-estrada ou linhas de alta-tensão. Este número deve ainda ser bem menor que nas proximidades de faróis ou torres de transmissão em áreas costeiras. Dos pássaros vitimados, alguns, de vôo rasante, colidem contra as próprias torres, outros, de vôo alto, colidem com as pás que estão a uma altura superior 20 metros do solo (CEMIG, 1998).

Uma pesquisa feita na Alemanha em 1989, envolvendo 7 parques eólicos alemães, contabilizou, em 1 ano, a morte de 32 pássaros de diversos tipos, vitimados por colisão contra as pás dos geradores eólicos. Nos mesmos locais, foram vitimados por fios e antenas, em 7 meses, cerca de 287 pássaros (CEMIG, 1998).

O caso mais grave de mortalidade de pássaros ocorreu também no mesmo ano, sobre o qual a Comissão de Energia da Califórnia relatou que, as 7 mil turbinas (de diversos tipos e tamanhos) do Passo de Altamont mataram cerca de 60 águias douradas, 300 falcões de cauda vermelha, além de centenas de pássaros menores. Em Nasudden, Noruega, pesquisadores contaram 49 pássaros mortos por uma única turbina em uma noite e em Tarifa na Espanha, que também se caracteriza por grande concentração de turbinas, pequenos pássaros foram vitimados (GIPE, 1995; .BIRDLIFE, 2003; EWEA, 2004) .

Em 2001, a empresa *Western Ecosystems Technology Inc* foi contratada pelo Comitê Coordenador Nacional de Energia Eólica (*National Wind Coordinating Committee*) para estudar os acidentes com pássaros causados por TEs e outras estruturas nos Estados Unidos (EUA). O estudo estimou que em 2001, 33.000 pássaros foram mortos pelas 15.000 turbinas em operação naquele país, sendo que a grande maioria das fatalidades aconteceu na Califórnia onde existem aproximadamente 11.500 TEs em operação. A maioria das turbinas em operação na Califórnia são máquinas pequenas e antigas com capacidade entre 100 e 250 KW. Os resultados indicam que, em média, em um ano cada turbina nos EUA foi responsável pela morte de 2,19

indivíduos de várias espécies da avifauna e 0,033 indivíduos (1 a cada 30 anos) de espécies predadoras (EWEA, 2004).

Na Espanha, um estudo sobre impactos de parques eólicos em pássaros desenvolvido no estado de Navarra, mostrou que as 692 turbinas localizadas em 18 parques não colocaram em risco nenhuma espécie. No ano de 2000, foram encontrados 88 indivíduos mortos, que representa uma taxa de 0,13 pássaros mortos por turbina, isto é, em média decorre sete anos para acontecer uma morte de pássaro em uma turbina (JANSS, 2000; LEKUONA, 2001).

A grande maioria dos estudos na Europa e Estados Unidos trata dos distúrbios e acidentes isolados causados aos pássaros por usinas eólicas em áreas costeiras (onde a população de pássaros migradores é grande e o repouso e a biogeografia para essas espécies são essenciais) ou em áreas de grandes parques eólicos onde, devido ao grande número de turbinas, os riscos de acidente também são maiores.

Tem-se notícia também de acidentes com pássaros em parques eólicos perto de dois ou mais remanescentes florestais próximos, em que as turbinas ficavam na rota de movimentação dos indivíduos (CEMIG, 1998).

#### **4.4.5.1. Um estudo de impacto de um parque eólico em pássaros no interior da Alemanha**

Uma pesquisa desenvolvida na Alemanha no período de 1998 a 2000 teve por objetivo analisar a influência da instalação e operação de turbinas eólicas em populações de pássaros no interior do país. Foram analisadas informações obtidas em três parques já existentes e adicionalmente em um local foram obtidas informações antes e depois da instalação de um novo parque (BERGEN, 2001).

Devido às diferenças de hábitos de vida e reprodução, diferentes tipos de pássaros migratórios e predadores foram estudados separadamente.

Segundo Bergen (2001) a primeira investigação desenvolvida foi com relação à utilização de áreas de parques eólicos como locais de pouso e alimentação por várias espécies. Os resultados não mostraram evidências de impacto no número nem na distribuição espacial de 4 espécies: Águia-de-asa-redonda (*Buteo buteo*), Peneireiro vulgar (*Falco tinnunculus*), Tartaranhão-Azulado (*Circus cyaneus*) e Gralha preta (*Corvus c. corone*). Porém bandos de gralhas pretas (*Corvus c. corone*) com grande número de indivíduos evitavam toda a área do parque e também bandos de Estorninho-

malhado (*Sturnus vulgaris*) e Pombo-claro (*Columba palumbus*) desviavam a área próxima às turbinas num raio de 100 m, porém não ficou evidente que esse comportamento foi devido às turbinas eólicas.

A análise dos dados obtidos no quarto parque, antes e depois da implantação do empreendimento conduziram a resultados que mostraram uma forte evidência de influência das turbinas no comportamento da espécie Abibe (*Vanellus vanellus*). Após a implantação das turbinas, os pássaros deslocaram sua área de pouso para outra área afastada cerca de 200m da área usual (anteriormente utilizada para pouso) denotando uma perda de habitat, tendo como causa principal a turbulência e ruído causado pelas turbinas. Diante dos resultados obtidos, o autor recomenda que não se instalem turbinas eólicas num raio de 200 m de áreas de habitat do Abibe (*Vanellus vanellus*) (BERGEN, 2001).

O estudo também contemplou análise da influência dos parques eólicos na reprodução das espécies e os resultados mostraram que não houve nenhuma alteração notável na procriação.

O terceiro aspecto estudado foi quanto ao impacto no habitat de pássaros predadores com resultados também negativos quanto à fragmentação das áreas de atuação das espécies.

Por último, analisou-se também a influência nas rotas de migração e mortalidade dos pássaros. Quanto às rotas, observou-se uma mudança (19%) na horizontal em que os bandos de pequenos pássaros se dividiam em dois ou três bandos ao se aproximarem dos parques e na direção vertical, ocorreu separação do bando em 45% dos casos. Esse comportamento foi mais evidente quando o arranjo das turbinas seguia uma linha perpendicular à rota de voo.

Com relação à morte por colisão, ocorreu apenas uma morte em 82 dias de observação, o que é totalmente insignificante.

Winkelman (1992) considera que o arranjo (*layout*) dos parques eólicos é importante na redução do risco de colisão de pássaros. Para espécies locais um conjunto denso de turbinas pode desestimular que os animais circulem entre as máquinas, evitando assim acidentes, mas para espécies migratórias, a formação de um conjunto de turbinas em linha paralela à rota indica ser a melhor opção.

Segundo Youth (2001), o impacto da energia eólica em pássaros deve ser analisado dentro de contexto ambiental atual. Direta ou indiretamente todas as



ameaças a avifauna como perda de hábitat resultante da industrialização, exploração desenfreada dos recursos naturais, superpopulação etc., estão relacionadas com atividades humanas sendo, portanto, o homem a ameaça maior. Outras ameaças incluem caça e comércio ilegal, práticas pesqueiras insustentáveis, derramamentos de óleo, e exploração, extração e transporte de óleo e gás natural. Contaminação por substâncias químicas e poluição por praguicida constituem-se também em ameaças significativas. Estruturas como arranha-céus, torres de comunicação e linhas de transmissão também afetam pássaros migratórios e as mudanças climáticas contribuem para diminuição ou destruição de habitat (YOUTH, apud EWEA, 2004).

#### **4.4.5.2. Um modelo desenvolvido nos Estados Unidos para estimativa do impacto da tecnologia eólica nas populações de pássaros**

Morrison e Pollock (1998) desenvolveram um modelo prático sistemático (calibrado com séries de dados históricos obtidos na literatura específica) para avaliar o impacto potencial que as usinas eólicas podem ter sobre a fauna alada, que pode ser generalizado para a maioria das espécies de pássaros.

A metodologia leva em conta: i) a revisão dos maiores fatores que podem influenciar a persistência de uma população silvestre; ii) breve revisão dos modelos que podem auxiliar na estimativa do estado da população e tendência, incluindo métodos de avaliação da estrutura e desempenho dos modelos; iii) revisão das projeções de população e sobrevivência, e iv) desenvolvimento da estrutura para utilização dos modelos de avaliação dos impactos potenciais da implantação de parques eólicos sobre a avifauna.

Para a aplicação desta metodologia de previsão estatística dos impactos de uma usina eólica (por exemplo, na fase anterior ao projeto, durante os estudos de impactos ambientais) sobre a fauna alada, é necessário um inventário da ocorrência e riqueza das espécies, da abundância de indivíduos, dos processos ecológicos que envolvem as espécies e avaliação da presença na região de espécies ameaçadas de extinção. A qualidade dos resultados será tanto melhor, quanto maior for o período de tempo das séries de dados coletados no inventário (MORRISON & POLLOCK, 1998).

Com a utilização do modelo proposto pelos pesquisadores – através de uma análise de sensibilidade que aponta os efeitos da sobrevivência dos indivíduos por classes de idade e da taxa de crescimento da população – é possível se obter diretrizes

referentes ao impacto potencial dos empreendimentos eólicos nas populações de pássaros. Essa análise permite uma primeira aproximação de como os diferentes tipos de populações de pássaros respondem às mudanças hipotéticas na fecundidade e sobrevivência.

Analisando os estudos apresentados, observa-se que parques eólicos podem trazer impactos negativos para algumas espécies da fauna alada, entretanto, estes impactos podem ser reduzidos a um nível tolerável através do planejamento do futuro da geração eólica considerando os aspectos de conservação da natureza como (EWEA, 2004):

- Evitar a instalação de parques eólicos em áreas importantes de habitat;
- Evitar áreas de corredor de migração;
- Adotar arranjo adequado das turbinas no parque eólico;
- Usar torres de tipos apropriados (tubulares);
- Sistema de transmissão subterrâneo.

Como resultado positivo dos estudos desenvolvidos durante a última década, algumas ações foram tomadas por órgãos públicos de proteção ambiental no sentido de fornecer diretrizes para minimização de impactos na avifauna. O Ministério de Meio Ambiente da Espanha, através do *National Strategy for the Conservation of the Spanish Imperial Eagle in Spain* (Estratégia Nacional para conservação da águia imperial espanhola na Espanha), defende que parques eólicos não devem ser instalados em áreas críticas para esta espécie. Também na Espanha, nas regiões de Castilha, Leon e La Mancha, o *Regional Recovery Plan for the Spanish Eagle* (Plano Regional para Recuperação da Águia espanhola) proíbe a instalação de parques eólicos em áreas importantes para reprodução e sobrevivência da espécie (BIRDLIFE, 2003).

Seguindo tendência de regulamentação, o *National Wind Coordinating Committee – NWCC* do *U.S. Department of Energy – USDOE*, publicou em 2003 o estudo *“Wind energy bird interaction: A guidance document”* que propõe diretrizes e metodologias para avaliação de impactos e escolha de local para instalação de parques eólicos (USDOE, 2003).

Destaca-se como recomendação final o desenvolvimento de pesquisas adicionais sobre a natureza e a causa dos impactos na fauna alada. É também desejável que se intensifiquem as pesquisas, tanto em projetos de novos modelos de

turbinas como em novos arranjos de parques eólicos no sentido de minimizar os efeitos negativos.

#### **4.4.6. Considerações adicionais sobre impactos do ruído**

O ruído é definido como um som não desejado que pode ser medido quantitativamente e comparado com normas existentes que limitam os níveis de ruído, mas este também tem um elemento subjetivo. Manwell (2002) classifica os efeitos do ruído da energia eólica em duas categorias principais: i) efeito subjetivo incluindo aborrecimento, incômodo e descontentamento e ii) causa interferência em atividades como conversação (MANWELL, apud EWEA, 2004).

O ruído das turbinas eólicas (TE) vem do som produzido pelas lâminas das pás, da caixa do gerador, do gerador e dos sistemas hidráulicos (embora em TEs modernas este ruído mecânico tenha sido reduzido quase a zero). Como outros impactos de energia eólica, a percepção do ruído depende de características locais (por exemplo, área rural ou urbana, topografia), número e distância dos edifícios /áreas do local das TEs, e do tipo de comunidade afetada (residencial, industrial, turística). A interação destes fatores diminui ou aumenta a percepção de som das TEs.

Fisicamente, o som consiste na variação de pressão detectada pelo ouvido que depende da fonte e do meio através do qual se propaga. A velocidade do som na atmosfera é aproximadamente 340 m/s. É importante se fazer distinção entre o nível da potência do som e o nível da pressão do som que atua em uma determinada localidade. O som é medido em decibéis (dB) e a escala empregada (dBA) mede o alcance percebido pelo ouvido humano.

A Tabela 4.10 mostra a comparação de diferentes potências e níveis de pressão do som que indicam o que pode ser considerado como limite entre audição e dor (incômodo). Como fatores mais importantes que afetam a propagação do som destacam-se: tipo da fonte de ruído, distância da fonte, velocidade do vento, temperatura, umidade, precipitação e a presença de barreiras ou edifícios. Os fatores que mais influenciam a propagação do ruído são a distância da fonte ao observador e o tipo de fonte.

Na Tabela 4.10 é possível observar-se que a distância tem um papel importante na percepção do nível do som. O ruído de uma TE pode alcançar níveis de pressão moderados (< 50 dBA) quando a distância da turbina ao receptor está entre 200 e

300 m. Tipicamente o nível do som de uma TE moderna está entre 100 e 106 dBA dependendo do tipo de turbina (EWEA, 2004).

A escala de decibéis deve ser cuidadosamente interpretada quando se avalia o número de turbinas a serem implantadas e seus efeitos. Uma TE com capacidade superior a 1 MW emite um som (a 200 m) com nível de potência de 104 dBA. A instalação de uma segunda turbina com ruído de mesma potência irá causar apenas um acréscimo de 3 dBA. Aumentando-se a potência do som em 26%, o nível de ruído aumenta em 1 dBA. Triplicando-se a potência do som conduzirá a um incremento de 5 dBA no nível de ruído. A escala dBA é logarítmica, isto é, duplicando-se a potência do som, o índice de acréscimo do nível de ruído será aproximadamente 3 dBA. Um som de potência 100 dBA contém o dobro de energia que um som de 97 dBA. O decréscimo no nível de potência do som com o aumento da distância da fonte será em torno de 6 dBA cada vez que a distância é duplicada. (GIPE, 1995)

**TABELA 4.10 – NÍVEIS DE POTÊNCIA DO SOM**

<b>NÍVEIS DE SOM</b>				
<b>Fonte</b>	<b>Distância da fonte (m)</b>	<b>Nível do som dBA</b>	<b>Ruído equivalente</b>	<b>Impressão subjetiva</b>
<i>Sirene de Polícia</i>	<b>140 - 130</b>			<b>Limiar da dor</b>
<i>Decolagem de jato</i>	61	120		
		1120	Concerto de rock	
<i>Empilhadeira</i>	15	100		
<i>Sirene de ambulância</i>	31	90	Cozinha	Muito alto
<i>Freada de trem</i>	15	80		
<i>Furadeira Pneumática</i>	15	80	Impressora	Alto
<i>Tráfego em rodovia</i>	31	70		
<i>Limpador Vácuo</i>	31	60	Centro de processamento de dados	Moderadamente
			Loja de depart./ escritório	alto
<i>Tráfego leve</i>	31	50	Escritório particular de negócios	
<i>TE &gt; 1 MW</i>	200	49		Baixo
<i>TE &gt; 1 MW</i>	300	45		
<i>Grande transformador</i>	61	40		
<i>Sussurro</i>	2	40	Quarto Silencioso	
	20		Estúdio de Gravação	
	10			Limite de
	0			Audição

FONTE: NATIONAL WIND COORDINATING COMMITTEE, 2002 apud EWEA, 2004.

Em resumo, o ruído total percebido é a soma relativa do ruído do ambiente com o ruído da turbina.

A Tabela 4.11 mostra os limites dos níveis de pressão do som em alguns países europeus. Conforme a Tabela 4.10 uma turbina moderna (que emite de 100 a 106 dBA) deve ser implantada a uma distância de 200 a 300 m do receptor para alcançar um nível de pressão do ruído de 45 e 50 dBA. A avaliação do ruído permite determinar como as TE afetam o ruído do ambiente e também qual é o nível de ruído aceitável (dentro dos padrões nacionais) para as próprias turbinas (EWEA, 2004).

**TABELA 4.11 – LIMITES LEGAIS DE RUÍDOS**

<i>Límites legais de ruidos em dBA</i>					
		<i>Comercial</i>	<i>Misto</i>	<i>Residencial</i>	<i>Rural</i>
<i>Alemanha</i>	Dia	65	60	55	50
	Noite	50	45	40	35
<i>Holanda</i>	Dia		50	45	40
	Noite		40	35	30
<i>Dinamarca</i>				40	45
<i>Reino Unido</i>	Dia.				45
	Noite				40

FONTE: GIPE, 1993.

#### **4.4.7. Consumo de energia e de materiais**

##### **4.4.7.1. Requisitos de materiais**

Uma análise mais recente e detalhada, da quantidade de material utilizado num parque eólico, foi elaborada em um estudo de um parque eólico na Espanha. O parque considerado é formado por 27 turbinas Ecotecnica de 150 kW cada com potência total 4,05 MW, localizadas numa região de elevada altitude na Catalunha (EWEA, 2003).

A Tabela 4.12 apresenta os pesos dos componentes das 27 turbinas, em valores absolutos e por MW instalado.

Esses valores devem ser considerados com cautela uma vez que as quantidades de materiais utilizados não foram obtidas a partir da Análise de Ciclo de Vida (UGAYA, 2001; SILVA, 2002 e GAGNON et al., 2002) e também por serem referentes a um parque eólico com características específicas.

**TABELA 4.12– PESO DOS COMPONENTES DE UM PARQUE EÓLICO COM 27 TURBINAS E COM POTÊNCIA DE 4,05 MW**

<i>Componente</i>	<i>Peso Total</i>	<i>Peso por MW</i>	<i>Percentual</i>
	<i>*(t)</i>	<i>(t/MW)</i>	<i>(%)</i>
Torre de monitoramento (aço)	<1	<1	-
Turbinas (aço)	436	108	17
Fundações das Turbinas (concreto)	1800	444	73
Demais infra-estruturas (mat. diversos)	241	60	10
<b>Total</b>	<b>2478</b>	<b>612</b>	<b>100</b>

FONTE: EWEA, 2003.

De acordo com a Tabela 4.12, os principais materiais utilizados na construção do parque eólico são o concreto, incluindo concreto armado nas fundações das turbinas, e o aço utilizado na fabricação das torres.

Está sendo difundida atualmente a idéia de que um parque eólico, ao atingir o fim do período de vida útil, poderia ser renovado mediante a instalação de novas *naceles* e novos rotores. A construção da “segunda geração” de parques eólicos reduziria em mais de 80% as quantidades de materiais utilizados (EWEA, 2003). Porém, como o período de vida útil de um parque eólico aproxima-se dos 20 a 25 anos, esse procedimento ainda não foi planejado nem experimentado, uma vez que a grande maioria das instalações eólicas é bastante recente.

#### **4.4.7.2. Requisitos de energia**

As turbinas eólicas repõem rapidamente a energia consumida nas fases de manufatura, instalação, manutenção e desativação das centrais. De acordo com um estudo dinamarquês, elaborado em 2002 pela associação de construtores de turbinas eólicas, estima-se que a recuperação da energia consumida durante a fase de construção de um parque eólico ocorra em 3 ou 4 meses. Este estudo utilizou um modelo (“input-output”) da economia dinamarquesa, publicado pela Agência Central de Estatística Dinamarquesa que calcula a energia gasta em todos os componentes e em todas as etapas da cadeia produtiva de uma turbina eólica. Na Tabela 4.13 apresenta-se uma estimativa da energia requerida por uma turbina eólica típica com 600 kW, durante o período de vida útil esperado de 20 anos (DWIA, 2002).

**TABELA 4.13 – ENERGIA CONSUMIDA AO LONGO DAS DIFERENTES FASES DE UMA TURBINA EÓLICA DE 600 kW**

<i>Energia Consumida por uma TE de 600 kW=</i>	
<i>Processo</i>	<i>Energia (MWh)</i>
Fabricação	528
Instalação	137
Operação e Manutenção	215
Sucata (uso)	145
Sucata (recuperação)	-204
<b>Total</b>	<b>821</b>

FONTE: DWIA, 2002.

Considerando os valores da tabela anterior a energia consumida por uma turbina eólica de 600 kW seria recuperada em aproximadamente 3 meses. O transporte das turbinas eólicas para locais afastados daqueles onde são produzidas altera, de forma pouco significativa, os valores apresentados anteriormente. Se uma turbina eólica com o peso de 65 t for transportada de barco num percurso de 10.000 milhas (aproximadamente 6.250 km) verifica-se, apenas, um aumento em 1,5 na energia consumida, em comparação com a situação não requerendo transporte (DWIA, 2002).

#### **4.4.7.3. Emissões resultantes da fase de construção**

Embora as turbinas eólicas não produzam quaisquer poluentes atmosféricos, durante a fase de operação, reconhece-se que, nas outras fases do ciclo de vida ocorrem emissões, com ênfase para a fase de processamento e manufatura dos materiais e dos componentes das turbinas eólicas. As emissões totais associadas a essa etapa têm sido calculadas para um conjunto de diferentes centrais eólicas, principalmente no Reino Unido, Alemanha e Grécia. Os valores referentes aos estudos desenvolvidos na Alemanha e no Reino Unido são apresentados na Tabela 4.14 e referem-se às emissões resultantes da manufatura e construção das turbinas, das torres, dos componentes de condicionamento de potência, dos transformadores e de ligações à rede. O estudo referente à Alemanha considerou os dados relativos ao consumo de energia e às emissões associadas à produção dos materiais utilizados na central eólica. O estudo referente ao Reino Unido considerou os dados relativos às emissões das principais indústrias de processamento da região (EWEA, 2002).

**TABELA 4.14 – EMISSÕES RESULTANTES DO PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS E DA MANUFATURA DAS TURBINAS**

<b>EMISSÃO</b>	<b>Dados da Alemanha <sup>1</sup></b>			<b>Dados do Reino Unido <sup>2</sup></b>		
	<b>t / turbina</b>	<b>t / MW</b>	<b>g / kWh</b>	<b>t / turbina</b>	<b>t / MW</b>	<b>g / kWh</b>
CO <sub>2</sub>	69	276	6,46	190	475	9,1
SO <sub>2</sub>	0,16	0,60	0,015	1,8	4,5	0,087
NO <sub>x</sub>	0,22	0,90	0,020	0,8	2,0	0,036
Particulados	0,05	0,20	0,005			
CH <sub>4</sub>	0,22	0,90	0,020			
N <sub>2</sub> O	7E-04	0,003	6,7E-05			

FONTE: IEA, 1998.

1 Valores baseados em uma turbina de 250 KW com vida útil de 20 anos e dados de emissão na Alemanha (ISET, 1995)

2 Valores baseados em uma turbina de 400 KW com vida útil de 20 anos e dados de emissão no RU (Eyre, 1995)

Nos dois casos citados, as emissões associadas à fase em consideração são duas ordens de grandeza inferiores às emissões associadas à produção de eletricidade a partir de centrais a carvão. Em qualquer dos casos considerados, as emissões variam de acordo com as características das turbinas e com a eficiência da instalação. Apesar de haver alguma variação entre equipamentos com geometrias diferentes, o peso dos componentes para um equipamento de tamanho típico comercial mantém-se praticamente inalterável.

Os valores de emissão diferem nos dois países considerados principalmente devido ao fato destes países utilizarem, na manufatura dos equipamentos, combustíveis com características diferentes.

#### **4.4.7.4. Emissões evitadas durante a fase de exploração**

O principal impacto ambiental positivo da produção de energia de origem eólica se deve ao fato de, contrariamente ao que acontece com as energias convencionais, não estar associada à emissão de poluentes atmosféricos semelhantemente a outras formas de produção de energia a partir de energias renováveis.

A produção de uma unidade de eletricidade (kWh) numa turbina eólica pode substituir uma unidade de eletricidade, produzida numa central de combustíveis fósseis.

O cálculo da taxa de emissões associadas à produção de eletricidade a partir de uma usina de queima de carvão, óleo ou gás é relativamente acessível, porém são variáveis dependendo de determinados fatores, tais como, a eficiência da central, as



medidas de controle de poluição, o regime de operação e a composição do combustível (IEA, 1998). A Tabela 4.15 mostra alguns valores observados na Europa.

**TABELA 4.15 – EMISSÕES ASSOCIADAS À PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE UMA CENTRAL TÉRMICA A ÓLEO**

<i>Poluente</i>	<i>Holanda (g/kWh)</i>	<i>Reino Unido (g/kWh)</i>	<i>Dinamarca (g/kWh)</i>
CO <sub>2</sub>	872	936 - 1079	850
SO <sub>2</sub>	0,38	14 – 16,4	2,9
NO <sub>x</sub>	0,89	2,5 – 5,3	2,6
Cinzas	-	-	55
Material Particulado	-	-	0,1

FONTE: IEA, 1998.

Atualmente, as emissões específicas em centrais de queima de combustíveis fósseis têm registrado um declínio, em função da melhor eficiência e uso de equipamentos menos poluentes. A produção de eletricidade a partir da energia eólica representa uma das opções “mais baratas”, em termos da redução das emissões de CO<sub>2</sub> (Figura 4.13).

Uma turbina eólica moderna com a potência de 600 MW, localizada numa zona com ventos moderados, evita, em comparação com as fontes convencionais e em função de fatores como o regime de ventos, 20000 a 36000 toneladas de CO<sub>2</sub>, durante o tempo de vida útil de 20 anos.

**TABELA 4.16 – EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> (t / GWh) PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA**

<i>Tecnologia</i>	<i>Extração do Combustível</i>	<i>Construção</i>	<i>Operação</i>	<i>Total</i>
Térmica a carvão	1	1	962	964
Térmica a óleo	-	-	726	726
Térmica a gás	-	-	484	484
Geotérmica	<1	1	56	57
PCH <sup>1</sup>	N/A	10	N/A	10
Nuclear	2	1	5	8
Eólica	N/A	7	N/A	7
Fotovoltaica	N/A	5	N/A	5
GCH <sup>2</sup>	N/A	4	N/A	4
Solar	N/A	3	N/A	3
Biomassa	-1509	3	1346	-160

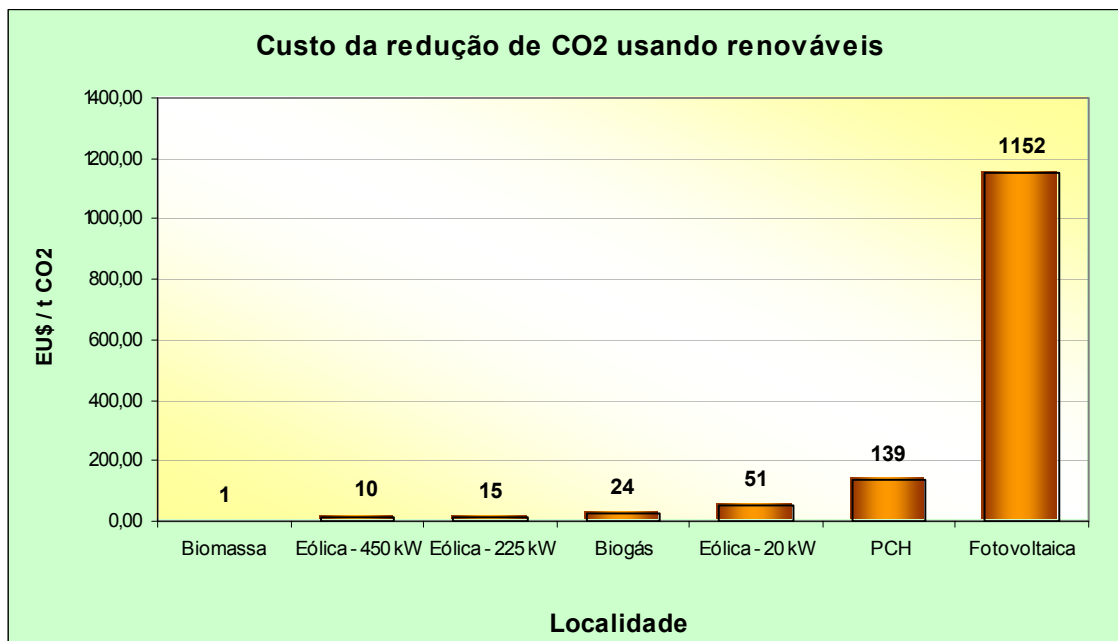
FONTE: IEA, 1998.

<sup>1</sup> PCH – Pequena Central Hidroelétrica

<sup>2</sup> GCH – Grande Central Hidroelétrica

N/A – Não se aplica

**FIGURA 4.13 – CUSTO RESULTANTE REDUÇÃO DAS EMISSÕES, PARA AS DIFERENTES ENERGIAS RENOVÁVEIS**



FONTE: EWEA, 2004.

Das tecnologias que apresentam menores taxas de emissão, apenas os aproveitamentos hidroelétricos são competitivos, em nível comercial. No entanto, tem se constatado que esses empreendimentos, quando inundam grandes áreas com quantidade significativa de biomassa podem provocar a liberação de gases de efeito estufa, principalmente o metano (CH<sub>4</sub>), que apresenta um potencial de aquecimento global 50 vezes superior ao CO<sub>2</sub>. A Tabela 4.17 sintetiza algumas das emissões evitadas pela geração de energia eólica durante o ano de 2003 e projeções das quantidades de emissões que poderiam ser evitadas no mundo se o desenvolvimento da energia eólica se processar de acordo com as previsões (e objetivos para a União Européia - UE) da *European Wind Energy Association – EWEA* para os anos 2010 e 2020 (EWEA, 2004).

**TABELA 4.17 – EMISSÕES EVITADAS**

<b>Ano</b>	<b>Potência Inst.</b>	<b>Produção</b>	<b>Emissões Evitadas/kWh</b>			<b>Emissões Evitadas Acumulada / kWh</b>		
			<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>NO<sub>x</sub></b>
	<i>(GW)</i>	<i>(TWh)</i>	<i>(10<sup>6</sup> t)</i>	<i>(10<sup>3</sup> t)</i>	<i>(10<sup>3</sup> t)</i>	<i>(10<sup>6</sup> t)</i>	<i>(10<sup>3</sup> t)</i>	<i>(10<sup>3</sup> t)</i>
<b>2003</b>	40,3	84,7	50,8	58,4	74,6	50,8	58,0	74,6
<b>2010</b>	197	537	260	286,0	364,5	1.065	1217	1564
<b>2020</b>	1.245	3.054	1.832	1.805,0	2.303,3	1.832	2093	2690

FONTE: EWEA, 2004.

As emissões de CO<sub>2</sub> resultantes de centrais térmicas na UE em 1992 foram de 973 milhões de toneladas. De acordo com um cenário bastante conservador tal valor poderá aumentar para 1195 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, por ano, em 2020. Se os objetivos preconizados pelo EWEA para a energia eólica fossem atingidos seria possível uma redução, nas emissões de CO<sub>2</sub>, no ano 2020, de 11% (EWEA, 2004).

É importante registrar-se que a energia eólica não produz resíduos perigosos e que o risco de ocorrência de acidentes graves é considerado nulo. Contrariamente ao que acontece com a produção de energia elétrica a partir de fontes convencionais, a energia eólica é uma fonte de energia endógena, segura, sustentável e inesgotável, contribuindo, desta forma, para o aumento da diversidade e segurança no abastecimento de energia.

#### **4.5. PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA**

O desenvolvimento apresentado nas últimas décadas pela tecnologia de conversão de energia eólica é significativo. Os sistemas eólicos estabeleceram-se nos EUA e na Europa por intermédio de uma indústria sólida e evoluíram no projeto, na construção e na operação, o que resultou numa redução dos custos (KAZAY e LEGEY, 2001).

A popularidade do uso da energia eólica sempre flutuou com o preço de combustíveis fósseis. Quando os preços do combustível caíram depois de Segunda Guerra Mundial, o interesse pela energia eólica diminuiu. Mas no início da década de 70, com a crise mundial do petróleo, houve novamente um grande interesse de países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de eletricidade que ajudassem a diminuir a dependência do petróleo e carvão. Mais de

50.000 novos empregos foram criados e uma sólida indústria de componentes e equipamentos foram desenvolvidos.

Atualmente, a indústria de turbinas eólicas vem acumulando crescimentos anuais acima de 30% e movimentando cerca de 2 bilhões de dólares em vendas por ano (USDOE, 2003).

Existem, atualmente, mais de 30.000 turbinas eólicas de grande porte em operação no mundo, com capacidade instalada da ordem de 13.500 MW. No âmbito do Comitê Internacional de Mudanças Climáticas, está sendo projetada a instalação de 30.000 MW, por volta do ano 2030, podendo tal projeção ser estendida em função da perspectiva de venda dos "Certificados de Carbono" (ELETROBRAS, 2004).

A situação atual da energia eólica no mundo, segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos –USDOE está mostrada na Figura 4.14.

Os relatórios anuais da Associação Dinamarquesa da Indústria Eólica (*Danish Wind Industry Association – DWIA*) apresentam alguns números sobre o desenvolvimento da energia eólica na Europa que são listados nas Tabela 4.18.

A Dinamarca, em 1997 conseguiu um recorde anual com a instalação de 533 novas turbinas no seu território gerando 300 MW. Isto contribui para um total de 4850 turbinas eólicas, que equivale a 7% de toda a energia consumida pela Dinamarca.

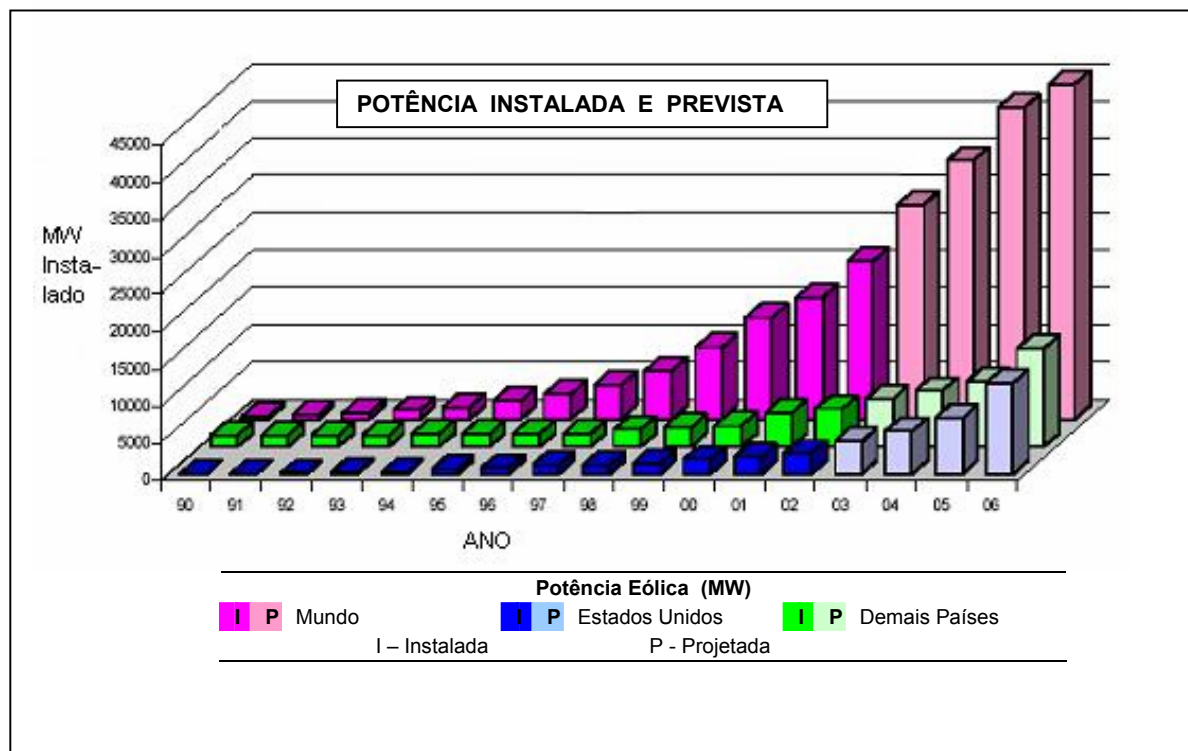
Em 2003, a indústria dinamarquesa de turbinas eólicas apresentou também uma produção significativa com uma venda total de 3200 MW (DWIA, 2004).

**TABELA 4.18 – OS DEZ PAÍSES COM MAIOR POTÊNCIA EÓLICA**

<b>País</b>	<b>Potência adicionada em 2003 (MW)</b>	<b>Capacidade instalada em 2003 (MW)</b>
Alemanha	2.608	14.612
USA	1.685	6.361
Espanha	1.372	6.420
Dinamarca	230	3.076
Índia	408	2.125
Itália	119	922
Netherland	187	938
Reino Unido	97	759
China	99	571
Japão	172	761
Outros	1.003	3.756
<b>Total</b>	<b>7.980</b>	<b>40.301</b>

Fonte: DWIA, 2004.

**FIGURA 4.14 – CRESCIMENTO DA CAPACIDADE INSTALADA MUNDIAL DE ENERGIA EÓLICA**



FONTE: USDOE, 2003.

#### 4.5.1. Dinamarca

Na Dinamarca, a contribuição da energia eólica é de 12% da energia elétrica total produzida. O país investiu, nos últimos 20 anos, mais em energia elétrica que qualquer outro da Europa. Isto é decorrente da longa tradição da utilização do vento como forma de energia. A primeira turbina que gerou eletricidade foi construída em 1891.

O programa energético dinamarquês de hoje ainda faz parte do estabelecido em 1976. O principal objetivo deste é fazer a Dinamarca menos dependente de suprimento de energia importada e também argumentos em defesa do meio ambiente estão sendo levados em conta. Hoje o país conta com 3115 MW instalados que produziram 5,5 TWh em 2003, o que corresponde a 15,9 % do consumo residencial de energia elétrica (DWIA, 2004).

A Dinamarca é uma peça chave no mercado das turbinas eólicas. O país é responsável por cinco empresas que supriram 60% de toda a demanda mundial no ano de 1996. Estas cinco empresas empregam mais de 2000 pessoas no país e via terceirização, um adicional de 10000 empregos. Apenas em 1996, a indústria vendeu 1360 turbinas, dentre as quais 944 para 21 países diferentes. Os maiores compradores são Alemanha (26%), Espanha (12%), e Inglaterra (10%). O total de vendas alcançou um pico em 1997 com 1654 turbinas, representando uma geração de 968 MW (DWIA, 2002).

A indústria dinamarquesa domina também o mercado de turbinas eólicas para instalação em alto mar. Dos 250 MW instalados no mar em 2003, 225 MW foram manufaturados na Dinamarca. Até 2010, está previsto um grande crescimento de instalações eólicas em alto mar (*offshore*) sendo que algumas já estão em fase de projeto. Na Europa destacam-se o Reino Unido com 7000 MW e Alemanha com 2000 MW (DWIA, 2004).

#### **4.5.2. Alemanha**

Na Alemanha, é iniciativa do governo direcionar a economia rumo a maior utilização de energias renováveis diminuindo conseqüentemente o uso de energia obtida de combustíveis fósseis e energia nuclear. Esta política tem alcançado sucesso pois, atualmente cerca de 15% da energia consumida é produzida por tecnologias que buscam a redução de emissões de CO<sub>2</sub>, destacando-se neste cenário a energia eólica (KRAUSE et al., apud DEWI, 2004).

Desde 1996, o mercado alemão de energia eólica vem crescendo, mas em 2003 registrou-se uma queda de quase 600 MW em relação a um pico de 3.200 MW em 2002. Com um total de 16.543 turbinas e 16.629 MW de potência instalada (em 31/12/2004) a maioria dos bons locais para instalação de energia eólica próximos à costa ficaram saturados e o desenvolvimento agora ocupa espaço no interior do país. (DEWI, 2004).

A crescente oposição frente à instalação de mais turbinas em terra ou na costa marítima e os incentivos governamentais para o aumento de produção de energia eólica têm atraído investidores para o desenvolvimento de projetos de fazendas eólicas *offshore* no Mar do Norte. Neste contexto, o mercado alemão em alto mar é muito

promissor com a possibilidade de implantação de mais 20.000 MW antes de 2030. Nenhuma turbina em alto mar foi instalada até agora, mas muitos projetos grandes têm horizontes planejados de 3 a 4 anos.

#### **4.5.3. Estados Unidos**

A energia eólica é muito difundida nos EUA, são recursos que se distribuem desde os níveis mais simples de atividades até as mais complexas. Como exemplo tem-se Dakota do Norte, que sozinha, possui a capacidade de produzir energia que conseguiria suprir 36% da eletricidade de 48 estados (USDOE, 2000).

Atualmente, a energia eólica é responsável por apenas 1% de toda energia produzida no país. O Departamento Nacional de Energia espera um aumento de 600% na utilização de energia eólica nos próximos 15 anos. Espera-se que em meados do século o vento possa ser responsável por 10% de toda energia norte-americana, o mesmo que a parcela produzida pela energia hidrelétrica (USDOE, 2003).

#### **4.5.4. Brasil**

A energia eólica no Brasil apresenta um panorama de desenvolvimento bem diferente dos outros tipos de energias alternativas, já possuindo maturidade tecnológica e escala de produção industrial. Isso foi resultado de significativos investimentos em P&D e uma política de criação de mercado através de políticas de incentivos em vários países, especialmente na Alemanha, Dinamarca, EUA, e mais recentemente na Espanha, entre outros. Hoje essa tecnologia está prestes a ser tornar economicamente viável para competir com as fontes tradicionais de geração de eletricidade, além de existir um grande potencial eólico a ser explorado no país.

No Brasil, embora o aproveitamento dos recursos eólicos tenha sido feito tradicionalmente com a utilização de cataventos múltiplos para bombeamento d'água, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado.

No Brasil, a principal região favorável à utilização da energia eólica é o Nordeste. Para impulsionar o desenvolvimento da energia eólica no Brasil, é necessária a definição de políticas públicas, de leis que a incentivem e de linhas de financiamento. No campo da política, foi criado, pela Câmara de Gestão da Crise de

Energia Elétrica, o Programa Pró-eólica, que garante a compra, a bons preços, de até 1.050 MW (KAZAY e LEGEY, 2001).

Grande atenção tem sido dirigida para o Estado do Ceará por este ter sido um dos primeiros locais a realizar um programa de levantamento do potencial eólico através de medidas de vento com modernos anemógrafos computadorizados. Entretanto, não foi apenas na costa do Nordeste que áreas de grande potencial eólico foram identificadas. Minas Gerais e Paraná, por exemplo, têm centrais eólicas, afastadas da costa, em funcionamento, com excelentes condições de vento.

Atualmente a capacidade instalada no Brasil está em torno de 29 MW (Tabela 4.19), com turbinas eólicas de médio e grande porte conectadas à rede elétrica. Além disso, existem dezenas de turbinas eólicas de pequeno porte funcionando em locais isolados da rede convencional para aplicações diversas - bombeamento, carregamento de baterias, telecomunicações e eletrificação rural (ANEEL, 2004).

Dados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro apontam que o potencial eólico brasileiro indicativo é de 143.000 MW, sendo que 7.694,05 MW já foram autorizados. Sendo que o Ceará participa com quase 65% desta capacidade. As áreas com maior potencial eólico encontram-se nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste (MME, 2004b).

Existem oportunidades de melhoramentos tecnológicos bem identificados internacionalmente que deverão levar ainda a reduções de custo e permitem estabelecer metas bastante ambiciosas para instalação de sistemas de geração nos próximos 30 anos (WACHSMANN e TOLMASQUIM, 2002; JANNUZZI, 2003).

No desenvolvimento dos projetos eólicos o Brasil conta com a participação de diversos grupos nacionais de universidades e grupos estrangeiros, especialmente da Alemanha e Dinamarca. Já existe a produção de turbinas eólicas no país. As áreas identificadas para um programa de P&D em energia eólica são: a) o desenvolvimento de máquinas para situações específicas no Brasil, observando o regime de ventos e melhoria de eficiências, consolidação de dados de potencial eólico, c) integração de parques eólicos ao sistema interligado (JANNUZZI, 2003).



**TABELA 4.19 – POTÊNCIA EÓLICA INSTALADA NO BRASIL**

<i>POTÊNCIA EÓLICA INSTALADA NO BRASIL</i>					
	<i>Ano</i>	<i>Num</i>	<i>Potência (KW)</i>	<i>Total (KW)</i>	<i>Local</i>
1	1993	1	75	75	Noronha - PE
2	1994	4	250	1.000	Camelinho - MG
3	1996	4	300	1.200	Fortaleza - CE <sup>1</sup>
4	1996	1	30	30	Olinda – PE
5	1997	4	10	40	Ilha do Marajó - PA
6	1999	10	500	5.000	Taiba - CE
7	1999	20	500	10.000	Prainha - CE
8	1999	5	500	2.500	Palmas - PR
9	1999	1	300	300	Olinda - PE
10	1999	1	300	300	F. Noronha - PE
11	2002	1	300	2.400	Fortaleza - CE <sup>2</sup>
12	2002	4	600	600	Bom Jardim - SC
13	2003	8	600	4.800	Água Doce - SC
14	2004	3	600	1.800	Macau - RN
	<b>Total</b>	<b>63</b>		<b>28.845</b>	

FONTE: ANEEL, 2004.

#### **4.5.4.1. Vantagem adicional da energia eólica para o Sistema Elétrico Brasileiro.**

O Sistema Elétrico Brasileiro é formado pela interligação de grandes subsistemas: Sul-Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste. As regiões Sudeste e Nordeste têm anualmente um período chuvoso em que a disponibilidade de energia elétrica de origem hídrica é maior e outro seco em que essa disponibilidade cai bastante, como acontece frequentemente no Nordeste (ROCHA et al, 1999).

A disponibilidade de energia eólica no Nordeste (Figura 4.15) é comercialmente atrativa sendo, portanto, uma boa alternativa para complementar o déficit de energia de origem hídrica, pois não possui esta característica de sazonalidade. Com relação ao Sistema Sul-Sudeste (Figura 4.16), também se pode perceber esta característica de

complementaridade, porém os valores não são tão significativos como na Região Nordeste (AMARANTE e SCHULTZ, 1999).

As usinas hidrelétricas correspondem a mais de 70% da capacidade instalada para a geração de energia elétrica no sistema elétrico brasileiro que é caracterizado por grandes usinas com potência instalada superior a 250 MW.

Com relação à localização geográfica, a maioria das usinas hidrelétricas do Brasil está situada nas bacias hidrográficas com nascentes nas montanhas das regiões Sudeste e Sul. Este fato leva a crer que a maioria da geração de energia elétrica do Brasil depende dos regimes hidrológicos destas regiões.

Estudos elaborados em concessionárias de energia do Nordeste e do Sul do Brasil mostraram que as usinas hidrelétricas do Sudeste e do Nordeste têm regimes hidrológicos sazonais semelhantes: maiores vazões naturais dos rios durante o período verão-outono (dezembro a abril), enquanto que algumas vezes foram verificados níveis críticos dos reservatórios durante o período de inverno-primavera (maio a novembro). Este fato tem se tornado um desafio permanente para o planejamento da operação do sistema interligado brasileiro e também tem influenciado as tarifas dos grandes consumidores industriais no país. Além disso, os regimes eólicos do Sul e do Nordeste são complementares ao regime hidrológico sazonal que pode trazer possíveis benefícios de uma maior participação da energia eólica na geração de energia elétrica no Brasil (ROCHA et al, 1999).

#### **A. Complementaridade sazonal hidro-eólica no Brasil na Região Nordeste**

A CHESF - Companhia Hidroelétrica do São Francisco, realizou simulações de UEEs com uma potência eólica instalada de 3 GW, referentes a 5 locais da costa do estado do Ceará durante o período de 1993-1995. Nesta hipótese, as usinas eólicas seriam instaladas em 10% do litoral do estado do Ceará, contariam com aerogeradores da classe de 500-600 kW, eficiência da usina de 90% e disponibilidade dos aerogeradores de 95%. A geração mensal acumulada resultante (Figura 4.15) apresentou uma forte sazonalidade.

A Figura 4.15 também apresenta o comportamento anual da vazão média mensal afluente no reservatório de Sobradinho relativo ao período de 1931-1992.

Os estudos avaliaram o aumento da regularização dos reservatórios de todas as usinas hidrelétricas da CHESF no Rio São Francisco (capacidade instalada de 9.974 MW), em diversos cenários (baseados nos dados anemométricos do estado do Ceará) de participação da energia eólica e respectivas economias de água. O acréscimo hipotético de vazão (ou água poupada) devido à inserção de energia eólica de 14%, 30% e 60% da capacidade instalada.

O Nordeste do Brasil é conhecido pelos fortes ventos ao longo de toda a sua costa. Ressalta-se também a ocorrência de dunas de areias nesta faixa: as dunas próximas ao mar apresentam uma das mais baixas rugosidades ao deslocamento do vento, superior apenas àquela no mar (*offshore*). O estado do Ceará, por exemplo, tem mais de 400 km<sup>2</sup> de dunas em seu litoral.

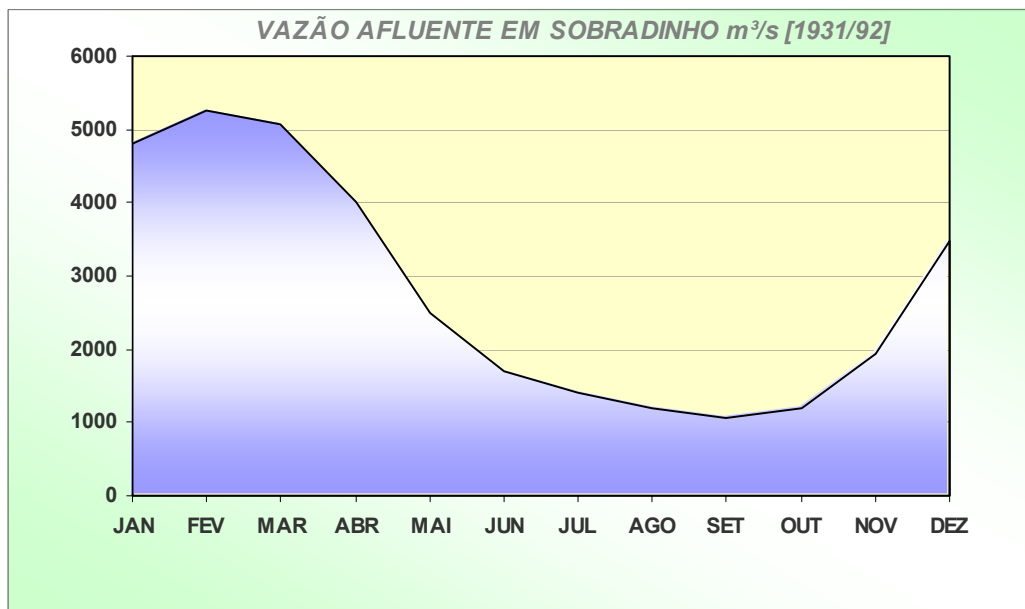
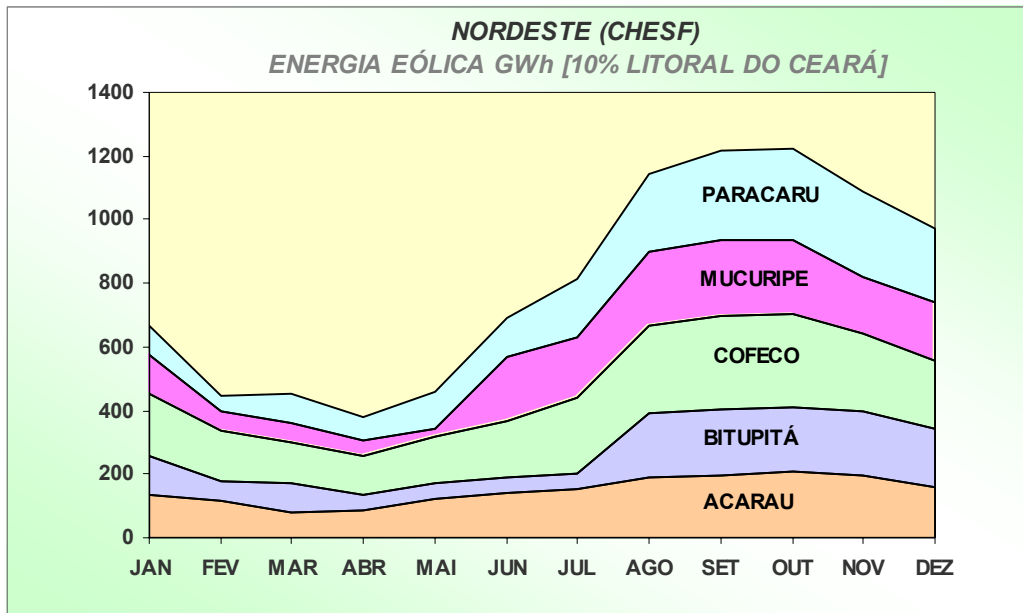
Os estudos da CHESF demonstraram que a operação integrada de usinas eólicas e hidrelétricas pode adicionar uma estabilidade sazonal ao sistema, através do aumento do fator de capacidade das usinas hidrelétricas existentes. A água poupada na geração de energia elétrica pode ser destinada a outros usos uma vez que a região Nordeste sofre freqüentes períodos de secas; e ocorrem conflitos do uso da água do São Francisco, envolvendo principalmente a irrigação de lavouras.

## **B. Complementaridade sazonal hidro-eólica no Brasil na Região Sul-Sudeste**

A COPEL também realizou estudos e simulações da inserção de uma usina eólica de 50/200 MW no sistema interligado. Os dados anemométricos utilizados foram referentes ao período de 1972-1993. Os dados de vazão foram obtidos das mais importantes bacias hidrográficas das regiões Sul/Sudeste. As simulações da integração hidro-eólica foram executadas pela COPEL através do “Modelo de Simulação de Sub-Systemas Equivalentes – MSSSE” .

As análises da integração de uma usina eólica de 50 MW no subsistema Sul não demonstraram complementaridade sazonal, devido às características climatológicas pluviais da região Sul (AMARANTE et al., 2001).

**FIGURA 4.15 - COMPLEMENTARIDADE HIDRO-EÓLICA NO SISTEMA NORDESTE**



FONTE : AMARANTE e SCHULTZ, 1999.

Considerando-se que o subsistema Sudeste é o mais pesado na geração e consumo de energia elétrica, foi também simulada a integração de uma usina eólica em Palmas nos subsistemas Sul/Sudeste. A complementaridade sazonal tornou-se então evidente: deve-se também observar que a geração hidrelétrica conjunta dos subsistemas Sul/Sudeste (Figura 4.16) é de 5 vezes aquela só do Sul.

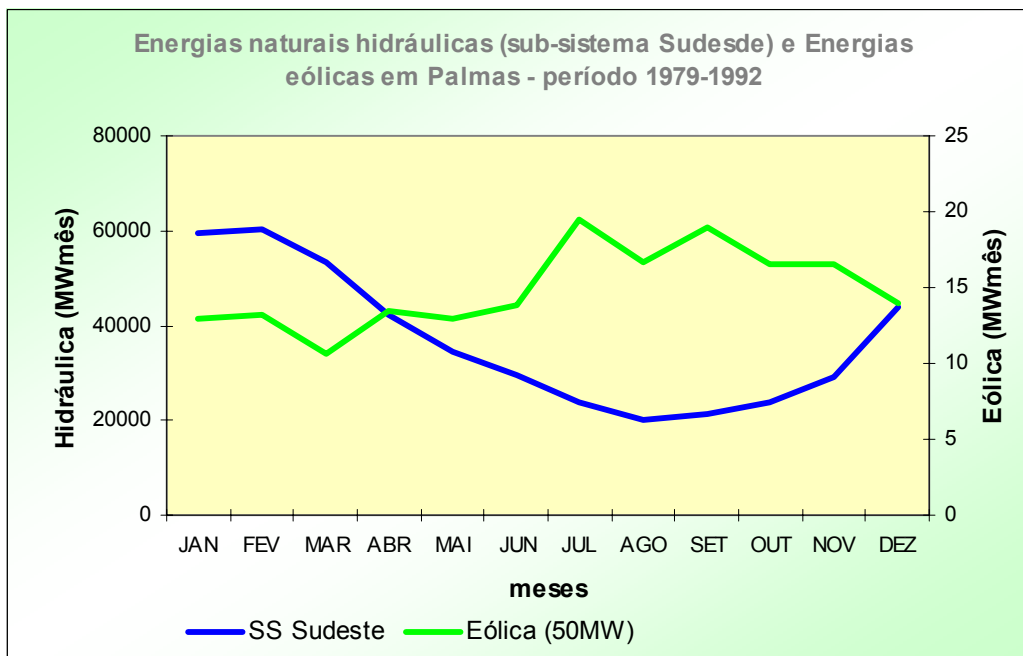
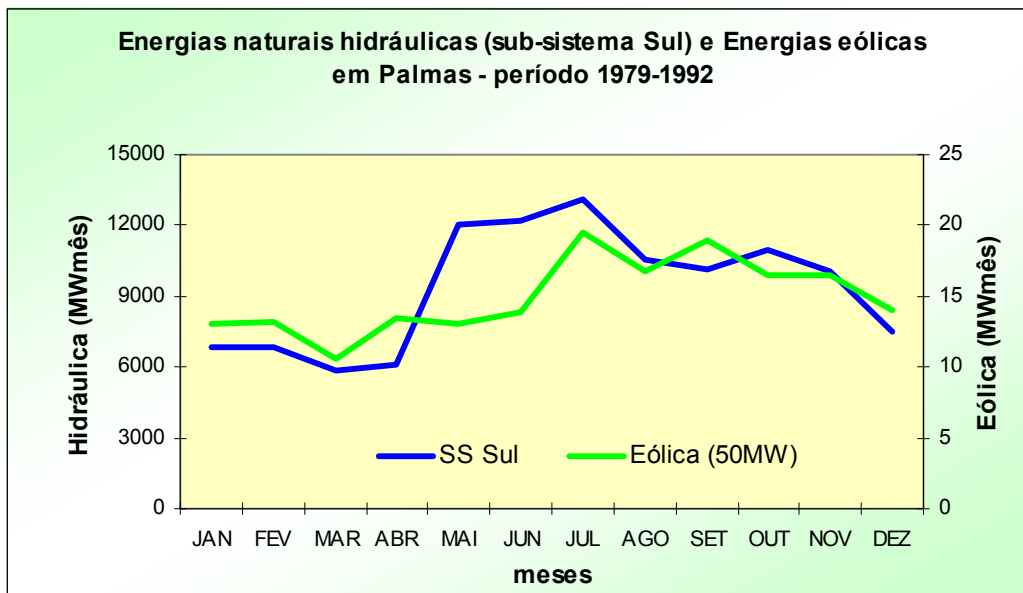
O mapa eólico do Estado desenvolvido pela COPEL (1994-1999) forneceu uma estimativa da potência disponível e da energia a ser gerada por meio de usinas eólicas, considerando-se a taxa de ocupação de 2 MW/km<sup>2</sup>. Apesar da velocidade do vento ser muito variável na escala de minutos ou horas, na escala de médias mensais e anuais, a sua constância é muito maior quando comparada com as vazões do Rio Iguaçu no Paraná. As velocidades médias mensais de Clevelândia-PR do período de 1983-1994 apresentam uma relação entre o desvio padrão e média de 0,113, enquanto que esta relação para as vazões afluentes no reservatório de Segredo da COPEL é de 0,840 para o mesmo período (AMARANTE et al, 2001).

Os estudos, desenvolvidos pelas empresas de energia, aqui apresentados demonstram a complementaridade sazonal hidro-eólica entre os regimes climatológicos do Nordeste, Sudeste e Sul do Brasil. Simulações e modelagens adicionais devem ainda ser executadas para se avaliar mais detalhadamente a contribuição da energia eólica no sistema elétrico brasileiro.

No sistema brasileiro de transmissão de energia elétrica existem grandes áreas no interior do país que não são servidas por grandes linhas de transmissão ou subestações. Usinas eólicas instaladas nesta região poderiam contribuir para o reforço e a redução de perdas de energia em redes longas e fracas.

Outras áreas favoráveis para empreendimentos eólicos estariam situadas ao longo da extensa costa brasileira, coincidindo com os locais de maior consumo no extremo das linhas de transmissão. Todavia, a maioria das usinas hidrelétricas está situada no interior do Brasil e neste contexto a implantação de aproveitamentos eólio-elétricos mais próximos aos grandes centros de consumo, além de melhorar o fator de capacidade do parque de geração de energia predominantemente hidrelétrico pela complementaridade sazonal hidro-eólica, podem também contribuir para o reforço e redução das perdas das redes elétricas (ROCHA et al., 1999).

**FIGURA 4.15 - COMPLEMENTARIDADE HIDRO-EÓLICA NO SISTEMA NORDESTE**



FONTE: AMARANTE e SCHULTZ, 1999.

#### 4.6. CUSTO DA ENERGIA EÓLICA

Considerando o grande potencial eólico existente no Brasil, confirmado através de medidas de vento realizadas recentemente, é possível produzir eletricidade a custos competitivos com centrais termoelétricas, nucleares e hidroelétricas. Análises dos recursos eólicos medidos em vários locais mostram a possibilidade de geração elétrica com custos da ordem de US\$ 70 - US\$ 80 por MWh (ELETROBRAS, 2004).

Nos Estados Unidos, em 1979, o custo da energia eólica era de US\$ 400 / MWh. Já em 2000, este caiu para US\$ 60 / MWh e em 2004 já atingiu US\$ 45 / MWh. Alguns projetos em andamento nos EUA atingiram uma meta que é muito importante para o desenvolvimento futuro da utilização da energia eólica, que é diminuir drasticamente o custo do kWh gerado, que varia de US\$ 0,039 (em algumas usinas nos Texas) a US\$ 0,05 centavos ou mais (no Pacífico Noroeste). Estes custos são similares aos de muitas formas convencionais de geração de energia, e se espera que tais custos diminuam ainda mais em um intervalo de 10 anos (USDOE, 2004). Os custos da produção de energia nos Estados Unidos estão resumidos na Tabela 4.20.

**TABELA 4.20 – CUSTO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NOS ESTADOS UNIDOS**

<i>Ano</i>	<i>Custo (US \$)/MWh</i>
1979	400
2000	60
2004	45 ( 39 -50)

FONTE: USDOE, 2004.

Na Europa, em 2002, o custo da produção da energia eólica correspondia a € 39 / MWh. Considerando a melhoria na tecnologia espera-se que em 2010 o custo da energia caia para € 29 / kWh e considerando a mesma tendência de diminuição o valor para 2020 será de € 23 / MWh, correspondendo a uma redução significativa de 40% em comparação a 2002 (DWIA, 2003). Os custos observados e projetados de produção de energia eólica na Europa estão resumidos na Tabela 4.21.

**TABELA 4.21 – CUSTOS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NA EUROPA**

<i>Ano</i>	<i>Custo (€)/MWh</i>	<i>Custo (US \$)/MWh</i>
2002	39	50,70
2010	29	37,70
2020	23	29,90

FONTE: DWIA, 2003.

O custo de investimento (Tabela 4.22) também apresenta a mesma tendência de queda, em 2002, correspondia a € 823 por kW instalado, em 2010, o custo da energia cairá para € 623 / KW e, em 2020, chegará a € 497 / KW (DWIA, 2003).

**TABELA 4.22 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NA EUROPA**

<i>Ano</i>	<i>Custo (€)/kW</i>	<i>Custo (US \$)/kW</i>
2002	823	1070
2010	623	810
2020	497	646

Fonte: DWIA, 2003.

Os custos associados à instalação de parques eólicos dependem dos custos de instalação e do tipo de tecnologia adotada, sendo, por isso variáveis em função dos acessos, fundações, transporte, ligação à rede, número de turbinas, altura do rotor, tipo do gerador e sistema de controle (CASTRO, 1998).

Os dados conhecidos permitem situar o investimento total médio, e os valores do custo de geração numa gama de variação conforme apresentado na Tabela 4.23.



**TABELA 4.23– CUSTOS DE INSTALAÇÃO E GERAÇÃO**

<i>Custos de Instalação e de Geração para Diferentes Tecnologias</i>				
<i>Tecnologia</i>	<i>Custo de geração US\$/MWh</i>		<i>Custo de instalação US\$/kW</i>	
	<i>médio</i>	<i>faixa</i>	<i>médio</i>	<i>faixa</i>
<i>Gás Ciclo Combinado</i>	35	30 - 40	600	500 - 700
<i>Carvão</i>	48	45 - 55	1200	1000 - 1300
<i>Nuclear</i>	60	33 - 80	1600	1200 - 2000
<b><i>Eólica</i></b>	<b>55</b>	<b>30 - 80</b>	<b>1400</b>	<b>800 - 2000</b>
<i>Biomassa (25MW)</i>	65	40 - 90	2000	1500 - 2500
<i>PCH</i>	75	50 - 100	1000	800 - 1200
<i>Solar Térmica</i>	150	120 - 180	5000	4000 - 6000
<i>Solar Fotovoltaica</i>	550	300 - 800	7000	6000 - 8000

FONTE: RENEWABLE ENERGY WORLD / MARCH-APRIL 2003, p.30

Segundo o Departamento de energia norte-americano (USDOE, 2003), os custos de implantação de uma central eólica apresentam as seguintes proporções (%) em relação ao investimento por unidade de potência instalada (Tabela 4.24):

**TABELA 4.24 – CUSTO DAS PARTES DE UM SISTEMA EÓLICO**

<i>Parte do Sistema eólico</i>	<i>Percentual do custo unitário</i>
<i>Terreno</i>	0,15
<i>Rotor</i>	17,28
<i>Torre</i>	13,1
<i>Nacele + gerador + CM</i>	39,24
<i>Infra-estrutura</i>	29,5
<i>Controle e segurança</i>	0,73

FONTE: USDOE, 2003.

## **4.7. POTENCIAL EÓLICO MUNDIAL E BRASILEIRO**

Na atualidade, a capacidade instalada no mundo é da ordem de 39.500 MW, sendo Alemanha, Espanha e Estados Unidos os países que apresentam a maior capacidade instalada (USDOE, 2004). No Brasil, a potência instalada é ainda pouco significativa (29 MW), se comparada com o potencial existente principalmente no nordeste e na maior parte do litoral, incluindo o Rio Grande do Sul (SCHULTZ, 2002). Segundo os dados do Atlas Eólico Brasileiro (Figura 4.16), o potencial eólico brasileiro é da ordem de 140 GW (ANEEL, 2002).

### **4.7.1. Atlas Eólico Brasileiro**

A geração eólico-elétrica expandiu-se no mundo de forma acelerada ao longo da última década, atingindo a escala de gigawatts. Um dos fatores limitantes para empreendimentos eólicos tem sido a falta de dados consistentes e confiáveis. Uma parte significativa dos registros anemométricos disponíveis pode ser mascarada por influências aerodinâmicas de obstáculos, relevo e rugosidade. A disponibilidade de dados representativos é importante no caso brasileiro, que ainda não explorou esse recurso abundante e renovável de forma expressiva (AMARANTE et al., 2001).

O Atlas do potencial eólico brasileiro, elaborado pela ELETROBRÁS cobre todo o território nacional e tem como objetivo fornecer informações para identificação de áreas adequadas para aproveitamentos eólio-elétricos.

Na elaboração do Atlas foi utilizado o software de modelagem numérica dos ventos de superfície chamado “MesoMap”. Esse software simula a dinâmica atmosférica dos regimes de vento e variáveis meteorológicas correlatas, a partir de amostragens representativas de um banco de dados. O sistema inclui condicionantes geográficas como o relevo, a rugosidade induzida por classes de vegetação e uso do solo, as interações térmicas entre a superfície terrestre e a atmosfera bem como os efeitos do vapor d'água presente (AMARANTE et al. 2001).

Utilizando dados validados para o período 1983/1999 as simulações foram balizadas por referências existentes, tais como grades de dados meteorológicos, radiossondagens, vento e temperatura medidos sobre o oceano e medições de vento

de superfície realizadas regionalmente no Brasil, das quais foram selecionadas apenas as medições com qualidade adequada. Os resultados das simulações foram apresentados em mapas temáticos dos regimes médios de vento (velocidade, direções predominantes e parâmetros estatísticos de Weibull) e fluxos de potência eólica na altura de 50m, na resolução horizontal de 1km x 1km, para todo o país (AMARANTE et al., 2001).

Além da indicação das melhores áreas de potencial eólico no território nacional e das principais características de vento (direções predominantes, regimes diurnos, fatores estatísticos de Weibull), foi realizada no Atlas a integração de áreas de potencial com uso de ferramentas de geoprocessamento.

#### **4.7.2. Potencial eólico-elétrico brasileiro estimado**

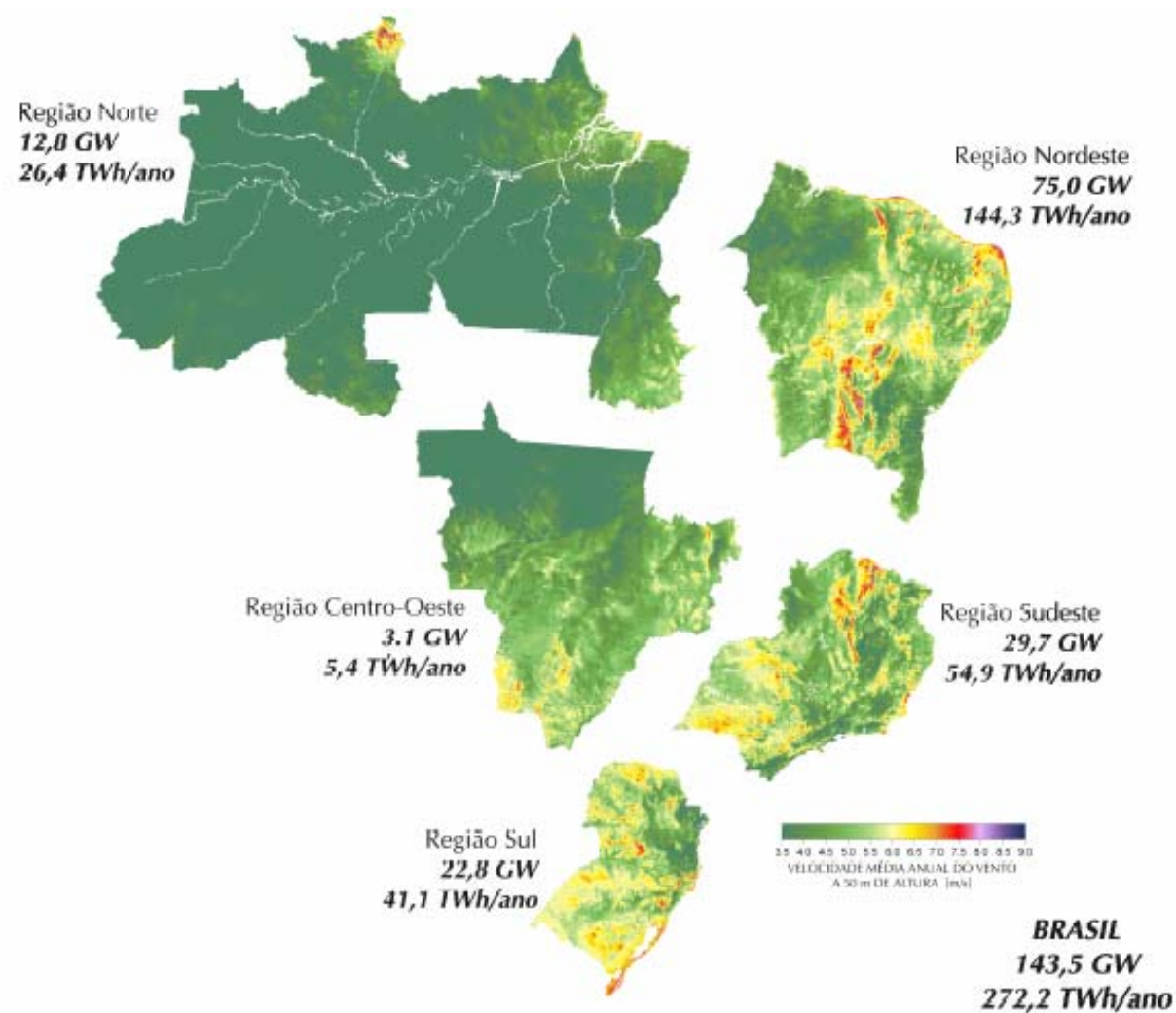
O Atlas foi obtido por meio da integração dos mapas digitais, utilizando-se recursos de geoprocessamento e cálculos de desempenho e produção de energia elétrica a partir de curvas de potência de turbinas eólicas existentes no mercado, chegando aos valores de potencial eólico-elétrico estimado.

O processo de mapeamento do potencial eólico foi realizado considerando-se as seguintes premissas (AMARANTE et al., 2001):

- Integração de todas as áreas que apresentaram velocidades médias anuais iguais ou superiores a 6 m/s.
- Foram consideradas curvas médias de desempenho de turbinas eólicas no estado-da-arte mundial, instaladas em torres de 50m de altura.
- Utilização de uma densidade média de ocupação de terreno de apenas 2 MW/km<sup>2</sup>. Esse valor é considerado conservador, uma vez que representa cerca de 20% do realizável por usinas eólicas em terrenos planos.
- Adoção de intervalos com incrementos de 0,5 m/s para as velocidades médias anuais de vento. O desempenho de turbinas eólicas foi calculado para os limites inferiores de cada intervalo.
- Adoção de um fator de disponibilidade de 0,98, considerado típico para usinas eólicas comerciais.

- Foram descartadas da integração as áreas cobertas por água (lagos e lagoas, açudes, rios e mar).
- Os resultados da integração, por faixas de velocidade foram apresentados por regiões. Figura 4.17
- A partir dos resultados obtidos para cada região foi estimado o potencial disponível (segundo as premissas anteriores) da ordem de 143,5 GW, conforme se mostra na coluna *Integração Cumulativa* da Tabela 4.25.

**FIGURA 4.17 – POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO**



FONTE: ELETROBRAS / AMARANTE et al., 2001.

**TABELA 4.25 – POTENCIAL EÓLICO-ELÉTRICO DO BRASIL**

<i>Integração por faixas de velocidades</i>						<i>Integração Cumulativa</i>			
<i>Região</i>	<i>Vento</i>	<i>Área</i>	<i>Potência Instalável</i>	<i>Fator de Capacidade</i>	<i>Energia Anual</i>	<i>Vento</i>	<i>Área Cumulativa</i>	<i>Potência Instal-vel</i>	<i>Energia Anual</i>
<b>NORTE</b>	[m/s]	[km²]	[GW]		TWh/ano]	[m/s]	[km²]	[GW]	TWh/ano
	6 - 6,5	11460	22,92	0,13	25,58	> 6	24206	48,41	70,49
	6,5 - 7	6326	12,65	0,17	18,46	> 6,5	12746	25,49	44,91
	7 - 7,5	3300	6,6	0,2	11,33	> 7 m/s	6420	12,04	26,45
	7,5 - 8	1666	3,33	0,25	7,15	> 7,5	3120	6,24	15,11
	8 - 8,5	903	1,81	0,3	4,65	> 8	1454	2,91	7,96
	> 0,5	551	1,1	0,35	3,31	> 8,5	551	1,1	3,31
<b>NOR-DESTE</b>	6 - 6,5	146589	293,18	0,13	327,19	> 6	245105	490,21	649,5
	6,5 - 7	60990	121,98	0,17	178,02	> 6,5	98216	197,03	322,31
	7 - 7,5	24383	48,77	0,2	83,73	> 7 m/s	37526	75,05	144,29
	7,5 - 8	9185	18,37	0,25	39,43	> 7,5	13143	26,29	60,56
	8 - 8,5	3088	6,18	0,3	15,91	> 8	3958	7,92	21,13
	> 0,5	870	1,74	0,35	5,23	> 8,5	870	1,74	5,23
<b>CEN-TRO-OESTE</b>	6 - 6,5	41110	82,22	0,13	91,76	> 6	50752	101,5	120,83
	6,5 - 7	8101	16,2	0,17	23,65	> 6,5	9642	19,28	29,07
	7 - 7,5	1395	2,79	0,2	4,79	> 7 m/s	1541	3,08	5,42
	7,5 - 8	140	0,28	0,25	0,6	> 7,5	146	0,029	0,63
	8 - 8,5	6	0,01	0,3	0,03	> 8	6	0,01	0,03
	> 0,5	0	0	0,35	0	> 8,5	0	0	0
<b>SUDESTE</b>	6 - 6,5	114688	229,38	0,13	255,99	> 6	175859	351,72	446,07
	6,5 - 7	46302	92,6	0,17	135,15	> 6,5	61171	122,34	190,08
	7 - 7,5	11545	23,09	0,2	39,64	> 7 m/s	14869	29,74	54,93
	7,5 - 8	2433	4,87	0,25	10,44	> 7,5	3324	6,65	15,29
	8 - 8,5	594	1,19	0,3	3,06	> 8	891	1,78	4,84
	> 0,5	297	0,59	0,35	1,78	> 8,5	297	0,59	1,78
<b>SUL</b>	6 - 6,5	121798	243,6	0,13	271,86	> 6	171469	342,94	424,74
	6,5 - 7	38292	76,58	0,17	111,77	> 6,5	49671	99,34	152,88
	7 - 7,5	9436	18,87	0,2	32,4	> 7 m/s	11379	22,76	41,11
	7,5 - 8	1573	3,15	0,25	6,75	> 7,5	1940	3,09	0,71
	8 - 8,5	313	0,63	0,3	1,61	> 8	370	0,74	1,95
	> 0,5	57	0,11	0,35	0,34	> 8,5	57	0,11	0,34
<b>Total Brasil Estimado</b>						> 6	667391	1334,78	1711,62
						> 6,5	23146	463,49	739,24
						> 7 m/s	71735	143,47	272,2
						> 7,5	21676	43,35	100,3
						> 8	6679	13,36	35,93
						> 8,5	1775	3,55	10,67

FONTE: ELETROBRAS / AMARANTE et al., 2001.

#### **4.7.3. Atlas Eólico do Paraná**

Ao iniciar um programa de medições anemométricas específicas em 1994, a COPEL tinha poucos indicativos de existência de potencial aproveitável para geração eólica no território paranaense. Cinco anos depois, a COPEL confirmava a existência, em seus campos de planalto, de uma reserva energética efetivamente aproveitável (com ventos acima de 6,5m/s) da ordem de 5,8 TWh/ano – o que equivale a cerca de 1/3 do consumo atual de energia no estado. Adicionalmente, as medições e o mapeamento detalhado do potencial eólico realizados pela COPEL já atraíram investimentos privados da ordem de 2,5 milhões de dólares aos campos de Palmas, no sul do Paraná, onde hoje opera comercialmente a fase I de uma usina eólica com 2,5MW de capacidade instalada.

A seguir são descritos os principais marcos resultantes do projeto para determinação do potencial eólico no Estado do Paraná realizado pela COPEL (AMARANTE et al. 2001) e (COPEL, 1999).

#### **4.7.4. Projeto VENTAR**

Chamado de Projeto VENTAR (COPEL, 1999), o programa de medições específicas para avaliação do recurso energético do vento na área de concessão da COPEL partiu de uma metodologia objetiva de identificação das melhores áreas e locais para exploração desse potencial para geração de energia. A ação coordenada se concentrou nas seguintes tarefas:

- Modelos digitais de relevo e rugosidade do Paraná, para identificação das melhores áreas;
- Questionários a equipes regionais de manutenção de redes de transmissão e distribuição, que são fontes subjetivas de informações quanto a possíveis áreas e locais com freqüente incidência de ventos;
- Análise dos dados existentes, que concentrou-se predominantemente nos registros da rede de estações meteorológicas do IAPAR (Instituto Agrônômico do Paraná) e consultas ao SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná);
- Inspeção de áreas onde foram identificadas todas as regiões candidatas e feita a programação de viagens a campo, com a preparação de cartas IBGE (1:50.000 e 1:100.000) das áreas.

À medida que evoluíam as seleções de locais, foram sendo instaladas as estações de medição, com um total de 25 torres implantadas entre janeiro de 1995 até o ano de 1998. No decorrer das medições, algumas estações foram relocadas para uma melhor cobertura do Estado, descartando áreas que se mostraram sem interesse. Ao final do projeto, em 1999, contava-se com séries de mais de 2 anos para todas as áreas mais representativas.

Como os dados até então existentes sobre o potencial eólico no estado do Paraná não eram animadores, optou-se por um compromisso de maximizar o número de estações a custo mínimo. O compromisso levou à aquisição de 25 sistemas anemométricos NRG (sensores de velocidade, direção e *loggers*). Como torres, foi realizada uma adaptação de postes de concreto com extensões tubulares em aço.

Onde possível e adequado, foram utilizadas as estruturas já existentes de torres de telecomunicações. O poste de concreto com extensão tubular permitiu medições a 18-20 metros de altura a custo mínimo, por consistir em empréstimo de material já existente na empresa. A utilização de torres de telecomunicações só foi possível em estruturas que não possuíam antenas parabólicas próximas ao topo - que produziriam demasiada interferência aerodinâmica nos valores medidos. Das 25 estações, 15 foram instaladas em postes de concreto adaptados e o restante em torres de telecomunicações da própria COPEL, TELEPAR, EMBRATEL e ELETROSUL. Ao final do projeto, as duas grandes áreas de melhor potencial eólico já contavam com medições a 50-65m de altura - algumas resultantes de estudos de viabilidade que se iniciaram após as primeiras constatações (COPEL, 1999).

#### **4.7.5. Mapa do potencial eólico do Paraná**

Em 1998 iniciou-se a análise e preparação dos modelos para o cálculo de interpolação dos dados anemométricos para todo o território paranaense. A extrapolação para condições a 50m de altura – filtrando os efeitos locais de relevo e rugosidade - foi realizada com o software WAsP para todas as estações do projeto, através de modelagem destes parâmetros numa área de 10 km x 10 km no entorno de cada estação do Projeto VENTAR, bem como as duas estações do IAPAR consideradas como referência (Mapa – Anexo I).

Os ajustes climatológicos foram realizados para um horizonte de 15 anos de dados disponíveis do IAPAR, apesar das diferenças interanuais das médias serem



inferiores a 3%. A partir desta análise elaborou-se o modelo estatístico atmosférico, para o cálculo de mapeamento. O modelo de rugosidade do estado, em resolução de 2km, foi desenvolvido a partir do Mapa de Uso do Solo do Estado do Paraná, disponibilizado em forma digital pela SEMA (Secretaria de Meio Ambiente) onde parâmetros de rugosidade foram associadas às diversas classes de vegetação / uso do solo (COPEL, 1999).

Adotando-se o modelo de relevo gerado a partir do banco de dados do CEHPAR (Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza - UFPR/COPEL) o cálculo de interpolação para todo o estado na resolução 2 x 2km, a partir dos três modelos descritos acima, foi realizado pelo software WINDMAP, utilizando o modo de otimização de estabilidade térmica atmosférica para refletir com representatividade todos os valores de velocidade de vento medidos.

O Mapa do Potencial Eólico do Estado do Paraná foi editado no início de 1999 pela COPEL, no formato 0,7 x 1,0 m, escala 1:1.000.000. Nele, as velocidades de vento na altura de 50m são apresentadas em escala contínua de 255 níveis de cor (Mapa Eólico do Paraná – Anexo I). Também foram incluídos no mapa os principais dados relevantes para a compreensão da metodologia e resultados do projeto:

- Modelos de relevo e rugosidade utilizados como base;
- Posição das torres de medição do Projeto VENTAR, respectivas alturas de medição e velocidades médias anuais obtidas;
- Síntese da dinâmica dos regimes de vento sobre o Paraná, bem como dos regimes de vento diurnos, sazonais e interanuais;

Com a elaboração do mapa de potencial eólico do Paraná verificou que os ventos no litoral não eram tão atrativos quanto se pensava sendo que as velocidades de vento mais altas foram registradas em locais de maior altitude, levando a empresa a decidir pela implantação da usina eólica de Palmas em regime de parceria da COPEL com a *Wobben Windpower*, formando a empresa “Centrais Eólicas do Paraná Ltda”.

A usina tem potência total de 2,5 MW com cinco aerogeradores Enercon E-40 de 500 kW, diâmetro do rotor de 40 m em torres tubulares em aço de 44 m de altura e entrou em operação em fevereiro de 1999.

## **5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULOS ENERGÉTICOS**

A produção de energia e a eficiência de uma UEE dependem não somente das características físicas ou de projeto das turbinas, mas principalmente do local onde está instalada, o qual influencia diretamente o tipo e qualidade do vento.

Para demonstrar esta correlação serão simulados alguns casos utilizando dados de projeto da UEE de Morro do Camelinho - MG (Figura 5.1) e medições de vento nesse local, além da energia gerada durante a sua operação no período (CEMIG, 1998). O mesmo procedimento será feito com os dados da UEE Palmas, no Paraná. Os dados calculados serão comparados com os dados observados possibilitando uma avaliação do desempenho das usinas.

Do Estado do Paraná foram também selecionadas 4 estações de medição de vento (Santo André, Palmas, Morro Perdidos e Ilha do Mel) utilizadas para a elaboração do mapa do potencial eólico no Paraná pelo projeto VENTAR (COPEL, 1996), para as quais se simularão a implantação de uma usina com as características da UEE Morro do Camelinho e uma segunda usina com as características da UEE de Palmas. Com estas projeções pretende-se calcular o potencial eólico estimado nestes locais e também comparar as opções entre si destacando as vantagens e desvantagens relativas.

### **5.1 AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO DA UEE DO MORRO DO CAMELINHO – MG**

Em operação desde agosto de 1994, a usina está situada no município de Gouveia – MG, a 250 km ao norte de Belo Horizonte, sobre a Serra do Espinhaço, a 1328 m de altitude, com latitude  $18^{\circ} 34' 50''$  Sul e  $43^{\circ} 53' 58''$  de longitude Oeste.

A usina tem uma capacidade instalada de 1 MW sendo composta de 4 aerogeradores modelo TW250, com capacidade nominal de 250 kW para uma velocidade nominal de 14,3 m/s, fabricados pela empresa alemã *Tacke Windetecnick*.

O custo total de implantação da usina foi de US\$ 1.540.000,00, sendo 51% custeado a fundo perdido pelo Ministério da Pesquisa e Tecnologia da Alemanha (BMFT), através do Programa Eldorado. A contrapartida da CEMIG foi de US\$ 750.000,00, financiada pela FINEP (CEMIG, 1988).

### **5.1.1 Dados de entrada**

Os dados técnicos da usina eólico-elétrica (UEE) do Morro do Camelinho (MC) foram obtidos do relatório elaborado pela CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais através do Departamento de Gerenciamento de Manutenção da Diretoria de Produção e Transmissão. O relatório cujo título é “Usina Eólico-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho: Relatório de Desempenho Operacional – Período 94/97” foi elaborado em 1998 e naquela ocasião, a CEMIG disponibilizou uma cópia do trabalho para a Área de Energias Alternativas da COPEL (DGT/SPG – Diretoria de Geração, Transmissão e Telecomunicações/Superintendência de Planejamento e Expansão da Geração), que cedeu as informações para aplicação nesta dissertação.

#### **FIGURA 5.1 – USINA EÓLICA MORRO DO CAMELINHO – MG**



FONTE: CBEE, 2005.

#### **5.1.1.1 Dados da usina**

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam as informações de localização e dados técnicos do projeto da UEE-MC.

**TABELA 5.1 – LOCALIZAÇÃO DA UEE MORRO DO CAMELINHO**

<b>Localização</b>	
<i>Morro do Camelinho</i>	(Serra do Espinhaço)
<i>Município</i>	Gouveia - MG
<i>Latitude</i>	18° 34' S
<i>Longitude</i>	43° 51' W
<i>Altitude Média</i>	1330 m
<i>Massa específica do ar</i>	1,042 kg/m <sup>3</sup>

FONTE: CEMIG, 1998.

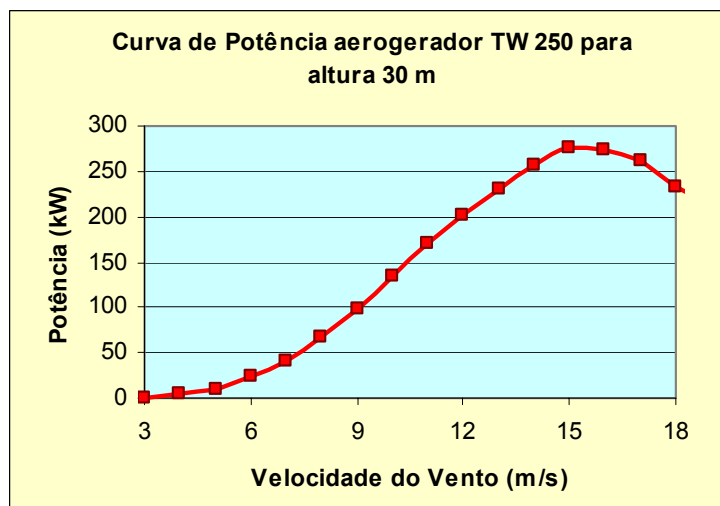
**TABELA 5.2 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA USINA**

<b>Características da Usina</b>	
<i>Potência elétrica Nominal</i>	1 MW – 4 aerogeradores de 250 kW
<i>Produção média de energia</i>	1500 a 1800 MWh/ano (estimado)
<i>Aerogeradores</i>	Modelo TW250 Fabricante: Tacke Windtechnik Potência Nominal: 80 kW (1º Estágio) 250 kW (2º Estágio).
<i>Rotor</i>	Eixo Horizontal com 3 pás Área varrida pelas pás (m <sup>2</sup> ): 530,91 Diâmetro do rotor (m): 26 Altura do cubo: 30 Rotação: 31,5 / 42 rpm Regulação: tipo stall
<i>Velocidade do Vento:</i>	Para potência nominal: 14 m/s Para partida (cut-in): 3 m/s Para parada de emergência: 25 m/s
<i>Coefficiente de Potência</i>	
<i>Máximo</i>	0,39
<i>Médio</i>	0,27
<i>Conexão ao Sistema Elétrico</i>	4 Transformadores elevadores de 380 V p/ 13,8 kV 1 Subestação Elevadora de 13,8 kV p/ 34,5 kV Conexão à LT Paraúna – Gouveia – 34,5 kV (500 m)

Fonte: CEMIG, 1998.

A tabela 5.3 apresenta a curva de potência do aerogerador TW250 e a figura 5.2 a representação gráfica desta curva.

**FIGURA 5.2 – CURVA DE POTÊNCIA DO AEROGERADOR TW 250 NA ALTURA 30 m**



FONTE: CEMIG, 1998.

**TABELA 5.3 – CURVA DE POTÊNCIA AEROGERADOR TW 250 NA ALTURA DE 30 m**

<i>v</i> (m/s)	<i>P</i> (kW)	<i>v</i> (m/s)	<i>P</i> (kW)
3,00	0,50	13,00	231,27
4,00	5,00	14,00	255,74
5,00	9,55	15,00	275,00
6,00	23,37	16,00	273,07
7,00	39,94	17,00	262,07
8,00	67,81	18,00	233,96
9,00	99,45	19,00	215,00
10,00	135,29	20,00	196,45
11,00	170,27	21,00	198,29
12,00	202,02	22,00	205,04

FONTE: CEMIG, 1998.

### 5.1.1.2 Dados de Vento

A Tabela 5.4 apresenta os dados da estação meteorológica Amonnit localizada de forma a não sofrer interferência dos aerogeradores, com sensores para medição de temperatura, pressão atmosférica, velocidade e direção dos ventos nas alturas de 12 e 30 m. A Tabela 5.5 apresenta a distribuição estatística das classes de velocidade medidas sobre as nacelles nos anos de 1996 e 1997 em 4 pontos de medição.

**TABELA 5.4 – CARACTERÍSTICAS DOS VENTOS (MEDIÇÕES EM 1996)**

	$v_{30}$ (m/s)	$v_{12}$ (m/s)	$\alpha$	Calmaria %
Jan	6,05	5,55	0,10	12,7
Fev	5,88	5,40	0,09	19,4
Mar	5,84	5,33	0,10	13,8
Abr	6,81	6,25	0,10	11,1
Mai	5,63	5,15	0,10	17,0
Jun	6,73	6,19	0,10	12,3
Jul	6,26	5,71	0,10	11,8
Ago	7,60	6,99	0,09	6,7
Set	7,81	7,24	0,08	8,2
Out	6,60	6,12	0,08	13,6
Nov	7,38	7,02	0,05	9,6
Dez	5,16	5,01	0,03	20,7
<b>Média</b>	<b>6,48</b>	<b>6,00</b>	<b>0,09</b>	<b>13,1</b>

FONTE: CEMIG, 1998.

Obs:  $v_{30}$  – velocidade do vento a 30 m (m/s)  
Calmaria - % dos períodos com velocidade < 3,5 m/s

$v_{12}$  – velocidade do vento a 20 m (m/s)  
 $\alpha$  – Fator relação velocidade e altura

Considerando as medições apresentadas na Tabela 5.5, os coeficientes  $k$  e  $c$  da função de Weibull calculados através do software ALDA/ALVIM pela CEMIG são respectivamente  $k=2,75$  e  $c=6,5$ .

**TABELA 5.5 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA (%) DAS CLASSES DE VELOCIDADE**

<i>Usina Eólica Morro do Camelinho</i>					
<i>v (m/s)</i>	<i>f(P1) %</i>	<i>f(P2)</i>	<i>f(P3)</i>	<i>f(P4)</i>	<i>Fm/100</i>
4	7,4	5,6	9,5	4,7	0,068
5	22,3	25,2	26,4	24,8	0,247
6	21,8	22,6	23,9	21,5	0,225
7	17,8	18,2	17,2	17,7	0,177
8	13,1	12,1	10,9	12,7	0,122
9	8,8	8,4	6,7	8,6	0,081
10	5	4,5	3,1	5,3	0,045
11	2,4	1,9	1,3	2,6	0,021
12	0,6	0,7	0,5	1,1	0,007
13	0,3	0,3	0,1	0,4	0,003
<b>Vel. Média (m/s)</b>	<b>6,18</b>	<b>6,14</b>	<b>5,69</b>	<b>6,08</b>	<b>6,02</b>

FONTE: CEMIG, 1998.

Obs: v – velocidade do vento (m/s) F(Pi) – Frequência das velocidade no ponto Pi (%)  
Fm – Frequência média nos 4 pontos

### 5.1.1.3 Dados de produção de energia na UEE MC

Na Tabela 5.6 são apresentados os dados de produção de energia elétrica anual da UEE MC durante o período de 1994 a 1997.

**TABELA 5.6 – PRODUÇÃO DE ENERGIA ANUAL NA UEE MC – 4 TURBINAS**

<i>Ano</i>	<i>Energia Produzida (kWh)</i>	<i>Número de horas em que houve geração (NHG)</i>
1994	346.200	7.165
1995	610.600	14.910
1996	799.400	20.859
1997	894.700	23.257
<b>Média</b>	<b>662.700</b>	<b>16.447</b>

FONTE: CEMIG, 1998.

### 5.1.2 Cálculo da Energia Anual Esperada (EAE) na UEE MC

#### 5.1.2.1 Cálculo da EAE com a potência nominal

##### A. Cálculo do Coeficiente de Potência Cp máximo

Pelas equações 4.8, 4.9 e 4.10 e com os dados do aerogerador apresentados na Tabela 5.2, calcula-se o  $C_p$  máximo:

$C_p$	$R$ (m)	$U$ (m/s)	$\omega_t$ (rpm)
0,309	13	14	42

O valor fornecido pelo fabricante foi de 0,39 (CEMIG, 1988). A diferença existente entre o valor calculado e de projeto se deve ao fato de que o  $C_p$  depende da forma (aerodinâmica) das pás e a Equação 4.9 provavelmente foi ajustada para um determinado perfil levemente diferente daquele instalado na UEE MC.

### B. Cálculo da máxima energia disponível

A máxima energia disponível anualmente ( $E_{ea}$ ) é a energia resultante do funcionamento do aerogerador na potência nominal 250 kW (reduzida para 211 kW devido à correção pela relação entre massa específica do ar no local e a massa específica padrão) durante todo o ano, ou seja, é o produto da potência pelo número de horas do ano (8760). Isso só seria possível se a velocidade do vento fosse igual ou superior à velocidade para a potência nominal durante todo o ano. No caso da UEE MC, essa é de 14 m/s. Considerando o rendimento da caixa de multiplicação  $\eta_m=0,95$  e o rendimento do gerador  $\eta_g=0,95$ , para uma disponibilidade de 95% a energia máxima por aerogerador e total será:

$E_{ea}$	$E_{ea( total)}$
<b>1.584 MWh</b>	<b>6.336 MWh</b>

#### 5.1.2.2 Cálculo da EAE com a curva de distribuição de frequência das velocidades do vento observadas

A energia anual esperada para cada aerogerador é determinada através da seqüência de cálculos apresentada a seguir:

1. Utilizando os dados de frequência (coluna [2]) para as classes de velocidade (coluna [1]) apresentadas na Tabela 5.7 calcula-se a frequência em horas apresentada na coluna [3] multiplicando-se a coluna [2] por 8.760 (número de horas do ano);
2. A potência elétrica ( $P_e$ ) coluna [4], que corresponde à potência do vento “aproveitada” pelo aerogerador foi obtida da curva de potência (fornecida pelo



fabricante – Tabela 5.3) para as diferentes velocidades do vento. Esta curva foi obtida com a massa específica do ar padrão (no nível do mar à temperatura de 15° C) que tem o valor de 1,235 kg/m<sup>3</sup>. Vale ressaltar que a  $P_e$  é limitada pela potência nominal do aerogerador.

3. O valor da energia esperada ( $E_e$ ) – coluna [5] – é calculado multiplicando-se a potência elétrica – coluna [4] – pelo número de horas ou frequência relativa da coluna [3].
4. A potência elétrica corrigida ( $P_c$ ) – coluna [6] – é obtida pela multiplicação da potência elétrica (coluna [4]) pela relação entre a massa específica local e a massa específica padrão.
5. O valor da energia esperada ( $E_{ec}$ ) – coluna [7] – é calculado multiplicando-se a potência corrigida – coluna [6] – pelo número de horas ou frequência relativa da coluna [3].
6. O somatório dos valores da coluna [5] representa a energia total esperada  $E_{ea (total)}$  em kWh durante o ano.
7. O somatório dos valores da coluna [7] representa a energia total esperada corrigida  $E_{ec (total)}$  em kWh durante o ano.
8. O somatório da coluna [3] representa o número de horas em que o aerogerador poderá funcionar na faixa da velocidade de partida até a velocidade de corte.
9. O fator de capacidade (FC) é obtido pela relação entre a potência média e a potência nominal.
10. O valor da potência média é o quociente da divisão da  $E_{ea}$  e  $E_{ca}$  pelo número de horas anuais com velocidade compatível para geração de energia ( $\Sigma$  da coluna [3]).
11. A utilização anual da potência instalada (UAP), em horas, é calculada pela divisão da  $E_{ea}$  e  $E_{ca}$  pela potência nominal. Dependendo das condições do vento local, é comum obter-se para UAP valores da ordem de 2000 a 3500 horas (CASTRO, 1998).

A energia anual esperada fornecida pelo fabricante é de 1500 a 1800 MWh/ano.. O valor calculado (1520 kWh/ano) está na faixa prevista. A curva de potência fornecida pelo fabricante considera a massa específica do ar padrão de 1,235 kg/m<sup>3</sup>. Para o cálculo de energia apresentado na Tabela 5.7, corrigiu-se a potência utilizando-se o

valor da massa específica do ar do local ( $1,042 \text{ kg/m}^3$ ) o que ocasionou a redução da potência e da energia prevista em 15,6 % (1283 kWh/ano).

O fator de capacidade mede o desempenho de uma usina no aspecto energético. Ele pode ser definido como a relação entre a potência média e a potência máxima de uma usina. Este parâmetro é bastante utilizado no setor elétrico para análise das usinas. As usinas de base têm usualmente fatores de capacidade elevados, enquanto as usinas de ponta apresentam fatores de capacidade mais baixos. O valor obtido para a UEE MC com a distribuição de frequência foi de **0,17**, que é inferior ao valor típico (0,30) esperado para as turbinas eólicas modernas.

**TABELA 5.7 – CÁLCULO DA ENERGIA ANUAL ESPERADA COM A FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA VELOCIDADES OBSERVADA**

[1] V(m/s)	[2] fm	[3] fr(h)	[4] Pe (kW)	[5] Ec (kWh)	[6] Pc (kW)	[7] Ee (kWh)	[8] Uap(h)
3	0,003	26,28	2,00	53	1,7	44	k
4	0,0680	596	5,00	2.978	4,2	2.514	
5	0,2470	2.164	9,55	20.664	8,1	17.440	
6	0,2250	1.971	23,37	46.062	19,7	38877	
7	0,1770	1.551	39,94	61.928	33,7	52.267	
8	0,1220	1.069	67,81	72.470	57,2	61.165	
9	0,0810	710	99,45	70.566	83,9	59.557	
10	0,0450	394	135,29	53.331	114	45.012	
11	0,0210	184	170,27	31.323	144	26.437	
12	0,0070	61	202,02	12.388	171	10.455	
13	0,0030	26	231,27	6.078	195	5.130	
14	0,0010	9	255,74	2.240	216	1.891	
<b>Tot / méd.</b>	<b>1,0000</b>	<b>8.760</b>	<b>43,4</b>	<b>380.080</b>	<b>36,6</b>	<b>320.788</b>	<b>1520</b>
			<b>0,20</b>	<b>1.520.321</b>	<b>0,17</b>	<b>1.283.151</b>	
<b>Ee<sub>final</sub></b>				<b>1.302.915</b>		<b>1.099.660</b>	
<b>RESUMO DOS RESULTADOS</b>							
<b>Ee (MWh)</b>	<b>Potência Média (kW)</b>	<b>Fator de Capacidade</b>	<b>Número de turbinas</b>		<b>UAP (horas)</b>		
1.520	43,4	0,20	4		1801		
<b>Ec(MWh)</b>	<b>Potência Média Corrigida</b>	<b>Fator de Capacidade</b>	<b>Número de turbinas</b>		<b>UAP (horas)</b>		
1.283	36,6	0,17	4		1520		

OBS: Fm = Freq. média nos 4 pontos/ Fr = Freq média em h/ Pe = Pot. Elétrica curva do fabricante / Pc =Pot. Corrigida pela densidade do ar local Ee = Energia elétrica Ec= Energia calculada com a potência corrigida Eefinal = Energia considerando o rendimento do gerador (0,95), rendimento da caixa multiplicadora (0,95) e disponibilidade de 95%.

### 5.1.2.3 Cálculo da EAE com a curva de freqüência das velocidades ajustada com a distribuição de Weibull para $k=2,75$ e $c=6,5$

Inicialmente ajustou-se a distribuição Weibull determinando-se a função densidade de probabilidade  $f(u)$  que é dada pela Equação 4.3 através da função  $Weibull(v,k,c)$  do Microsoft Excel, onde  $v$  é a velocidade do vento e  $k$  e  $c$  são respectivamente os parâmetros de forma e de escala obtidos do relatório da CEMIG ( $k=2,75$  e  $c=6,5$ ). Os cálculos energéticos efetuados com a freqüência das velocidades ajustada com a distribuição de Weibull seguiram a mesma seqüência descritos no item 5.1.2.2. A Tabela 5.8 mostra os resultados obtidos nessa etapa da simulação.

Na seqüência ajustou-se a função densidade de probabilidade de Rayleigh (caso particular da Weibull) que é obtida adotando-se  $k=2$ , e  $c$  é calculado pela Equação 4.6 com  $u_{ma}$ = velocidade média. A distribuição de Rayleigh é útil quando não se tem a série que gerou a velocidade média e conseqüentemente não se conhece o valor do desvio padrão que é necessário para a obtenção dos parâmetros  $k$  e  $c$  da função Weibull.

Os cálculos energéticos efetuados com a freqüência das velocidades ajustada com a distribuição de Rayleigh ( $k=2$  e  $u_{ma}=6,5$  m/s) seguiram a mesma seqüência descrita no item 5.1.2.2 e o resumo dos resultados está apresentado na Tabela 5.9.

**TABELA 5.8 – ENERGIA ANUAL ESPERADA COM DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES WEIBULL**

<i>Morro Camelinho - Weibull k=2,75 c=6,5</i>			<i>H=30m</i>		$\rho = 1,042 \text{ kg/m}^3$
<i>V(m/s)</i>	<i>f</i>	<i>f(h)</i>	<i>Pc(kW)</i>	<i>Ee (kWh)</i>	<i>Uap(h)</i>
2,5	0,1021	894	0,8	755	
3	0,1148	1005	1,7	1697	
4	0,1297	1136	4,2	4793	
5	0,1310	1147	8,1	9248	
6	0,1211	1061	19,7	20932	
7	0,1039	910	33,7	30682	
8	0,0833	729	57,2	41741	
9	0,0626	549	83,9	46056	
10	0,0444	389	114	44402	
11	0,0297	260	144	37394	
12	0,0188	165	171	28082	
13	0,0113	99	195	19272	
14	0,0064	56	216	12113	
15	0,0035	30,3	232	7025	
16	0,0018	15,5	230	3573	
17	0,0009	7,5	221	1668	
18	0,0004	3,5	197	689	
19	0,0002	1,5	181	278	
<b>Total/Méd</b>	<b>0,9656</b>	<b>8459</b>	<b>36,7</b>	<b>310400</b>	<b>1471</b>
			<b>0,17</b>	<b>1241599</b>	
<b>RESUMO DOS RESULTADOS</b>					
<i>Ec(MWh)</i>	<i>Potência Média Corrigida</i>	<i>Fator de Capacidade</i>	<i>Número de turbinas</i>	<i>UAP (horas)</i>	
1.242	36,7	0,17	4	1.242	

**TABELA 5.9 – ENERGIA ANUAL ESPERADA COM DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES RAYLEIGH**

<i>Morro Camelinho – Rayleigh k=2, u=6,5m/s</i>				<i>H=30m</i>	<i><math>\rho=1,042 \text{ kg/m}^3</math></i>
<i>v(m/s)</i>	<i>f</i>	<i>f(h)</i>	<i>Pc(kW)</i>	<i>Ee (kWh)</i>	<i>Uap(h)</i>
2,5	0,0828	725	0,8	612	
3	0,0944	827	1,7	1395	
4	0,1105	968	4,2	4083	
5	0,1168	1023	8,1	8247	
6	0,1142	1001	19,7	19738	
7	0,1047	917	33,7	30907	
8	0,0905	793	57,2	45377	
9	0,0742	650	83,9	54583	
10	0,0579	508	114	57954	
11	0,0431	378	144	54301	
12	0,0307	269	171	45832	
13	0,0209	183	195	35713	
14	0,0136	119	216	25746	
15	0,0085	74,5	232	17302	
16	0,0051	44,7	230	10299	
17	0,0029	25,7	221	5686	
18	0,0016	14,2	197	2804	
19	0,0009	7,5	181	1367	
<b>Total/média</b>	<b>0,9733</b>	<b>8526</b>	<b>49,5</b>	<b>421947</b>	<b>2000</b>
			<b>0,23</b>	<b>1687788</b>	

<b>RESUMO DOS RESULTADOS</b>				
<b>Ec(MWh)</b>	<b>Potência Média Corrigida (kW)</b>	<b>Fator de Capacidade</b>	<b>Número de Turbinas</b>	<b>UAP (horas)</b>
1688	49,5	0,23	5	1688

**TABELA 5.10 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PARA AS DIFERENTES DISTRIBUIÇÕES DE FREQUÊNCIA DAS VELOCIDADES CONSIDERADAS**

<i>Distribuição de Frequência de velocidade.</i>	<i>Ee (MWh)/ano</i>	<i>Diferença em relação a freq. Obs. (%)</i>	<i>Utilização anual da potência instalada (h)</i>	<i>FC</i>
<i>Observada</i>	1283		1520	0,17
<i>Weibull (k=2,75 e c=6,5)</i>	1242	- 3,2 %	1471	0,17
<i>Rayleigh (k=2,00 e u=6,5 m/s)</i>	1688	31,5	2000	0,23

Comparando-se o valor da energia esperada (Tabela 5.8) – calculado utilizando-se a distribuição de velocidades observada no item 5.1.2.2. (1283 MWh/ano), com o valor calculado adotando-se a distribuição *Weibull* de freqüências de velocidades – percebe-se uma diferença de – **3,2 %** demonstrando que esta distribuição se ajusta bem às velocidades de vento observadas. Comparando-se a energia obtida utilizando a distribuição de Rayleigh para  $k=2$  e velocidade média  $u_{ma}=6,5$  m/s, obtém-se um valor de energia **31,5 %** superior ao valor encontrado com a freqüência observada, demonstrando que esta distribuição superestima o comportamento das velocidades do vento neste local. Essas comparações permitem concluir que, para uma avaliação precisa do potencial eólico de um determinado sítio é muito importante a utilização de dados observados, pois dependendo da distribuição ajustada pode-se subavaliar ou superavaliar o valor da energia esperada.

#### 5.1.2.4 Cálculo do índice de disponibilidade

O índice de disponibilidade (Tabela 5.11) é obtido pela relação entre o número de horas em que efetivamente houve geração pelo número de horas em que a máquina esteve disponível para a geração durante o ano (8760 h).

**TABELA 5.11 – ÍNDICE DE DISPONIBILIDADE E FATOR DE CAPACIDADE OBSERVADOS.**

<i>Ano</i>	<i>Energia Produzida (MWh) – 4 un.</i>	<i>Índice de disponibilidade (%)</i>	<i>NHG (h) – 4 un.</i>	<i>Potência média (kW)</i>	<i>FC</i>
1994	346,2	20,44	7.165	48,3	0,229
1995	610,6	42,55	14.910	41,0	0,194
1996	799,4	59,52	20.859	38,3	0,182
1997	894,7	66,37	23.257	38,5	0,182
<b>Total/Média</b>	<b>2.650,9</b>	<b>47,22</b>	<b>66.191</b>	<b>41,5</b>	<b>0,197</b>

O índice médio de disponibilidade observado (**47,22%**) foi muito pequeno em relação ao esperado (95%) e mostra que a usina esteve em operação durante o ano menos que 50% do tempo (Tabela 5.11). O fator de capacidade (**0,197**) foi também muito inferior ao esperado (~0,33), correspondendo a 50 % da capacidade esperada do aerogerador na conversão da energia cinética do vento em energia elétrica. Salienta –

se porém que esse valor é próximo dos FC calculados com a curva de frequência observada e com a distribuição de frequência de velocidade de Weibull (0,17).

## 5.2 AVALIAÇÃO DA UEE DE PALMAS – PR

### FIGURA 5.3 - PARQUE EÓLICO DE PALMAS – PR



FONTE: SCHULTZ, 2002.

A usina (Figura 5.3) situa-se no km 26 da PR-280, nos campos de Palmas a cerca de 320 km de Curitiba e 30 km da sede do município de Palmas, no sul do estado do Paraná próximo à divisa com o Estado de Santa Catarina (Latitude 26° 38' S e Longitude 51° 45' W).

O relevo da região é classificado como planalto com ondulações suaves com altitude entre 1200 e 1350 m do nível do mar, onde predominam uma vegetação de campos com poucos capões de mato.

Como a principal atividade da região é a pecuária e a utilização dos campos é para pastagens, a implantação da usina teve um efeito praticamente desprezível.

A capacidade instalada da usina é de 2.500 kW, composta por 5 aerogeradores ENERCON modelo E-40, fabricados pela empresa ENERCON da Alemanha.

O custo de implantação da usina ficou em torno de US\$ 3.000.000,00 sendo 30% assumido pela COPEL e 70% pela empresa privada Wobben Windpower Ind. e Com. Ltda com sede em Campinas – SP. Toda energia gerada é comprada pela COPEL e disponibilizada diretamente no sistema de distribuição da empresa (COPEL, 2005)

## 5.2.1 Dados de entrada

### 5.2.1.1 Dados da Usina

Os dados de entrada utilizados nesta simulação foram obtidos de diversas fontes. Os dados de vento são do projeto VENTAR (COPEL, 1993) e do SIMEPAR, a produção anual da UEE foi obtida na área de comercialização de energia que compra toda a energia produzida na usina e os dados técnicos dos aerogeradores/turbinas foram obtidos de catálogos do fabricante dos equipamentos ENERCON. As Tabelas 5.12 e 5.13 apresentam as informações de localização e dados técnicos do projeto da UEE-MC.

**TABELA 5.12 – LOCALIZAÇÃO DA UEE PALMAS**

<i>Localização</i>	
<i>Município</i>	Palmas - PR
<i>Latitude / Longitude</i>	26° 38' S / 51° 45' W
<i>Altitude Média</i>	1314 m
<i>Massa específica do ar</i>	1,078 kg/m <sup>3</sup>

FONTE: COPEL, 2005.

**TABELA 5.13 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA USINA**

<i>Potência elétrica Nominal</i>	2,5 MW – 5 aerogeradores de 500 kW
<i>Produção média de energia</i>	4.200.000a 5.800.000 MWh/ano (estimado)
<i>Aerogeradores</i>	Modelo ENERCON-40 Fabricante: WOBLEN Potência Nominal: 500 kW
<i>Rotor</i>	Eixo Horizontal com 3 pás Área varrida pelas pás (m <sup>2</sup> ): 1257 Diâmetro do rotor (m): 40,3 Altura do cubo: 44 Rotação: 18 a 38 rpm Regulação : tipo <i>pitch</i>
<i>Velocidade do Vento:</i>	Para potência nominal: 12 m/s Para Partida (cut-in): 2,5 m/s Para parada de emergência: 25 m/s
<i>Coefficiente de Potência máx</i>	0,42
<i>Conexão ao Sistema Elétrico</i>	5 Transformadores de 400 V p/ 34,5 kV Conexão à LT 34,5 kV (37 km)

FONTE: COPEL e WOBLEN, 2005



A Tabela 5.14 apresenta os dados da curva de potência do aerogerador E-40 de 500 kWh. Essa tabela foi extraída do catálogo “*Windkraftanlagen Windturbinen, 1997*” que descreve as características de vários tipos de aerogeradores existentes no mercado.

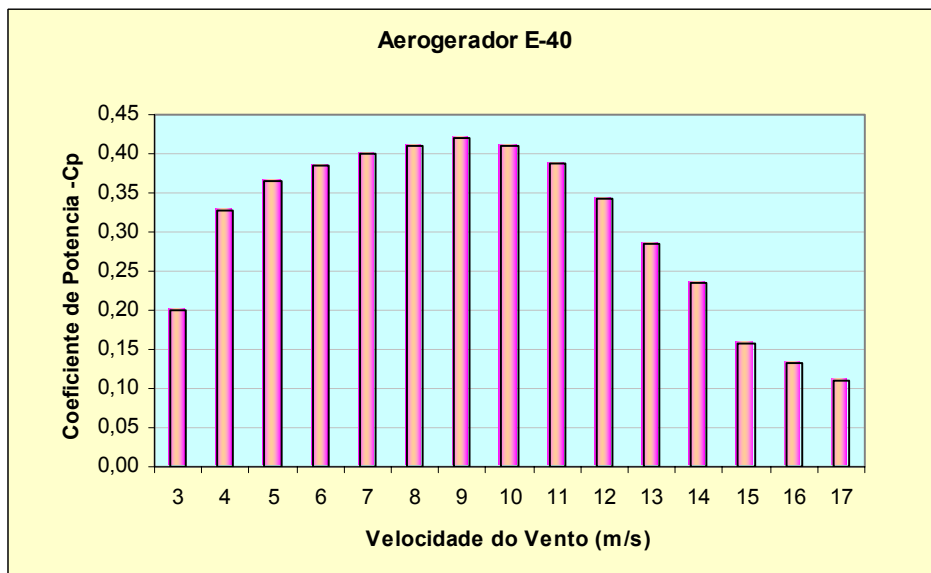
**TABELA 5.14 – VELOCIDADE DO VENTO X POTÊNCIA X COEFICIENTE DE POTÊNCIA X PARA AEROGERADOR E-40**

<i>v</i> (m/s)	<i>P</i> (kW)	<i>C<sub>p</sub></i>		<i>v</i> (m/s)	<i>P</i> (kW)	<i>C<sub>p</sub></i>		<i>v</i> (m/s)	<i>P</i> (kW)	<i>C<sub>p</sub></i>
3,0	4,2	0,200		9,0	234,8	0,419		15,0	503,2	0,192
3,5	9,1	0,276		9,5	277,0	0,414		15,5	504,3	0,174
4,0	16,3	0,328		10,0	322,4	0,410		16,0	504,1	0,157
4,5	25,7	0,356		10,5	364,6	0,399		16,5	504,6	0,145
5,0	36,4	0,365		11,0	403,0	0,388		17,0	504,5	0,132
5,5	50,6	0,383		11,5	434,5	0,367		17,5	504,5	0,121
6,0	65,6	0,385		12,0	461,8	0,343		18,0	503,9	0,111
6,5	84,6	0,392		12,5	482,8	0,318		18,5	504,8	0,102
7,0	107,7	0,400		13,0	490,9	0,286		19,0	505,2	0,095
7,5	132,6	0,405		13,5	496,4	0,259		19,5	505,1	0,087
8,0	162,2	0,409		14,0	500,6	0,235		19,9	505,0	0,082
8,5	197,2	0,415		14,5	502,7	0,212				

FONTE: *WINDKRAFTANLAGEN WINDTURBINES, 1997*.

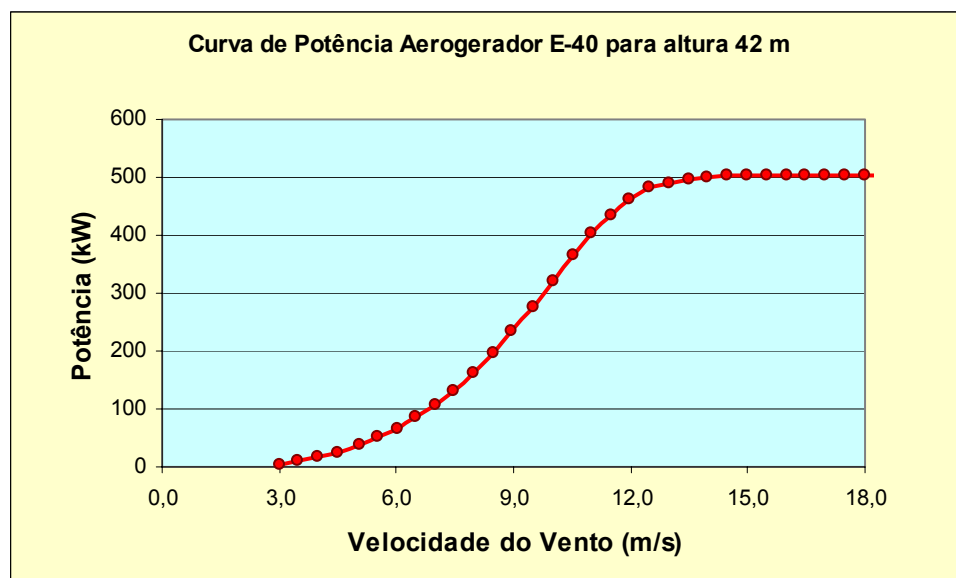
As Figuras 5.4 e 5.5 são as representações gráficas das curvas de potência e de coeficientes de potência.

**FIGURA 5.4 – CURVA DE COEFICIENTE DE POTÊNCIA PARA O AEROGERADOR E-40 (500 KW)**



FONTE: WINDKRAFTANLAGEN WINDTURBINES, 1997.

**FIGURA 5.5 – CURVA DE POTÊNCIA PARA O AEROGERADOR E-40 (500 KW)**



FONTE: WINDKRAFTANLAGEN WINDTURBINES, 1997.

### 5.2.1.2 Dados de Vento

A velocidade média do vento medida a 18 m no período de 1995 a 1998 é de 6,5 m/s. Para extrapolar a velocidade para 44 m, que é a altura em que está instalado o rotor utilizou-se a Equação 4.1, com  $\alpha = 0,13$  (grama baixa), assim tem-se :

$$V_{44} = V_{18} \left[ \frac{44}{18} \right]^{0,13} = 7,60 \text{ m/s}$$

Como não se teve acesso aos dados de frequência da ocorrência das velocidades de vento medidas, ajustou-se a distribuição de Weibull para  $k=2,75$  e uma  $= 7,6$  m/s, que foram os valores obtidos pela CEMIG para a UEE MC (CEMIG, 1998).

### 5.2.1.3 Dados de produção de energia na UEE Palmas

Nas tabelas 5.15, 5.16 e 5.17 são apresentados os dados de produção de energia elétrica anual da UEE Palmas durante o período de 1999 a 2004.

**TABELA 5.15 – PRODUÇÃO DE ENERGIA ANUAL NA UEE PALMAS**

<b>Ano</b>	<b>Energia Produzida (kWh)</b>
1999	4.244.358
2000	4.771.692
2001	4.819.282
2002	5.178.862
2003	4.651.303
2004	4.774.200
<b>Média</b>	<b>4.739.950</b>

Fonte: COPEL, 2005.

**TABELA 5.16 – PRODUÇÃO DE ENERGIA EM PALMAS EM MWH**

<i>UEE PALMAS – PRODUÇÃO DE ENERGIA (MWh)</i>													
<i>Ano</i>	<i>J</i>	<i>F</i>	<i>M</i>	<i>A</i>	<i>M</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>A</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>Acum.</i>
1999		170	277	252	369	222	454	552	517	468	485	478	<b>4.244</b>
2000	338	290	489	307	454	510	433	388	539	398	326	301	<b>4.772</b>
2001	351	232	213	411	349	431	578	522	671	353	401	309	<b>4.819</b>
2002	418	282	311	364	501	369	432	591	482	493	540	397	<b>5.179</b>
2003	355	247	306	344	498	240	492	410	375	418	417	549	<b>4.651</b>
2004	279	294	276	310	384	406	640	442	413	493	428	410	<b>4.774</b>

FONTE: COPEL, 2005.

**TABELA 5.17 – POTÊNCIA MÉDIA OBSERVADA EM PALMAS EM KW MÉDIO**

<i>UEE PALMAS – PRODUÇÃO DE ENERGIA (kW médio)</i>													
<i>Ano</i>	<i>J</i>	<i>F</i>	<i>M</i>	<i>A</i>	<i>M</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>A</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>Acum.</i>
1999		47	77	70	103	62	126	153	144	130	135	133	107
2000	94	81	136	85	126	142	120	108	150	111	90	84	110
2001	97	64	59	114	97	120	160	145	186	98	111	86	112
2002	116	78	86	101	139	102	120	164	134	137	150	110	120
2003	99	69	85	96	138	67	137	114	104	116	116	152	108
2004	78	82	77	86	107	113	178	123	115	137	119	114	111
1999	97	75	89	96	121	109	143	131	138	120	117	109	112
<b>FC</b>	<b>0,19</b>	<b>0,15</b>	<b>0,18</b>	<b>0,19</b>	<b>0,24</b>	<b>0,22</b>	<b>0,29</b>	<b>0,26</b>	<b>0,28</b>	<b>0,24</b>	<b>0,23</b>	<b>0,22</b>	<b>0,22</b>

FONTE: COPEL, 2005.

## **5.2.2 Cálculo da Energia Anual Esperada (EAE) na UEE Palmas**

### **5.2.2.1 Cálculo da EAE com a potência nominal ( $E_{ea}$ )**

#### **A. Cálculo da máxima energia disponível**

A máxima energia disponível anualmente ( $E_{ea}$ ) é a energia resultante do funcionamento do aerogerador na potência nominal durante todo o ano, ou seja, é o produto da potência pelo número de horas do ano (8.760). Isso só seria possível se a velocidade do vento fosse igual ou superior à velocidade para a potência nominal durante todo o ano que no caso da UEE Palmas é 12 m/s.

Os geradores da UEE Palmas são de baixa rotação, por esse motivo não possuem caixa multiplicadora e o rendimento do gerador pode ser considerado como  $\eta_g=0,90$ . Para uma disponibilidade de 95% a energia máxima por aerogerador e total (5 unidades) será:

$E_{ea/un.}$	<b>3.437.424 kWh/ano</b>
$E_{ea - 5 un.}$	<b>17.187.120 kWh/ano</b>

### 5.2.2.2 Cálculo da EAE com a curva de distribuição de frequência das velocidades Weibull para $k=2,75$ e $u_{ma} = 7,3$ m/s

Inicialmente ajustou-se a distribuição Weibull determinando-se a função densidade de probabilidade  $f(u)$  (Tabela 5.18) que é dada pela Equação 4.3 através da função *Weibull(v,k,c,falso)* do Microsoft Excel, onde  $v$  é a velocidade do vento e  $k$  e  $c$  são respectivamente os parâmetros de forma e de escala. Como não se dispunha da série de medições de velocidade que geraram as velocidades médias do projeto VENTAR, e tão pouco o desvio padrão da amostra, optou-se por adotar o mesmo fator de forma estabelecido para a localidade da UEE MC ( $k=2,75$ ). Com a velocidade média  $u_{ma}$  foi calculado o fator de escala  $c$  pela equação 4.6 utilizando-se a função *Lngama(x)* do Microsoft Excel.

Os cálculos energéticos efetuados com a frequência das velocidades ajustada com a distribuição de Weibull seguiram a mesma seqüência descrita no item 5.1.2.2. A Tabela 5.18 mostra os resultados obtidos nessa etapa da simulação e o resumo dos resultados é mostrado na Tabela 5.20.

**TABELA 5.18 – ENERGIA ANUAL ESPERADA COM DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES WEIBULL**

<i>Palmas – Weibull, <math>k=2,75</math> e <math>u_{ma}=7,6\text{m/s}</math></i>				<i>H=44 m</i>	<i>c=8,5</i>	<i><math>\rho=1,078 \text{ kg/m}^3</math></i>
<i>v(m/s)</i>	<i>f</i>	<i>f(h)</i>	<i>Pe (kW)</i>	<i>Pc (kW)</i>	<i>Ec (kWh)</i>	<i>Uap(h)</i>
2	0,0249	218	2,1	1,8	400	
3	0,0488	427	4,2	3,7	1.567	
4	0,0754	661	16,3	14,2	9.400	
5	0,1003	879	36,4	31,8	27.921	
6	0,1189	1.041	65,6	57,3	59.627	
7	0,1275	1.116	107,7	94,0	104.973	
8	0,1245	1.091	162,2	142	154.488	
9	0,1112	974	234,8	205	199.656	
10	0,0907	794	322,4	281	223.605	
11	0,0675	591	403	352	207.974	
12	0,0457	400	461,8	403	161.373	
13	0,0281	246	490,9	429	105.384	
14	0,0156	137	500,6	437	59.690	
15	0,0078	68	503,2	439	30.019	
16	0,0035	31	504,1	440	13.499	
17	0,0014	12,3	504,5	440	5.419	
18	0,0005	4,4	503,9	440	1.932	
19	0,0002	1,4	505,2	441	613	
20	0,00004	0,4	505	441	171	
<b>Total/Média</b>	<b>0,9924</b>	<b>8.693</b>		<b>157</b>	<b>1.367.710</b>	<b>3.137</b>
				<b>0,36</b>	<b>6.838.550</b>	
<b>RESUMO DOS RESULTADOS</b>						
<b>Ec ( MWh)</b>	<b>Fator de Capacidade</b>	<b>Número de turbinas</b>	<b>Potência média (kW)</b>		<b>Uap (horas)</b>	
6.839	0,36	5	157		3137	

Na seqüência, foi calculada a energia anual esperada ( $E_c$ ) utilizando-se a distribuição Rayleigh com  $k=2$  e  $u_{ma}= 7,6 \text{ m/s}$  conforme mostrado na Tabela 5.19.

**TABELA 5.19 – ENERGIA ANUAL ESPERADA COM DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES RAYLEIGH**

<i>PALMAS – Rayleigh, <math>k=2</math> e <math>u_{ma}=7,6</math> m/s</i>			<i><math>c=8,6</math></i>	<i><math>H=44</math> m</i>	<i><math>\rho=1,078</math> kg/m<sup>3</sup></i>
<i>v(m/s)</i>	<i>f</i>	<i>f(h)</i>	<i>Pc (kW)</i>	<i>Ec (kWh)</i>	<i>Uap(h)</i>
2	0,0515	451	1,8	827	
3	0,0722	632	3,7	2.319	
4	0,0875	767	14,2	10.909	
5	0,0968	848	31,8	26.943	
6	0,1000	876	57,3	50.173	
7	0,0978	857	94,0	80.531	
8	0,0911	798	142	113.034	
9	0,0814	713	205	146.089	
10	0,0698	612	281	172.135	
11	0,0577	506	352	177.893	
12	0,0461	403	403	162.657	
13	0,0355	311	429	133.334	
14	0,0265	232	437	101.433	
15	0,0191	168	439	73.644	
16	0,0134	117	440	51.627	
17	0,0091	79,6	440	35.049	
18	0,0060	52,4	440	23.030	
19	0,0038	33,4	441	14.736	
20	0,00236	20,7	441	9.124	
<b>Total/Média</b>	<b>0,9676</b>	<b>8.477</b>	<b>163</b>	<b>1.385.485</b>	<b>3.178</b>
			<b>0,37</b>	<b>6.927.424</b>	
<b>RESUMO DOS RESULTADOS</b>					
<b>Ec ( MWh)</b>	<b>Fator de Capacidade</b>	<b>Número de turbinas</b>	<b>Potência média (kW)</b>	<b>Uap (horas)</b>	
6927	0,37	5	163	3178	

Os valores de  $E_e$  total, UAP e potência foram calculados conforme descrição apresentada no item 5.1.2.2. A tabela 5.20 apresenta o resultado dos cálculos de energia esperada utilizando as duas distribuições de frequência de velocidade podendo-se perceber a proximidade dos resultados.

**TABELA 5.20 – RESUMO DAS  $E_c$  PARA DIFERENTES DISTRIBUIÇÕES DE FREQUÊNCIA**

<i>Distribuição de velocidade</i>	<i><math>E_c</math> (MWh)</i>	<i>Fator de Capacidade</i>	<i>Potência média (kW) (1 turbina)</i>	<i>Utilização anual da potência (h)</i>
<i>Weibull, <math>k=2,75</math> e <math>u_{ma}=7,6</math>m/s</i>	6.839	0,36	157	3137
<i>Rayleigh, <math>k=2</math> e <math>u_{ma}=7,6</math> m/s</i>	6.927	0,37	163	3178

Obs. Considerou-se 5 turbinas

O fator de capacidade mede o desempenho de uma usina no aspecto energético. O valor obtido para a UEE Palmas para as distribuições de frequência de velocidades adotadas foi de **0,36** que é compatível com os valores apresentados pelas turbinas eólicas modernas.

Como para a UEE Palmas não se teve acesso à informação da quantidade de horas em que houve geração para cada ano, não foi possível a avaliação do índice de disponibilidade apresentado pela usina.

Considerando a  $E_{ea}$  de **17.187.120 kWh**, calculando-se a relação entre a produção anual observada da usina (kWh) e a energia esperada anualmente ( $E_c$ ) obtém-se uma avaliação do fator de capacidade médio observado na usina durante o período de 1999 a 2004 (Tabela 5.21).

**TABELA 5.21 – AVALIAÇÃO DO FATOR DE CAPACIDADE DA UEE PALMAS**

<i>Ano</i>	<i>Energia Produzida (kWh)</i>	<i>Fator de capacidade</i>
1999	4.244.358	0,247
2000	4.771.692	0,278
2001	4.819.282	0,280
2002	5.178.862	0,301
2003	4.651.303	0,271
2004	4.774.200	0,278
<b>Média</b>	<b>4.739.950</b>	<b>0,276</b>



O valor médio do fator de capacidade obtido para os seis anos de operação da usina foi de 0,28 demonstrando que o desempenho da usina está um pouco pior do que o esperado (30 – 36%).

### **5.3 POTENCIAL DE IMPLANTAÇÃO DE USINAS DE PORTE SEMELHANTE NO PARANÁ**

#### **5.3.1 Dados de Entrada**

Para 4 estações do estado do Paraná selecionadas do projeto VENTAR – **Santo André (SA), Palmas (PL), Morro Perdidos (MP) e Ilha do Mel (IM)** – foi simulada a implantação de uma usina com as características da UEE Morro do Camelinho e uma segunda usina com as características da UEE de Palmas (COPEL, 1996). Com estas simulações pretende-se calcular o potencial eólico estimado nestes locais e também comparar as opções entre si, destacando as vantagens e desvantagens relativas.

Para ser possível a comparação do potencial eólico de locais diferentes deve-se determinar a velocidade para uma mesma altura de medição. Para se converter medições feitas em uma determinada altura para uma altura de referência utilizou-se a Equação 4.1. Foram adotadas como referência 4 alturas de rotor, 30 m (referente à UEE MC), 44 m (referente à UEE Palmas) e 65 (altura máxima, informada pelo fabricante) para o modelo de turbina instalado em Palmas e 100m (altura em que estão sendo investigadas velocidades do vento no sítio da UEE Palmas). (Anexo II – Ficha técnica E-40). Para o cálculo da potência disponível em cada local é necessário conhecer-se a massa específica do ar. A massa específica do ar das estações localizadas no Paraná foram calculadas com os dados de altitude, temperatura e pressão fornecidos pelo SIMEPAR (cálculo no Apêndice I). Os resultados para os 5 locais de estudo estão na Tabela 5.22.

**TABELA 5.22 – DADOS OBTIDOS E CALCULADOS PARA OS 5 LOCAIS DE ESTUDO**

<i>Dados obtidos e calculados para os locais de estudo</i>					
	<i>Morro do Camelinho</i>	<i>Santo André</i>	<i>Ilha do Mel</i>	<i>Palmas</i>	<i>Morro Perdidos</i>
<i>Velocidade Média (m/s)<sup>1</sup></i>	6,5	6,9	4,6	6,7	7,3
<i>Massa específica do Ar (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1,042	1,089	1,254	1,078	1,031
<i>Altitude (m)</i>	1328	1200	58	1314	1450
<i>Altura medição (m)</i>	30	55	20	18	20
<i>V<sub>30</sub> (m/s)</i>	6,5	3,8	4,9	7,2	7,6
<i>V<sub>44</sub> (m/s)</i>	6,7	5,5	5,2	7,6	8,0
<i>V<sub>65</sub> (m/s)</i>	6,9	8,2	5,5	8,1	8,5

<sup>1</sup> Velocidade média do vento no período 1993 a 1995

Segundo Castro (1998), locais com velocidade média anual inferior a 5 m/s não são interessantes para produção de energia comercialmente. Em Santo André e Ilha do Mel para a altura de 30 m as velocidades médias são inferiores a 5 m/s, portanto nesses locais não seria viável a instalação de turbinas eólicas nesta altura o que levou a não consideração desses dois locais na simulação 1. Para as alturas de 44, 65 e 100 m, as velocidades já ultrapassam esse patamar, tornando-se interessante a pesquisa do potencial eólico destes sítios para tais alturas.

### **5.3.2 Cálculo da potência e energia esperada**

Utilizando a velocidade média do vento, nas 5 localidades de estudo nas alturas de 30 m (H1), 44 m (H2) e 65 m (H3) e o fator de forma (k=2) ajustou-se a distribuição de frequência de Weibull/Rayleigh. Em seguida foram simulados o cálculo da potência, energia e disponibilidade para uma turbina eólica (TE1) com as características da UEE mineira. Os cálculos foram repetidos simulando-se também a instalação de uma turbina eólica com as características da instalada em Palmas (TE2) para as mesmas alturas e correspondentes velocidades. Os dados das dimensões físicas e características das turbinas e torres utilizadas nas simulações são apresentados nas Tabelas 5.23 e 5.24.

**TABELA 5.23 – CARACTERÍSTICAS DAS TURBINAS**

<b>Características das turbinas</b>			
	<b>Área varida pelo rotor (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Potência nominal (kW)</b>	<b>Diâmetro rotor (m)</b>
<i>Turbina TE1 (TW-250)</i>	531	250	26
<i>Turbina TE2 (E-40)</i>	1275	500	40,3

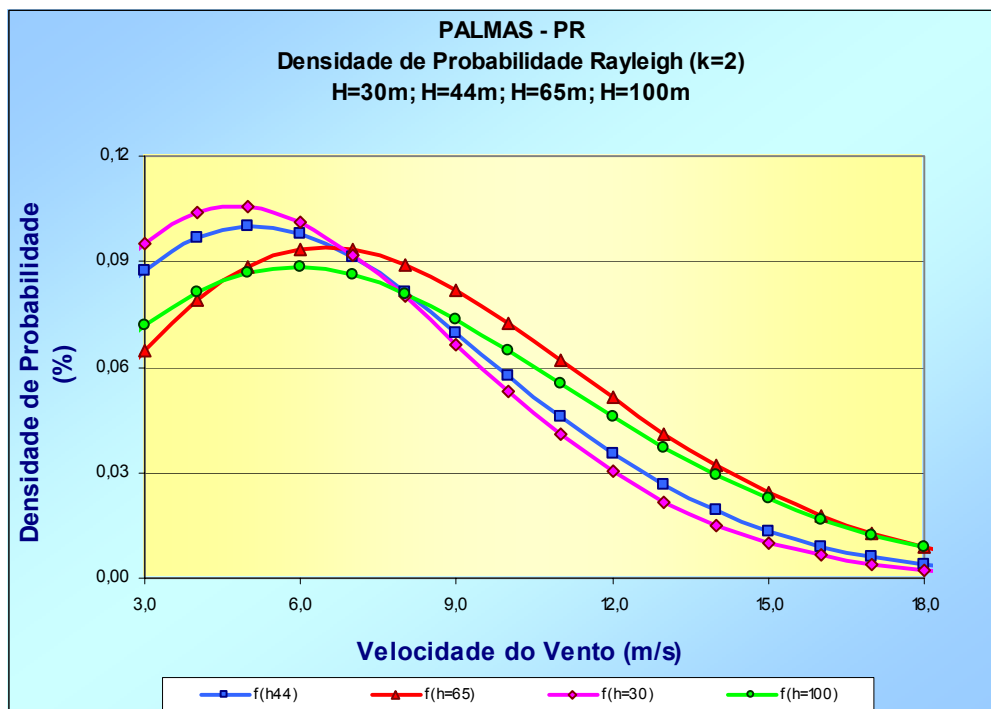
**TABELA 5.24– CARACTERÍSTICAS DAS TORRES**

<b>Características das Torres</b>					
<b>Torre</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Diâmetro base (m)</b>	<b>Diâmetro topo (m)</b>	<b>Área lateral (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Acréscimo na altura (%)</b>
<i>H1</i>	30	2,43	1,20	64,18	-
<i>H2</i>	44	3,00	1,20	290,3	46,7
<i>H3</i>	65	3,66	1,20	869,9	47,7
<i>H4</i>	100	5,63	1,20	1072	53,85

Considerando uma turbina TE-1 com os dados técnicos apresentados na Tabela 5.2 e os dados físicos das estações apresentados na Tabela 5.22 foram efetuados os cálculos energéticos para as localidades de Palmas e Morro Perdidos. Os cálculos para UEE MC foram efetuados no item 5.1.2.3. Adotou-se para curva de frequência de velocidades a distribuição de Rayleigh para  $k = 2$ .

Na figura 5.6 é apresentado o gráfico com as curvas de frequência ajustadas nas cinco estações para velocidade média na altura de 30 m.

FIGURA 5.6 – DENSIDADE DE PROBABILIDADE DA VELOCIDADE DO VENTO



### 5.3.3 Simulação 1 : Aerogerador TW-250 (250 kW) com torre de 30 m

Conforme citado no item 5.3.1, as localidades de Santo André e Ilha do Mel apresentaram velocidade média do vento na altura 30 m inferior a 5 m/s, por isso, não apresentam potencial eólico viável de exploração e não foram incluídas na simulação. Na Tabela 5.25 e Figura 5.7 são apresentados os resultados dos resumos das simulações efetuadas para as 3 localidades. As tabelas com simulações completas estão no Apêndice II.

**TABELA 5.25 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM O AEROGERADOR TW-250 E TORRE DE 30 m**

<b>SIMULAÇÃO 1</b>					
<i>Usina</i>	<i>V<sub>30</sub></i> <i>(m/s)</i>	<i>P<sub>m</sub></i> <i>(kW)</i>	<i>E<sub>e</sub></i> <i>(MWh)</i>	<i>UAP</i> <i>(h)</i>	<i>FC</i>
<i>Camelinho</i>	6,5	49,5	422	2000	0,23
<i>Santo André</i>					
<i>Ilha do Mel</i>					
<i>Palmas</i>	7,2	49,5	436	2002	0,23
<i>M. Perdidos</i>	7,6	68,5	579	2774	0,33

**FIGURA 5.7 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 1 ENERGIA ESPERADA (MWh/ANO)**



### 5.3.4 Simulação 2: Aerogerador TW-250 (250 kW) com torre de 44 m

Os resultados apresentados na Tabela 5.26 e Figura 5.8 são referentes às simulações efetuadas com velocidade média a 44 m e considerando a implantação da TE1. Para essa altura de 44 m as velocidades médias do vento em Santo André e Ilha do Mel estão acima de 5 m/s, logo, esses dois locais foram incluídos na lista.

**TABELA 5.26 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM O AEROGERADOR TW-250 E TORRE DE 44 m**

SIMULAÇÃO 2					
Usina	V <sub>30</sub> (m/s)	P <sub>m</sub> (kW)	E <sub>e</sub> (MWh)	UAP (h)	FC
Camelinho	6,7	53,0	452	2144	0,25
Santo André	5,5	33,0	272	1238	0,15
Ilha do Mel	5,2	33,9	279	1098	0,13
Palmas	7,6	60,7	487	2210	0,28
M. Perdidos	8,0	74,9	632	3030	0,36

**FIGURA 5.8 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 2 ENERGIA ESPERADA (MWh/ANO)**



### 5.3.5 Simulação 3: Aerogerador TW-250 (250 kW) com torre de 65 m

Os resultados apresentados na Tabela 5.27 e Figura 5.9 referem-se às simulações efetuadas com velocidade média a 65 m considerando a implantação do aerogerador TW-250.

**TABELA 5.27 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM O AEROGERADOR TW-250 E TORRE DE 65 m**

SIMULAÇÃO 3					
Usina	V <sub>30</sub> (m/s)	P <sub>m</sub> (kW)	E <sub>e</sub> (MWh)	UAP (h)	FC
Camelinho	6,9	56,5	482	2289	0,27
Santo André	8,2	82,3	695	3142	0,37
Ilha do Mel	5,5	39,6	328	1292	0,18
Palmas	8,1	80,7	681	3091	0,37
M. Perdidos	8,5	82,3	692	3319	0,39

**FIGURA 5.9 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 3 ENERGIA ESPERADA (MWh/ANO)**



### 5.3.6 Simulação 4: Aerogerador E-40 (500 kW) com torre de 44 m

Os resultados apresentados na Tabela 5.28 e na Figura 5.10 referem-se às simulações efetuadas com velocidade média a 44 m.

**TABELA 5.28 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM AEROGERADOR E-40 (500 kW) E TORRE DE 44 m**

SIMULAÇÃO 4					
Usina	V <sub>30</sub> (m/s)	P <sub>m</sub> (kW)	E <sub>e</sub> (MWh)	UAP (h)	FC
Camelinho	6,7	124	1057	2506	0,29
Santo André	5,5	84,7	701	1590	0,19
Ilha do Mel	5,2	84,7	696	1372	0,33
Palmas	7,6	140	1121	2540	0,32
M. Perdidos	8,0	168	1423	3411	0,40

**FIGURA 5.10 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 4 - ENERGIA ESPERADA (MWh/ANO)**





### 5.3.7 Simulação 5: Aerogerador E-40 (500 KW) com torre de 65 m

Os resultados apresentados na Tabela 5.29 e na Figura 5.11 referem-se às simulações efetuadas com velocidade média a 65 m, que é a altura máxima do rotor indicada no catálogo do fabricante para o aerogerador E-40

**TABELA 5.29 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM O AEROGERADOR E-40 (500 kW) E TORRE DE 65 m**

SIMULAÇÃO 5					
Usina	V <sub>30</sub> (m/s)	P <sub>m</sub> (kW)	E <sub>e</sub> (MWh)	UAP (h)	FC
Camelinho	6,9	131	1120	2654	0,31
Santo André	8,2	185	1556	3530	0,42
Ilha do Mel	5,5	97,5	807	1590	0,38
Palmas	8,1	181	1530	3470	0,41
M. Perdidos	8,5	186	1587	3803	0,45

**FIGURA 5.11 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 5 – ENERGIA ESPERADA (MWh/ANO)**



### 5.3.8 Simulação 6: Aerogerador E-40 (500 KW) com torre de 100 m

Os resultados apresentados na Tabela 5.30 e na Figura 5.12 referem-se às simulações efetuadas com velocidade média a 100 m, que é a altura em que se está investigando as velocidades do vento para estudos de implantação de novos aerogeradores na região.

**TABELA 5.30– RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COM O AEROGERADOR E-40 (500 kW) E TORRE DE 100 m**

SIMULAÇÃO 5					
Usina	V <sub>30</sub> (m/s)	P <sub>m</sub> (kW)	E <sub>e</sub> (MWh)	UAP (h)	FC
Camelinho	7,2	127	1068	2533	0,30
Santo André	12,5	286	2283	5170	0,65
Ilha do Mel	5,8	111	922	1816	0,44
Palmas	8,6	199	1693	3841	0,45
M. Perdidos	9,0	2001	1710	4099	0,48

**FIGURA 5.12 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 6 – ENERGIA ESPERADA (MWh/ANO)**



A tabela 5.31 apresenta o resumo da utilização anual da potência (UAP), em horas, calculada nas simulações

**TABELA 5.31 – UTILIZAÇÃO ANUAL DA POTÊNCIA (UAP= $h_a$  – h/ano)**

<i>Simulação</i>	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Camelinho	2000	2144	2289	2506	2654	2533
Santo André	< 2000	< 2000	3142	< 2000	3530	5170
Ilha do Mel	< 2000	< 2000	< 2000	< 2000	< 2000	<2000
Palmas	2002	2210	3091	2540	3470	3841
M. Perdidos	2774	3030	3319	3411	3803	4099

A tabela 5.32 apresenta o resumo da energia anual esperada calculada nas simulações.

**TABELA 5.32 – ENERGIA ANUAL ESPERADA MWh**

<i>Simulação</i>	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Camelinho	422	452	482	1057	1120	1068
Santo André	v < 5,0 m/s	272	695	701	1556	2283
Ilha do Mel	v < 5,0 m/s	279	328	696	807	922
Palmas	436	487	681	1121	1530	1693
M. Perdidos	579	632	692	1423	1587	1710

### **5.3.9 Cálculo dos custos de implantação e geração dos casos simulados**

#### **5.3.9.1 Custos de implantação**

Considerando as informações das Tabelas 5.23 e 5.24 foram calculados os custos de investimento para os 6 arranjos simulados.

As simulações 1, 2 e 3 foram efetuadas considerando o aerogerador TW-250 variando-se em cada uma delas somente a altura da torre, 30, 44 e 65 m. A variação da altura da torre de 30 m para 44 m correspondeu a um acréscimo de 46,7% e de 44 m para 65 m o acréscimo foi de 47,7%.

Nas simulações 4, 5 e 6, o aerogerador considerado foi o E-40 (500 KW) com alturas de torre de 44, 65 e 100 m. O acréscimo de altura de 65 para 100 m correspondeu a um percentual de 53,8%.

Segundo a experiência de técnicos da área de energia eólica, o aumento de uma unidade na altura de uma torre corresponde aproximadamente ao aumento de uma unidade e meia na parcela do custo referente à torre. Por exemplo, se o custo da torre 1 é de 100, o custo da torre 2 será de 170 (47,7 % vezes 1,5).

Para o caso de somente aumento do diâmetro das pás, não ocorre alteração nesta parcela do custo unitário, pois o custo é considerado por unidade de potência (ex. US\$/KW). Considerou-se neste caso apenas um acréscimo de 5% no custo da parcela referente à infra-estrutura.

Com as premissas apresentadas acima e o custo unitário de implantação do arranjo (US \$/kW) da simulação 1 igual a US \$ 1.000/KW<sup>6</sup>, calculou-se o custo para os outros 5 arranjos simulados. Os custos unitários determinados para cada arranjo são apresentados na Tabela 5.33.

**TABELA 5.33 - CUSTO UNITÁRIO DE INSTALAÇÃO DOS ARRANJOS SIMULADOS (US \$/ kW)**

<b>Simulação</b>	<b>(1)</b>	<b>(2)</b>	<b>(3)</b>	<b>(4)</b>	<b>(5)</b>	<b>(6)</b>
<i>Terreno</i>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
<i>Rotor</i>	173	173	173	173	173	173
<i>Torre</i>	131	223	382	223	382	488
<i>Nacele+G+Cm</i>	392	392	392	392	392	392
<i>Infra-estrutura</i>	295	310	325	341	358	375
<i>Controle e Seg.</i>	7,30	7,30	7,30	7,30	7,30	7,30
<b><i>Custo/kW</i></b>	<b>1000</b>	<b>1107</b>	<b>1281</b>	<b>1138</b>	<b>1314</b>	<b>1437</b>

### 5.3.9.2 Custo de geração

Para a análise financeira dos arranjos simulados e cálculo do custo da energia produzida, foram usadas as seguintes premissas financeiras (MEYERS, 1977):

- Vida útil dos arranjos de 20 anos;

<sup>6</sup> Parcelas que formam o custo unitário obtidas da referência (MINGACHO et al, 2003).

- Custos de operação e manutenção de 3% ao ano sobre o investimento nos aerogeradores;
- Taxa de desconto de 14% ao ano para o cálculo da energia gerada.

O custo médio anual atualizado da energia gerada (US \$/kWh) é dado por:

$$C_a = \frac{I_o(i + d_{om})}{UAP}, \quad (5.1)$$

$$i = \frac{(1 + a)^n a}{(1 + a)^n - 1} \quad (5.2)$$

onde:

$C_a$  – custo anual;

$i$  – inverso do fator presente da anuidade ;

$a$  – taxa de desconto;

$n$  – número de anos da vida útil;

$d_{om}$  – custo de operação e manutenção (% sobre investimento);

$I_o$  – custo do investimento por kW instalado;

$UAP$  – utilização anual da potência (UAP) em horas.

Utilizando as equações 5.1 e 5.2 e os valores de UAP calculados nas simulações e resumidos na Tabela 5.31, calculou-se o custo médio de produção de energia em US \$/MWh apresentado na Tabela 5.34

**TABELA 5.34 – CUSTO MÉDIO ANUAL DA PRODUÇÃO DE ENERGIA (US \$/MWh)**

<b>Simulação</b>	<b>(1)</b>	<b>(2)</b>	<b>(3)</b>	<b>(4)</b>	<b>(5)</b>	<b>(6)</b>
<i>Camelinho</i>	77	88	110	80	100	125
<i>Santo André</i>	NA	NA	80	NA	75	<b>61</b>
<i>Ilha do Mel</i>	NA	NA	NA	NA	NA	175
<i>Palmas</i>	77	85	82	78	77	83
<i>M. Perdidos</i>	<b>55</b>	62	76	58	70	78
Obs. NA – não avaliado ( UAP<2000h)						

Considerando 1 US \$ igual a R\$ 2,70, os custos em real estão apresentados na Tabela 5.35.

**TABELA 5.35 – CUSTO MÉDIO ANUAL DA PRODUÇÃO DE ENERGIA (R\$/MWh)**

<b>Simulação</b>	<b>(1)</b>	<b>(2)</b>	<b>(3)</b>	<b>(4)</b>	<b>(5)</b>	<b>(6)</b>
<i>Camelinho</i>	208	237	298	215	270	339
<i>Santo André</i>	NA	NA	217	NA	203	166
<i>Ilha do Mel</i>	NA	NA	NA	NA	NA	472
<i>Palmas</i>	208	230	221	212	207	223
<i>M. Perdidos</i>	150	168	205	158	189	209
Obs. NA – não avaliado ( UAP<2000h)						

#### **5.4 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E SOCIOECONÔMICA DAS UEE PALMAS E UEE MORRO DO CAMELINHO**

##### **5.4.1 Sustentabilidade Ambiental**

##### **5.4.1.1 Comparação com geração hidrelétrica – (renovável) área/MW instalado na UEE Palmas**

Um dos indicadores recomendados para a geração de energia eólica é a área utilizada. Em comparação com a energia hidráulica que inviabiliza as áreas atingidas pelo reservatório, as áreas das fazendas eólicas podem ser utilizadas pela agricultura e pecuária. A relação área utilizada por MW instalado para as usinas do Rio Iguaçu é de 0,10 km<sup>2</sup>/MW instalado, sendo que estas áreas tiveram que ser desapropriadas e o custo das mesmas é contabilizado para compor o custo da energia gerada (CAMARGO, 2003).

Para a UEE Palmas, considerando o espaçamento entre torres de 10 vezes o diâmetro das pás para instalação à jusante na direção do vento e 5 vezes o diâmetro se instalada ao lado a relação entre área utilizada por MW instalado é de 1,2 km<sup>2</sup>/MW, porém esta área pode ser utilizada para exploração agrícola e pecuária. Este fato demonstra que, ao contrário de outras fontes de energia, a energia eólica não compromete na utilização dos recursos naturais.



que a UEE Palmas seja evitado de lançar na atmosfera em torno de **60.500 t** de gás carbônico, contribuindo assim para redução de gases do efeito estufa.

Outra vantagem que está se consolidando é a aplicação no mercado de créditos de carbono. Atualmente cada toneladas de CO<sub>2</sub> absorvida ou evitada está sendo negociada a U\$ 6,00. A previsão para os próximos 10 anos é que esse valor chegue a atingir U\$ 20,00 /t. Considerando o valor do mercado atual a UEE Palmas renderia anualmente em torno de **U\$ 18.000,00** em créditos de carbono.

**TABELA 5.37 – EMISSÕES EVITADAS EM MORRO DO CAMELINHO**

CAMELINHO - EMISSÕES EVITADAS - t/GWh								Creditos de Carbono U\$ 6,00/t <sup>2</sup>
			ÓLEO	GAS	CARVAO	MÉDIA	MÉDIA/ 20 anos	
	<i>MWh</i>	<i>GWh</i>	616,877 <sup>1</sup>	476,2 <sup>1</sup> 6	821,6 <sup>1</sup> 9	638,276		
1994	346,2	0,3462	214	165	284	221		
1995	610,6	0,6106	377	291	502	390		
1996	799,4	0,7994	493	381	657	510		
1997	894,7	0,8947	552	426	735	571		
<b>Total</b>	<b>2650,9</b>	<b>2,651</b>	<b>1.636</b>	<b>1.263</b>	<b>2.178</b>	<b>1.692</b>		<b>10.152</b>
<b>Média</b>	<b>663</b>	<b>0,663</b>	<b>409</b>	<b>316</b>	<b>545</b>	<b>423</b>		<b>2.538</b>
							<b>8.460</b>	<b>50.760</b>

<sup>1</sup> PADRÃO IPCC <sup>2</sup> Cotação MDL Kyoto /2005

Efetuando-se os mesmos cálculos de Palmas para a UEE Morro do Camelinho, nos 4 anos de operação acima apresentados foram evitadas **1.692 t** de CO<sub>2</sub> e pode-se prever um valor de emissões evitadas de **8.460 t** de gás carbônico durante os 20 anos de vida útil. Para a UEE MC, o valor anual em créditos de carbono seria de **U\$ 2.538,00**.

## 5.4.2 Sustentabilidade socioeconômica

### 5.4.2.1 UEE de Palmas

#### A. Microregião de Palmas

A microregião de Palmas associa-se junto a outros 4 municípios à Microregião de Pato Branco por vínculos econômicos, culturais e ambientais. Assim sendo, estes



municípios deveriam unir esforços para promover seu desenvolvimento econômico em conjunto.

O município de Palmas, o mais antigo da região, foi emancipado em 1879. O ciclo da erva-mate permitiu a sua organização prolongando-se até meados do século XX. Mais tarde, com a melhoria dos transportes, a exploração da madeira adquiriu proeminência. A agricultura surgiu na região apenas como subsistência e para suporte à pecuária extensiva que se fixou na região e continua sendo hoje uma das principais atividades do município. Quanto à agricultura, a potencialidade do município difere pelo clima. Sua ênfase é na produção de maçã e batata-semente, enquanto outras culturas como milho e soja não têm a mesma importância (ARGENTA, 2000).

O município apresenta um significativo parque industrial instalado com frigoríficos, cooperativas e laticínios, em função da pecuária na região. Existem também serrarias, que funcionam com um certo grau de ociosidade devido à falta de matéria-prima, uma vez que não existem reflorestamentos importantes na região.

Palmas também investe no turismo regional e é hoje uma das poucas cidades do Sudoeste do Paraná a conseguir o selo da Embratur – Empresa Brasileira de Turismo, que a consagra como um pólo turístico respeitável. Os principais atrativos para o turismo são as festas regionais de promoção da pecuária e da maçã e também as festas religiosas.

Destacando-se como base de sustentação do município, aparece a área de educação. O Campus de Palmas funciona há trinta anos com aproximadamente 300 funcionários, mais de vinte cursos superiores, além de especializações e mestrado em Ciências Sociais Aplicadas. Frequentam a escola cerca de 5000 alunos na graduação e 800 na pós-graduação. Como mais de 50% desses alunos vêm de outras localidades, eles contribuem com o comércio de forma bastante significativa.

## **B. A usina eólica na região de Palmas**

Com o objetivo de investigar a influência socioeconômica na região foram tomados alguns depoimentos na própria usina e na sede do município.

Durante uma visita à usina, o supervisor deu seu depoimento quando questionado sobre a influência da usina sobre o município. Ele declarou que, na sua opinião o empreendimento pouco contribui para o desenvolvimento da região, pois, na fase de construção, gerou poucos empregos e, atualmente, na fase de operação,

emprega apenas 4 operadores. Quanto à contribuição para o desenvolvimento do turismo local, também afirmou não ser muito significativo. Atualmente, as visitas programadas e autorizadas pela empresa giram em torno de 1000 pessoas por ano, em grupos compostos principalmente por estudantes ou profissionais. Nos primeiros anos da implantação da usina, o número de visitas era maior devido à curiosidade que a novidade suscitou. Porém, a empresa reduziu as permissões de visitas acompanhadas pelos técnicos operadores da usina por questão de segurança.

Segundo a proprietária da lanchonete localizada na frente do escritório, fora da área do empreendimento, que também vende artesanato (*souvenirs* da usina), é grande o número de viajantes que param para observar os aerogeradores, principalmente no período de férias, porém ela não soube quantificar o número.

Foi entrevistada também a diretora do departamento de Turismo da prefeitura municipal de Palmas que afirmou que a usina influenciou no município atraindo turistas, porém ainda não possui dados estatísticos que comprovem esse fato, uma vez que o departamento é novo (foi criado há um ano) e ainda está se estruturando.

Finalmente, foi entrevistada a proprietária do mais novo hotel que se instalou na cidade há dois anos e ela afirmou que o seu hotel geralmente não hospeda turistas. Desde sua implantação os seus hóspedes são pessoas que vêm para a cidade a serviço nas indústrias e fazendas da região. Informou também que os 4 técnicos que trabalham na usina eólica de Palmas residem no seu hotel.

#### **5.4.2.2 Outras usinas eólicas na região**

À cerca de 2 km da UEE Palmas, na fazenda Coxilhão, município de Água Doce – SC, está implantada a UEE Horizonte com 8 aerogeradores de 600kW pertencente à empresa CENAEEL.

Um novo empreendimento a UEE Água Doce, integrante do PROIFA, está sendo implantado pela Wobben e CENAEEL na mesma fazenda em que está localizada a UEE Horizonte, percebendo-se atualmente a movimentação de caminhões e tratores preparando as estradas de acesso. Segundo a proprietária da fazenda (e confirmada na listagem do PROINFA divulgada pela ELETROBRAS), serão implantados na área mais 15 aerogeradores de 600 kW acrescentando mais 9.000 kW aos 4.800 kW já existentes. Segundo a proprietária do hotel em Palmas, 15 técnicos (fizeram a reserva de acomodação) que iniciarão a construção das fundações estarão chegando na cidade

nos próximos dias. Espera-se que a ampliação deste parque eólico gere alguns empregos para a região, porém sabe-se que serão temporários.

A ampliação da UEE Horizonte duplicará a quantidade de aerogeradores na região (ao todo serão 28 aerogeradores num raio de aproximadamente 3 Km). Estão aprovados pelo PROINFA mais 4 parques eólicos na região (Salto, Amparo, Aquibatã e Cruz Alta), com potência instalada total de 111.400 kW (ELETROBRAS, 2003). Considerando aerogeradores de 600 kW serão implantadas mais 186 unidades em sítios vizinhos.

Acrescentando os 15 aerogeradores da UEE Água Doce, os 186 do PROINFA aos 14 já existentes (Palmas e Horizonte) a região terá um total de 215 aerogeradores. Essa quantidade de “elementos futuristas” em uma paisagem bucólica certamente modificará o aspecto da mesma. O impacto de alteração da “paisagem” já começa a ser sentido, sendo recomendável uma avaliação de futuras ampliações do número de aerogeradores na região em relação a esse aspecto ambiental.

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.1 ANÁLISE DA OPERAÇÃO DA UEE MORRO DO CAMELINHO

Considerando os cálculos energéticos aqui apresentados e informações sobre a operação da UEE MC, obtidas no relatório da CEMIG, podem ser destacadas algumas considerações relevantes:

- 1 Os montantes de energia produzidos anualmente são inferiores aos estimados no projeto, a expectativa era um nível de produção médio anual de energia elétrica dos 4 aerogeradores acima de 1.500 MWh. Essa realidade pode ser explicada por diversos fatores destacando-se:
  - Ocorrência de velocidade do vento inferior ao estimado com base nas medições anteriormente realizadas;
  - Índice de disponibilidade das máquinas inferior ao estimado;
  - Diferentes desempenhos dos aerogeradores em função da complexidade e limitações do terreno da usina;
  - Eficiência de conversão de energia dos aerogeradores – devido às características dos ventos da usina e adaptação das características técnico/construtivas às condições locais – inferior à informada pelo fabricante.
  - Massa específica do ar na localidade inferior à massa específica de referência utilizada pelo fabricante para definir a curva de potência do aerogerador.
- 2 Na faixa de velocidades 5 a 10 m/s a potência elétrica desenvolvida por cada aerogerador reduziu-se sensivelmente em relação à potência nominal de 250 kW. Como a potência elétrica é função do cubo da velocidade do vento, uma pequena redução na velocidade do vento significa uma redução significativamente maior na potência elétrica de saída. Portanto, na maior parte do tempo, os aerogeradores da usina desenvolvem uma potência elétrica muito inferior à potência nominal.
- 3 Uma conclusão que se pode tirar da análise potência gerada versus área do rotor é que a relação potência elétrica / área não está otimizada para as condições do regime do vento no local da usina, ou seja:

- Não seriam necessários geradores elétricos com potência nominal superior a 125 kW (potência média observada 41,5 kW,  $C_p = 0,39$ ,  $\eta_m=0,95$ ,  $\eta_g=0,95$  e disponibilidade de 95%);
  - Ou, então, deveriam ser colocadas pás de maior comprimento – com conseqüente maior área varrida pelo rotor – aliadas a um aumento no comprimento da torre, aproveitando-se também a variação da velocidade do vento com a altura.
- 4 Os aerogeradores utilizados foram projetados para condições do vento diferentes das existentes no local da usina. Na Europa, em sítios com velocidades médias entre 6 e 7 m/s, na altura do eixo rotor, a potência nominal é atingida com maior freqüência (10% a 15% do tempo). Geralmente, a potência de saída média produzida por um aerogerador otimizado para as condições do vento de trabalho deve ser próxima de 1/3 do valor de sua potência nominal, ou seja, operando com um fator de capacidade próximo de 33%. Comumente, dependendo da velocidade e do perfil do vento local, este fator está entre 20% a 35%.
  - 5 É necessário considerar que, ao comparar diferentes aerogeradores e usinas eólico-elétricas, não necessariamente maiores fatores de capacidade significam maior geração de energia. O montante de energia gerado também depende diretamente da distribuição de freqüência das velocidades do vento.
  - 6 Conforme se observa nos dados de operação, a UEE MC vem apresentando uma produção de energia inferior ao previsto. Apesar da velocidade média dos ventos do local no período (6,11 m/s a 30 m de altura) ter sido ligeiramente inferior ao estimado no projeto (6,5 m/s), observou-se que sua intensidade e direção sofreram variações abruptas com muita freqüência, ocasionando uma perda significativa na produção de energia (CEMIG, 1988).
  - 7 Outro fator importante é o baixo fator de disponibilidade da Usina. O fator de disponibilidade é definido pelo quociente entre o número de horas do mês/ano em que o aerogerador esteve disponível para a geração de energia (com ou sem vento suficiente) e o número total de horas do mês/ano. Nos dois últimos anos, a usina tem operado com uma disponibilidade entre 60% a 70%.

- 8 Com relação à qualidade de energia, os dados estatísticos do período constataram duas realidades:
- Produção de energia inferior à esperada mesmo considerando-se a velocidade do vento efetivamente medida e o tempo que os geradores estiveram disponíveis;
  - A produção de energia anual de cada aerogerador tem sido de aproximadamente 200 MWh. Considerando-se a velocidade média anual dos ventos locais de 6,1 m/s, a curva de potência fornecida pelo fabricante e o tempo de operação efetiva dos aerogeradores, a quantidade de energia produzida deveria ser bem maior. As causas disso não são muito claras devido ao número de variáveis e incertezas envolvidas.
  - Entre as razões possíveis para essa produção inferior à esperada estão: i) A possibilidade da curva de potência fornecida pelo fabricante não ser adequada para os aerogeradores realmente fornecidos e para as condições do local de instalação; ii) A possibilidade de erros nas medições de velocidade do vento realizadas e iii) A possibilidade dos parâmetros operativos não estarem otimizados para as condições locais.
- 9 Os aerogeradores TW 250 utilizam tecnologia tradicional, com geradores elétricos assíncronos de duplo estágio de potência (80 e 250 kW), com controle *tiristorizado* de corrente (chave estática tipo *soft starter*). O eixo do rotor gira com velocidade constante e o controle de regulação da potência é feito por *stall*. As desvantagens dessa configuração de projeto são que o gerador elétrico está diretamente conectado ao sistema elétrico (via transformador) e toda flutuação da velocidade dos ventos, toda queda da potência de saída, ou a passagem das pás do rotor pela torre, causam flutuações/variações na potência de saída, que são transmitidas diretamente ao sistema elétrico (CASTRO, 1998). Essas flutuações/variações são visualizadas pelo consumidor como *flicker*, reduzindo a qualidade da energia produzida. As vantagens estão na simplicidade de construção, facilidade de assimilação operacional dos equipamentos e o baixo custo.
- 10 O sítio onde está localizada a usina está sobre região montanhosa e de relevo complexo, acarretando turbulências no escoamento dos ventos, com mudanças

freqüentes na velocidade e direção dos ventos. O sistema elétrico local é de pequena capacidade com corrente de curto circuito baixa (CEMIG, 1998).

- 11 Apesar das medições de qualidade de energia (harmônicos, flutuação de tensão, transitórios, fator de potência etc.) mostrarem que a energia gerada está dentro dos padrões de qualidade nacionais e internacionais, a excessiva freqüência das operações de chaveamento para entrada em funcionamento dos estágios de potência (80 kW e 250 kW) dos geradores elétricos e bancos de capacitores constituem a causa principal de preocupações quanto à qualidade da energia e conseqüentemente ocasionando perdas significativas da produção de energia (CEMIG, 1998).
- 12 As medições e observações mostraram que os parâmetros operativos dos aerogeradores não estavam otimizados para as condições específicas do local da usina.
- 13 A curva de desempenho dos aerogeradores (em função da velocidade do vento) medida revelou-se inferior à curva fornecida pelo fabricante, mesmo realizando-se as correções devido à massa específica do ar. Uma das explicações seria que a curva fornecida foi obtida de um aerogerador com características diferentes e em local de regime de ventos também diferente.
- 14 Os parâmetros operacionais foram reajustados, carecendo a usina de contínua avaliação de seu desempenho, visando confirmar o aumento da produção de energia projetado pelas alterações efetuadas.
- 15 Para que o desempenho da usina seja adequadamente reavaliado, as medições para determinação das curvas de potência devem continuar.

## **6.2 ANÁLISE DA OPERAÇÃO DA UEE PALMAS**

Considerando os cálculos energéticos aqui apresentados e informações sobre a operação da UEE Palmas obtidas na COPEL, podem ser destacadas algumas considerações relevantes:

1. Os montantes de energia produzidos anualmente estão na faixa de valores estimados no projeto, a expectativa era um nível de produção médio anual de energia elétrica dos 5 aerogeradores na faixa de 4.200.000 a 5.800.000 kWh. Porém, conforme observado nos dados analisados, a produção anual (4.700.000 kWh) está mais próxima ao limite inferior da faixa. Essa realidade pode ser explicada por diversos fatores destacando-se:
  - Ocorrência de velocidade do vento inferior ao estimado com base nas medições anteriormente realizadas;
  - Índice de disponibilidade das máquinas inferior ao estimado;
  - Diferentes desempenhos dos aerogeradores em função da complexidade e limitações do terreno da usina e do local onde foi implantada a usina, que não é exatamente o mesmo onde foram executadas as medições para elaboração do projeto.
  - Eficiência de conversão de energia dos aerogeradores – devido às características dos ventos da usina e adaptação das características técnico/construtivas às condições locais – inferior à informada pelo fabricante.
  - Massa específica do ar na localidade inferior (~15%) à massa específica de referência utilizada para construção da curva de potência do aerogerador.
2. Os aerogeradores utilizados foram projetados para condições do vento diferentes das existentes no local da usina. Geralmente, a potência de saída média produzida por um aerogerador otimizado para as condições do vento de trabalho deve ser próxima de 1/3 do valor de sua potência nominal, ou seja, operando com um fator de capacidade próximo de 33%. Comumente, dependendo da velocidade e do perfil do vento local, este fator está entre 20% a 35%. Para a UEE Palmas o valor obtido com os dados observados foi de 0,27.
3. Não foi possível calcular o fator de disponibilidade da Usina, pois não se encontravam disponíveis as informações sobre o número de horas em que efetivamente as turbinas funcionaram.
4. A curva medida de desempenho dos aerogeradores em função da velocidade do vento revelou-se inferior à curva fornecida pelo fabricante, mesmo realizando-se as correções devido à massa específica do ar. Uma das explicações seria que a curva



fornecida foi obtida de um aerogerador com características diferentes e em local de regime dos ventos também diferente.

5. Para que o desempenho da usina seja adequadamente reavaliado, devem ser executadas medições para aferição das curvas de potência.

## **6.3 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES**

### **6.3.1 Análise da utilização anual da potência - UAP resumida na Tabela 5.31**

Segundo Castro (2004), uma localidade com potencial para produção de energia eólica economicamente e tecnicamente viável deve apresentar UAP entre 2.000 e 3.500h, o que também significa ter um fator de capacidade maior que 0,25:

- Para a localidade de Morro do Camelinho, em todas as simulações, para a utilização anual da potência (UAP) o valor obtido foi levemente superior à 2.000 h anuais. Estes resultados indicam que, dependendo do arranjo, as alturas de torres poderiam estar sub-dimensionadas ou a potência dos aerogeradores superdimensionadas.
- Para a localidade de Santo André, somente com os arranjos 3,5 e 6 se obteria uma UAP superior a 2.000 h. Este resultado é devido ao fato que velocidades de vento com potencial de exploração para geração de energia nessa localidade ocorrem para alturas superiores a 50 m.
- Na Ilha do Mel, para todos os arranjos simulados a UAP é inferior a 2.000h, ou seja, apesar da densidade do local e baixa rugosidade (mar) favorecerem potências maiores do que arranjos semelhantes implantados no planalto (em Palmas, por exemplo) as velocidades de vento não são suficientes para exploração comercial desse potencial.
- Finalmente, para as localidades de Palmas e Morro Perdidos, para todos os arranjos, a UAP está na faixa em que é viável a exploração do potencial eólico, ou seja, o valor da UAP determinado é superior a 2000 h/ano. Esses resultados comprovam o fato percebido pelas altas velocidades com alta permanência que ocorrem nestes locais (média anual acima de 7m/s na altura de 30 m), tornando-os os melhores locais no Estado do Paraná para

implantação de usinas eólicas, fato também confirmado pela existência das usinas de Palmas e Horizonte, esta última em fase de ampliação.

### **6.3.2 Análise do custo da energia esperada**

- Para a localidade de Morro do Camelinho, em todas as simulações, exceto as de número 1 e 4, o custo obtido está acima da faixa dos valores previstos pela Eletrobrás para o MWh gerado por usina eólica, que é entre US\$ 70 a US\$ 80. Nas simulações 2,3, 5 e 6, a UAP obtida foi superior a 2000 h, porém o custo da energia é alto. Resumindo, para esse local, considerando os aerogeradores (250 kW e 500 kW) nas diferentes alturas simuladas, os custos da unidade de geração (US\$ /MWh) e a UAP resultantes demonstram que esses arranjos não produziram energia economicamente viável (custo na faixa de referência) e tecnicamente isso também não seria interessante, pois não atenderia um fator de capacidade mínimo.
- Em Santo André apenas para o arranjo adotado na simulação 4 (TE2=500 KW e H3=65 m) o custo da energia seria viável. Para os outros arranjos, além da UAP ser inferior a 2000 h/ano, o custo também está fora da faixa aceitável. Isso se deve ao fato de que, enquanto em Palmas a velocidade do vento da ordem de 8 m/s acontece a uma altura de 44 m, em Santo André, esta velocidade só é atingida em alturas superiores a 60 m.
- Em Palmas, onde a velocidade do vento a 30 m de altura já é superior a 7 m/s, todos os arranjos propostos apresentam custos dentro da faixa aceitável. O menor custo foi obtido com o arranjo que está implantado na UEE Palmas. Comparando-se as simulações 1 com a 2 e a 3 com a 4, percebe-se que somente alteando-se a torre sem aumentar a potência do gerador não se obteria energia com custo menor. Este resultado pode ser explicado pelo fato do preço unitário de implantação ser acrescido do custo referente ao aumento da altura da torre, que exige estrutura e fundações mais robustas.
- Finalmente, para Morro Perdidos, para todas as simulações os custos obtidos apresentaram valores dentro da faixa desejável (menores custos para todas as simulações se comparados com os das outras localidades) confirmando

ser esta região a de maior potencial para implantação de usinas eólicas. Apesar da sua potencialidade, nesta localidade não foi implantada ainda nenhuma usina eólica, talvez pelo fato de que o acesso é mais difícil (está localizada no topo da Serra do Mar) do que para a região Palmas.

#### **6.4 ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E SOCIOECONÔMICA DA ENERGIA EÓLICA**

Com relação às vantagens ambientais é indiscutível a contribuição da energia eólica principalmente pelo fato de não consumir recursos naturais e não poluir o meio ambiente.

Com relação à sustentabilidade socioeconômica, podem ser ressaltados os seguintes tópicos:

- O custo de geração ainda é pouco competitivo se comparado aos custos de geração de energia de outras fontes. A expansão do setor no Brasil ainda depende de incentivos governamentais.
- Programas governamentais podem incentivar o seu uso principalmente em sistemas isolados que permitiriam o acesso de energia à populações que vivem em regiões distantes dos grandes centros produtores e dos grandes sistemas de transmissão e distribuição de energia, criando assim uma vantagem social, melhorando a qualidade de vida dessas populações.
- Com relação à geração de empregos para as populações que vivem na região onde são implantados os parques eólicos, por exemplo, Palmas, o ganho não foi significativo limitando-se ao período de construção e alguns postos indiretos pela exploração do turismo.
- Existe um potencial de geração de emprego na indústria de fabricação de aerogeradores. Em alguns países da Europa, que exportam aerogeradores para o mundo todo, esta indústria representa uma importante fonte de divisas e geração de emprego. No Brasil, este tipo de indústria está começando a se desenvolver, sendo que atualmente existem apenas 3 empresas.

## **7 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa foram constatados alguns fatos importantes referentes aos tópicos estudados merecendo destaque as seguintes considerações:

### **ENERGIA E POLÍTICAS DE SUSTENTABILIDADE**

- As energias renováveis podem contribuir para o alcance das metas da Declaração do Milênio permitindo: crescimento da disponibilidade de energia, redução de impactos adversos à saúde, redução da poluição do ar, além de limitar emissões de gases de efeito estufa, porém, os custos dessas energias não são economicamente atrativos. Políticas que reduzam as distorções de mercado promoveriam a obtenção de energia sustentável através de fontes renováveis, aplicação de medidas de eficiência energética, novas tecnologias com “emissões zero”, além de uma posição de mercado consideravelmente melhor, relativa àquela de usos e práticas atuais.
- A adoção de Sistemas de Geração Distribuída, que são sistemas relativamente pequenos conectados diretamente à rede de distribuição (média e baixa tensão), podem representar a solução para a integração destes sistemas ao atual Sistema Elétrico Brasileiro, reduzindo a utilização das redes elétricas implicando na redução das perdas de energia. Este sistema também incentivaria o desenvolvimento de energias alternativas, pois permitiria aos interessados na geração de energia se instalarem no local mais propício e mais próximo da rede de transmissão.

### **ENERGIAS RENOVÁVEIS**

- A meta de redução dos gases causadores do efeito estufa, bem como a diminuição dos estoques dos combustíveis fósseis, contribuem para que as fontes alternativas, especialmente aquelas renováveis e as não-poluentes, ganhem um impulso inédito. O cumprimento dos objetivos impostos pelo Protocolo de Kyoto será muito difícil de alcançar se não houver uma vontade firme no desenvolvimento das energias renováveis através da adoção de uma política energética direcionada para as energias renováveis com o potencial para reduzir a

poluição, principalmente as concentrações de CO<sub>2</sub>, o aquecimento global, as mudanças climáticas e as chuvas ácidas.

- Em geral, o carácter descentralizado das fontes renováveis faz com que as necessidades de transformação e transporte da energia final sejam menores (a eletricidade pode ser produzida mais perto do ponto de injeção no sistema de distribuição), resultando também em menores impactos globais. O conceito de geração distribuída, que também está cada vez mais difundido na engenharia dos sistemas energéticos, aponta para uma participação crescente das fontes alternativas na geração de eletricidade.
- A opção pela produção de eletricidade a partir das energias renováveis é também vantajosa no nível macroeconómico, pela segurança, diversificação e disseminação de centros eletroprodutores. A utilização dos recursos naturais endógenos permite a redução da dependência energética do exterior, o que é significativamente importante, pois reduziria as importações. O fomento das energias renováveis pode contribuir de forma decisiva para a criação de novos postos de trabalho, com boas perspectivas, especialmente para as pequenas e médias empresas.

## **ENERGIA EÓLICA**

- Despontando como uma das principais fontes alternativas de energia, a energia eólica tem-se destacado pelo reduzido impacto sobre o meio ambiente e sobre comunidades vizinhas, pela sua base tecnológica industrial, pela experiência e pela confiabilidade adquiridas nos últimos 20 anos de operação de grandes sistemas no mundo. O desenvolvimento apresentado nas últimas décadas pela tecnologia de conversão de energia eólica é significativo.
- O principal impacto ambiental positivo da produção de energia de origem eólica se deve ao fato de, contrariamente ao que acontece com as energias convencionais, não estar associada à emissão de poluentes atmosféricos semelhantemente a outras formas de produção de energia a partir de energias renováveis. A produção de uma unidade de eletricidade (kWh) numa turbina eólica pode substituir uma unidade de eletricidade, produzida numa central de combustíveis fósseis.
- Os principais aspectos ambientais negativos relacionados à geração de energia eólica são: i) Instabilidade, por estar sujeita às variações do vento e a calmarias; ii)

- Custo relativamente alto devido a equipamentos caro; iii) Impacto visual pela alteração da paisagem e; iv) Interferência na avifauna.
- Os principais impactos da energia eólica sobre os pássaros são devido à colisão dos animais com as linhas e pás e distúrbios nas rotas de migração, na reprodução, alimentação e repouso na vizinhança das turbinas, porém não são maiores do que os impactos causados pela implantação de torres de transmissão de energia e telecomunicações.
  - A grande maioria dos estudos na Europa e Estados Unidos trata dos distúrbios e acidentes isolados causados aos pássaros por usinas eólicas em áreas costeiras (onde a população de pássaros migradores é grande e o repouso e a biogeografia para essas espécies são essenciais) ou em áreas de grandes parques eólicos onde, devido ao grande número de turbinas, os riscos de acidente também são maiores. Tem-se notícia também de acidentes com pássaros em parques eólicos perto de dois ou mais remanescentes florestais próximos, em que as turbinas ficavam na rota de movimentação dos indivíduos.
  - Como resultado positivo dos estudos desenvolvidos durante a última década, algumas ações foram tomadas por órgãos públicos de proteção ambiental no sentido de fornecer diretrizes para minimização de impactos na avifauna. Estes impactos podem ser reduzidos a um nível tolerável através do planejamento do futuro da geração eólica considerando os aspectos de conservação da natureza como: i) Evitar a instalação de parques eólicos em áreas importantes de habitat da avifauna; ii) Evitar áreas de corredor de migração; iii) Adotar arranjo adequado das turbinas no parque eólico; iv) Usar torres de tipos apropriados (tubulares) sistema de transmissão subterrâneo.

## **RECOMENDAÇÕES PARA A FASE DE PROJETO DE USINAS EÓLICAS**

- A seleção criteriosa do aerogerador depende da avaliação econômica dos benefícios do acréscimo da energia (maior faturamento) e dos custos do aumento da capacidade do mesmo (gerador e caixa de engrenagens maiores e outros itens). O conhecimento preciso das características dos ventos do sítio é, portanto, muito importante para a escolha adequada dos equipamentos.
- Um parâmetro que, em princípio, fornece uma medida do desempenho de uma usina no aspecto energético, é o fator de capacidade. Ele pode ser definido como

a potência média da usina e sua potência máxima. Ele é muito utilizado no setor de geração de energia elétrica, sendo um parâmetro de importância na análise de usinas. As usinas de base têm usualmente fatores de capacidade elevados, enquanto as usinas de ponta apresentam fatores de capacidade mais baixos. A aplicação desse fator para análise de desempenho de usinas eólico-elétricas apresenta algumas particularidades que devem ser ressaltadas.

- Para um mesmo local e uma mesma área de rotor, quanto maior for a capacidade nominal do gerador elétrico, menor será o tempo que este irá gerar em sua potência máxima e menor será o fator de capacidade do aerogerador. A este menor fator de capacidade corresponderá uma maior produção de energia, pois será aproveitada integralmente a energia presente nos ventos de maior velocidade.
- A potência disponível é fortemente dependente da velocidade do vento: quando esta duplica, a potência aumenta oito vezes, mas duplicando a área varrida pelas pás da turbina, o aumento é só de duas vezes. Por outro lado, se a velocidade do vento desce para metade, a potência reduz-se a 12,5%. Tudo isto explica a importância crítica da colocação das turbinas em locais com velocidades do vento elevadas no sucesso econômico dos projetos de energia eólica.
- Devido à lei de variação cúbica da potência com a velocidade do vento, para velocidades abaixo de um certo valor (normalmente, cerca de 5 m/s, mas dependendo do local) não interessa extrair energia.
- Pela mesma razão, para valores superiores à velocidade do vento nominal não é econômico aumentar a potência, pois isso obrigaria a robustecer a construção, e, do correspondente aumento no investimento, apenas se tiraria partido durante poucas horas no ano: assim, a turbina é regulada para funcionar à potência constante, provocando-se, artificialmente, uma diminuição no rendimento da conversão.

## **METODOLOGIA, PESQUISA E RESULTADOS**

O trabalho foi desenvolvido dentro das proposições iniciais de escopo e metodologia atendeu aos objetivos propostos:

- Foi traçado um panorama da geração de energia com ênfase nas energias renováveis e particularmente a energia eólica.

- Testou-se a metodologia de cálculos energéticos com os dados disponíveis obtendo-se uma avaliação preliminar da operação dos dois empreendimentos propostos. Vale ressaltar que uma avaliação mais precisa que permitisse a recomendação de medidas para melhorar o desempenho das usinas eólicas em questão, só seria possível se estivessem disponíveis dados de medição de vento mais detalhados, bem como informações da operação (produção de energia) das usinas que são considerados confidenciais pelas empresas geradoras e, por esse motivo não foram disponibilizados para essa pesquisa.
- Foram realizadas simulações, com o objetivo de verificar a possibilidade de aproveitamento do recurso eólico para geração de energia, em localidades do Estado do Paraná indicadas como promissoras pelo projeto VENTAR. Conforme esperado, os resultados apontaram as localidades de Palmas e Morro Perdidos como as melhores regiões para implantação de parques eólicos. Os resultados das simulações efetuadas também mostraram a sensibilidade da alteração das dimensões e características do sistema eólico bem como do local de implantação e sua influência no custo final da energia. Indicam também que na fase de projeto é desejável que sejam pesquisadas várias alternativas de arranjo com o objetivo de se determinar o arranjo ótimo para a localidade em estudo.

## **ESTUDOS FUTUROS**

Como as energias renováveis no Brasil apresentam um grande potencial que ainda não foi explorado, é interessante que continuem os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento neste tema com o objetivo de fomentar e viabilizar maior utilização destes recursos num futuro próximo destacando-se:

- Continuação do Projeto VENTAR, pesquisando-se a velocidade do vento em alturas maiores nos locais indicados como potenciais na primeira fase. A tecnologia disponível atualmente permite a implantação de torres acima de 100 m e já existem no mercado aerogeradores com capacidade superior a 3.000 KW.
- Novas pesquisas para integração de parques eólicos no Sistema Interligado de Geração e Transmissão explorando a complementaridade existente entre o regime hidrológico e eólico em algumas regiões do Brasil e procurando minimizar a desvantagem da intermitência do regime dos ventos.



- Pesquisas que demonstrem a possibilidade e incentivem a implantação de pequenos sistemas isolados que atendam populações que não têm acesso à energia elétrica atendendo uma necessidade social do país.
- Pesquisa de tecnologias de fabricação (materiais e layout) que permitam o aumento do fator de capacidade, a redução do custo e conseqüentemente tornem investimento em geração de energia eólica economicamente viável.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. **O bom negócio da sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2002.

AMARAL, S.P. **Indicadores de Sustentabilidade Ambiental, Social e Econômica: Uma Proposta para a Indústria de Petróleo Brasileira**. Meio Ambiente Industrial – Edição 39 – número 38,. 2002.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; DE SÁ, A. L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, Brasília, 2001 (em CD).

AMARANTE, O.A.C.; SCHULTZ, D. J. **Wind Energy of the State of Paraná, Brazil**. *DEWI Magazin No. 15, August 1999*.

AMARANTE, O.A.C.; SCHULTZ, D.J.; BITTENCOURT, R.M.; ROCHA, N.A.; **Wind/Hydro Complementary Seasonal Regimes in Brazil**. *DEWI Magazin No. 19, August, 2001*.

ANDRADE, R.B; TACHIZAWA, T.; CARVALHO, A.B. **Gestão Ambiental – Enfoque Estratégico Aplicado ao Desenvolvimento Sustentável**, São Paulo: MAKRON Books, 2000.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil 2002**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br> . Acessado em: 26 nov. 2002.

\_\_\_\_\_. **Capacidade de Geração do Brasil**. Disponível em: <http://www.anel.gov.br> . Acessado em: 28 abr. 2004.

ARGENTA, A.J. **Contribuição da Usina Eólico-Elétrica de Palmas - PR para o desenvolvimento energético alternativo do Estado do Paraná**. Dissertação de Mestrado. Faculdades Reunidas de Administração, Ciências Contábeis e Ciências Econômicas de Palmas – PR. Palmas, 2000.

ASME. American Society of Mechanical Engineers. ***Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering***. New York: ASME Press, 1994.

BAJAY, S.V.; WALTER, A.C.S.; FERREIRA, A.L. **Relatório Técnico da Fase 5: Otimização das práticas de planejamento e dos procedimentos regulatórios envolvidos no dimensionamento, construção e operação de usinas termelétricas**. Projeto de Pesquisa sobre “Integração entre as Regulações Técnico-Econômica e Ambiental e o Setor Elétrico Brasileiro” (Meta 1), Convênio ANEEL / FUNCAMP sobre “Regulação de Mercados de Energia Elétrica”, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – NIPE, UNICAMP, maio de 2000, 64 p.

BATTELLE MEMORIAL INSTITUTE. ***National Environmental Performance Track – U.S. EPA Annual Report, 2001***. Disponível em: [www.battelle.org/environment](http://www.battelle.org/environment) acessado em 02/07/03. Acessado em: 16 dez. 2004

BERGEN, Frank. ***Untersuchungen zum Einfluss der Errichtung und des Betriebs von Windenergieanlagen auf Vögel im Binnenland***. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Biologie. Tag der mündlichen Prüfung: 10.07.2001. (German, English Summary). Disponível em: <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/> .Acessado em: 21 fev 2005.

BERMANN, C. ***Proyecto Cono Sur Sustentable: Propuestas de Políticas Energeticas Sustentables para el Cono Sur***. Cordinación: Célio Bermann, 2002. Disponível em <http://www.riosvivos.org.br/arquivos/511814105.pdf> .Acessado em: 26 ago 2003.

BIRDLIFE *International*. ***Windfarms and Birds: An analysis of the effects of windfarms on birds, and guidance on environmental criteria and site selection issues***. CONVENTION ON THE CONSERVATION OF EUROPE WILDLIFE AND NATURAL HABITAS. Standing Committee - 23<sup>rd</sup> Meeting – Strasbourg, December 2003. Disponível em: <http://www.abcbirds.org/policy/OffShorebirdLifeStudy.pdf>. Acessado em: 18 fev. 2005.

CAMARGO, A.S.G. **Indicadores de sustentabilidade para a geração de energia elétrica**. Monografia de Especialização em Engenharia Ambiental. CEFET-PR. Curitiba, 2003.

CASTRO, R.M.G. **Controlo de Aerogeradores para produção descentralizada**. , Junho, 1998. Universidade Técnica de Lisboa. IST/DEEC – Instituto Superior técnico – Secção de Energia. Edição 2: Janeiro de 2004. Disponível em <http://enerp4.ist.utl.pt/fapee>. Acessado em: 25 nov. 2004.

CEMIG. Companhia Energética de Minas Gerais. **Usina Eólio-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho. Relatório de Desempenho Operacional Período 94/97**. Belo Horizonte, Dezembro 1998.

CEPEL, **Energia Solar**. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br>. Acessado em: 10 out. 2003.

CHEHEBE, J.R. **A análise do Ciclo de Vida de produtos**. Ferramenta gerencial da ISO 14000. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998.

CRESESB/CEPEL. **Energia Eólica - Princípios e Aplicações**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/eolica/>. Acessado em: 19 fev 2004.

CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Solar**. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/solar/>. Acessado em: 19 fev 2005.

COPEL. **Estudos Energéticos para a Usina Eólica de Palmas**. DEC/CPL/CNPG – Coordenadoria de Planejamento de Geração. Relatório Interno CNPG-22/97. Curitiba: Novembro, 1997.

\_\_\_\_\_. **Projeto VENTAR**. Relatório Interno. Curitiba, 1999.

COPPE/UFRJ; UFC. **Projeto Usina de Ondas Terminal Portuário do Pecém.** Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro e Universidade Federal do Ceará. São Gonçalo do Amarante, CE: 2005.

CRAIG, J.R; VAUGHAN, D.J; SKINNER, B.J. **Resources of the Earth: Origin, Use and Environment Impact.** 3rd ed., ISBN 0-13-083410-6. New Jersey: Prentice Hall Inc., 2001.

DEBEIR, J.C.; DELÉAGE, J.P.; HÉMERY, D. **Uma história da energia.** Traduzido e atualizado por Sérgio de Salvo Brito. ISBN: 85 230 0343-6. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1993. 447p.

DEWI. *Deutshes Windenergie-Institut. Kurze Einführung in die Windenergie-technologie. Relatório Interno COPEL - Adaptação e tradução livre da publicação do DEWI - Instituto Alemão de Energia Eólica por Dario J. Schultz. Curitiba, 1993..*

\_\_\_\_\_. *Deutshes Windenergie-Institut. Wind Energy Use in Germany. Status 31/12/2004.* Disponível em: <http://www.dewi.de> . Acessado em: 10 fev. 2005.

DWIA. **WINDPOWER NOTE. Danish Wind Industry Association Annual Report .No. 27 March 2002.** Danish wind industry association. Editor: Søren Krohn, ISSN 1397-1697. Disponível em <http://www.windpower.org>. Acessado em: 14 out. 2004.

\_\_\_\_\_. **WINDPOWER NOTE. Danish Wind Industry Association Annual Report .No. 29 March 2003.** Danish wind industry association. Editor: Søren Krohn, ISSN 1397-1697, Disponível em <http://www.windpower.org>. Acessado em: 14 out. 2004.

\_\_\_\_\_. **Annual Report of the Danish Wind Industry Association March 2004.** Danish Wind industry association. Editor: Bjarne Lundager Jensen, ISSN 1397-1697. Disponível em <http://www.windpower.org>. Acessado em: 14 out. 2004.

DUNN, S. **Sistema energético do século XX é incompatível com a economia digital.** Disponível em: <http://www.wwiuma.org.br> . Acessado em: 15 abr. 2003.

ELETROBRAS. GCPS/GTPG. **Programa decenal de geração 1996/2005 – Sistemas Interligados Sul/Sudeste/Centro-Oeste e Norte/Nordeste**. Relatório Final – Ciclo de Planejamento 1995 do GCPS. Rio de Janeiro: Março 1996.

\_\_\_\_\_. **Manual de Inventário Hidrelétrico**, 1997.

\_\_\_\_\_. **PROINFA – Programa de Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica**. MME - Ministério de Minas e Energia, 2002. Disponível em <http://www.eletrabras.org.br> Acessado em: 03 nov. 2003.

\_\_\_\_\_. **Consumo Sustentável: Energia Elétrica - a ordem é economizar**. Disponível em <http://www.eletrabras.gov.br/procel> Acessado em: 12 nov. 2004.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA, ***EPA's Draft Report On the Environment 2003***. Disponível em: <http://www.epa.gov/indicators>. Acessado em: 05 ago 2003.

EPRI - *Electric Power Research Institute*. ***Wave Energy Potential Warrants Further Research and Development***. Palo Alto, CA, 02/03/2005. Disponível em <http://www.epri.gov> . Acessado em: 27 mai. 2005.

ESTEFEN, S. F. **Ceará investe em usinas de ondas**. Programa de Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ambiente Brasil 06/05/2005. Disponível em <http://www.ambientebrasil.com.br> . Acessado em: 06 mai. 2005.

EUROPEAN COMMISSION. ***Energy for the Future: Renewable Sources of Energy. White Paper for a Community Strategy and Action Plan***, 1997.

EWEA. *The European Wind Energy Association*. ***Wind Energy – The facts. An analysis of wind energy in the EU-25***, 2003. Disponível em <http://www.ewea.org>. Acessado em: 16 fev. 2005.

\_\_\_\_\_. ***Wind Force 12: A Blueprint to achieve 12% of the world's electricity from Wind Energy Power by 2020***. May 2004. Disponível em: <http://www.ewea.org> . Acessado em: 16 fev. 2005.

FALCÃO, A.F.O. **Design of a shoreline wave power pilot plant for the island of Pico Azores**. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Wave Power Conference, Lisbon, Portugal, 1995*.

FLAVIN, C. E DUNN, S. **Uma Estratégia Energética Para O Século XX**. *Worldwatch Institute*, 2003. Disponível em <http://www.wwiuma.org.br>. Acessado em: 02 mai. 2003.

FRERIS, L. L. **Wind Energy Conversion Systems**. *Sydney: Prentice Hall*, ISBN 0-13-960527-4, 1990.

FHB - Fundação Heinrich Böll e CRV - Coalizão Rios Vivos. Seminário Internacional: **Fontes Alternativas de Energia e Eficiência Energética – Opção para uma Política Energética Sustentável no Brasil**. Organização: Fundação Heinrich Böll e Coalizão Rios Vivos. Espaço Cultural da Câmara dos Deputados, Brasília DF, 18-20 de junho de 2002.

GAGNON, L; BELANGER C.; UCHIYAMA Y. **Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001**. *Energy Policy* 30, p. 1267-1278, 2002. Disponível em <http://elsevier.com/locate/enpol> . Acessado em:19 set. 2003.

GARDNER, G. **O Estado do mundo 2002**. Disponível em [http://www2.uol.com.br/veja/idade/estado\\_mundo\\_2002/capitulo.html](http://www2.uol.com.br/veja/idade/estado_mundo_2002/capitulo.html) . Acessado em: 6 set. 2002.

GIPE, P. **Wind Energy Comes of Age**. *John Willey and Sons Inc.*, ISBN 0-471-10924-X, 1995.

\_\_\_\_\_. **Wind Power for the Home and Business**. Vermont: Chelsea Green Publishing Co., 1993.

GOSWAMI, D.Y., **Alternative Energy in Agriculture, Vol. II**, CRC Press, Florida, 1986.

GRAUER A., KAWANO M. **Biomassa. Boletim Informativo da Bolsa de Reciclagem**, Ano I, No 5, Dez./2001. Disponível em <http://www.bolsafiep.com.br>. Acessado em: 10 out. 2003.

GUELLER, H.S. **Revolução Energética: Políticas para um Futuro Sustentável**. Tese de Doutorado. USP – Universidade de São Paulo: Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia – PIPGE. São Paulo, 2002.

HAWKEN, P.; LOVINS, A.; LOVINS, L. H. **Capitalismo Natural**. São Paulo: Cultrix, 1999

HENRY, J. GLYNN; HEINKE, GARY W. **Environmental Science and Engineering**. New Jersey: Prentice Hall, 1966.

HYDRO-QUÉBEC, **Hydro-Québec Environmental Report 2002** Disponível em <http://www.hydroquebec.com/environment> . Acessado em: 15 jun. 2003.

HOLTTINEN, Hannele. **The impact of large scale wind power production on the Nordic electricity system**. Doctor of Science Dissertation. Helsinki University of Technology. VTT Technical Research Center of Finland. Espoo, Finland: 2004. ISBN 951-38-6427-8. Disponível em <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>. Acessado em: 20 mai. 2005.

ICONS, **Conferência Internacional de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável e Qualidade de Vida**. Workshop Pré-Conferência. Agosto 2003.

IEA – Internacional Energy Agency (IEA). **Benign Energy? The Environmental Implications of Renewables**. Paris, 1998.

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação. FORUM “**Energias Renováveis em Portugal**” - **Relatório Síntese**. ISBN 972-8646-01-1. Lisboa: ADENE/INETI, 2001. Disponível em [http://www.igm.ineti.tmedicoes\\_online](http://www.igm.ineti.tmedicoes_online) . Acessado em: 27 mai. 2005.

IPCC, 2001, **Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom.



IHA - International Hydropower Association. ***The Role of Hydropower in the Sustainable Development***, 162 p. London: 2003.

JANNUZZI, Gilberto De M. **Uma Avaliação das Atividades Recentes de P&D em Energia Renovável no Brasil e Reflexões para o Futuro**. Universidade Estadual de Campinas. Departamento de Energia. International Energy Initiative (Latin American Office). ENERGY DISCUSSION PAPER No. 2.64-01/03. Julho, 2003.

JANSS, G. ***Bird behavior in and near a wind farm in Tarifa - Spain: Management Considerations***. In *Proceedings of THE NATIONAL AVIAN-WIND POWER PLANNING MEETING III*, pp.110-114, 2000. Disponível em <http://www.nrel.gov>. Acessado em: 22 fev. 2005.

KAZAY H. F., LEGEY, L. F. L. **Fontes alternativas de energia: o que o Brasil tem feito?** (CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica / UFRJ). Brasil sempre: revista brasileira de desenvolvimento sustentável. Centro internacional de desenvolvimento sustentável. Fundação Getulio Vargas: 2001. Disponível em <http://www.insightnet.com.br/brasilsempre/>. Acessado em: 03 nov. 2004.

KRÜGER, E. L. **Uma abordagem sistêmica da atual crise ambiental**. Desenvolvimento e Meio Ambiente, n° 4, p. 37-43, jul./dez. 2001. Curitiba: Editora da UFPR, 2001.

LABSOLAR, UFSC. **Fontes não Convencionais de energia. A Tecnologias Solar, Eólica e de Biomassa**, 3a edição, revista modificada e ampliada, 2000.

LE GOURIERES, D. ***The Wind Power Plants – Theory and Design***. New York, NY: Pergamon Press, 1982.

LEKUONA, J. M. ***Uso del espacio por la avifauna y control de la mortalidad de aves y murciélagos en los parques eólicos de Navarra durante un ciclo anual***. Gobierno de Navarra, Spain, 2001. Disponível em <http://www.iberica2000.org/textos>. Acessado em: 25 fev. 2005

LORA, E. E. S. **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**. 2ªed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

LYSEN. E.H. **Introduction to Wind Energy**. SWD Steering Committee. Ministry of Development Cooperation, The Netherlands, 1982

MEIBOM, P.; SVENDSEN T.; SØRENSEN, B. **Trading wind in a hydro-dominated power pool system**. *International Journal of Sustainable Development* 1999 – Vol.2, No.4 pp.458-483.

MENDES, L.; COSTA, M.; PEDREIRA, M. J. **Energia Eólica e o Ambiente. Guia de Orientação para a Avaliação Ambiental**. Instituto do Ambiente. Portugal. Afragide: fev. 2002. Disponível em: <http://www.iambiente.pt/eolica/index.html> Acessado em: 30 set. 2002.

MEYERS, R. A. **Handbook of Energy Technology and Economics**. John Wiley & Sons. New York, 1983; ODUM, I. *Ecologia*, São Paulo: Pioneira, 1977.

MINGACHO, P.C; PORTELA, M.M.; Pinheiro, M.D. **Tipologia Dos Impactes Ambientais Associados às Fontes de Energias Renováveis**. Portugal: 2003.. Disponível em <http://meteo.ist.utl.pt/~jjdd/LEAMB>> Acessado em: 15 dez. 2004.

MME. Ministério de Minas e Energia. BEM – BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. Disponível em <http://www.mme.gov.br/>. Acessado em: 10 jun. 2005.

\_\_\_\_\_. Ministério de Minas e Energia. **PROINFA - Programa de Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica**. Disponível em [http://www.mme.gov.br/Proinfa/Texto\\_tecnolContempl.htm](http://www.mme.gov.br/Proinfa/Texto_tecnolContempl.htm). Acessado em: 10 nov. 2004.

MORETTI, P. M.; DIVONE, L. V. **Modern Windmills**. *Scientific American* (254:6); pp. 110-118, 1986.

MORRISON, M.L.; POLLOCK, K.H. **Development of a Practical Modeling Framework for Estimating the Impact of Wind Technology on Bird population**. *California State*

University, Sacramento & North Carolina State University, Raleigh, 1998. Disponível em <http://www.nationalwind.org/pubs/> Acessado em: 10 nov. 2004.

MÜLLER, A.C. **Hidrelétricas – Meio Ambiente e Desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995.

NAKICENOVIC, N. **Energy Scenarios for Sustainable Development**. Seminário Sustentabilidade na Geração e Uso de Energia. UNICAMP, fev. 2002. Disponível em <<http://www.rau-tu.unicamp.br>> . Acessado em: 11 set. 2003.

ORTIZ, L.S.; STANCICH, E.; SWITKES, G. **Seminário Internacional Fontes Alternativas de Energia e Eficiência Energética – Opção para uma política sustentável no Brasil**. Brasília, DF. 18-20 de Junho 2002.

PARK, J. **The Wind Power Book**. Palo Alto, CA: Cheshire Books, 1981.

PETERSEN, E.L. **Danish Wind Atlas – A Rational Method Wind Energy Siting**. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1981.

QUIROGA, R. **Información y Participación em el Desarrollo de la Sustentabilidade em America Latina**. *La transicion hacia el desarrollo sustentável*, p.115 – 139, Mexico: 2002.

RENEWABLE ENERGY WORLD Magazine. March – April 2003.

RIBEIRO, M. A. **Ecologizar - Pensando o Ambiente Humano**. Disponível em <http://www.ecologizar.com.br> . Acessado em: 24 abr. 2003.

ROCHA, N.A.; AMARANTE, O.C.; SCHULTZ, D.J.; SUGAI, M.V.B.; BITTENCOURT, R.M. **Estabilização sazonal da oferta de energia através da complementaridade entre os regimes hidrológico e eólico**. XV SNPTEE, Foz do Iguaçu: 1999.

RODRÍGUEZ, Carlos Roberto C. **Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos**

**Conectados à Rede.** Dissertação de Mestrado. UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 2002.

ROHATGI J. S, NELSON V. **Wind Characteristics - An Analysis for the Generation of Wind Power, Alternative Energy Institute,** Texas –U.S.A.,1994.

ROSAS, P.A.C.; ESTANQUEIRO, A.I. **Guia de Projeto Elétrico de Centrais Eólicas. Volume I - Projeto Elétrico e Impacto de Centrais Eólicas na Rede Elétrica. Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE (Brasil) e Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial – INETI (Portugal).** Recife, 2002. Disponível em <http://www.eletobras.gov.br> Acessado em: 11 out. 2004.

SAWIN, J. **Estado do Mundo 2003 - Traçando um novo futuro energético: Sumário do cap. 5.** Disponível em: <http://www.wwiuama.org.br> Acessado em: 14 abr. 2003.

SCHULTZ, D.J. **Energia Eólica: Situação mundial, brasileira e a experiência Copel.** I Ciclo de Palestras e Workshops em Tecnologias Sustentáveis – I TECSUS/CEFET-PR: Curitiba, 17 e 18 de outubro de 2002.

SEDA. *Sustainable Energy Development Authority. NSW Wind Energy Handbook, 2002.* Disponível em <http://www.seda.nsw.gov.au>. Acessado em: 10 dez. 2004.

SEDEFIAN, L. **On the Vertical Extrapolation of Mean Wind Power Density .** *Journal of Applied Meteorology* 1980, Vol. 19, No. 4, pp-488-493.

SHARP, D. J. **Wind Energy Conversion Systems. Cap.4 – Wind Turbines Aerodynamics.** *United Kingdom: Prentice Hall International,* 1990.

SMEDMAN-HÖGSTRÖM, A. S., HÖGSTRÖM, U. **A Practical Method for Determining Wind Frequency Distributions for the Lowest 200 m from Routine Meteorological Data.** *Journal of Applied Meteorology* 1978, Vol. 17, No. 7, pp. 942-954.,

SILVA, G.A. **A aplicação da Análise de Ciclo de Vida no Brasil** Meio Ambiente Industrial – Edição 42 – número 43, 2002.

SILVA, S. R. **Energia Eólica**. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

SØRENSEN, B; MEIBOM, P.; **Can Wind power be sold in a deregulated electricity market?** Roskilde University, Institute 2, Energy & Environment Group. Roskilde, Denmark: 1999. Disponível em <http://mmf.ruc.dk/energy> . Acessado em: 15 mai. 2005.

SWERA. *Solar and Wind Energy Resource Assessment*. **Anexo E: Dados Iniciais sobre Recursos Solares e Eólicos e Atividades de Desenvolvimento de Informação**. Disponível em <http://swera.unep.net/insert>. Acessado em: 20 mai. 2005.

TENNESSEE VALLEY AUTHORITY- **TVA Environmental Report: Reservoir Ratings**. Disponível em: <http://www.tva.gov/environment/ecohealth/> Acessado em: 20 jun. 2003.

THORPE T. **Current Status and Developments in Wave Energy**. *Proceedings of Conference on Marine Renewable Energies, MAREC 2001, Institute of Marine Engineers*, pp 103-110. Disponível em <http://www.cienciaviva.pt/> . Acessado em: 23 mai. 2005.

TWIDELL, J.W.; WEIR, A.D. **Renewable Energy Sources**. London: E&F Spon, 1986.

UGAYA, C.M.L. **Análise de Ciclo de Vida: estudo de caso em materiais e componentes automotivos no Brasil**. Tese de doutorado. UNICAMP. Campinas, 2001.

UNDP- *United Nations Development Program*. **World Energy Assessment – Energy and the Challenge of Sustainability**. Chair: Prof José Goldemberg, 2000. Disponível em: <http://www.undp.org/seed/eap/activities/wea/drafts-frame.html> . Acessado em: 12 set. 2003.

USDOE– *U.S. Department of Energy*. **Wind Energy Information Guide**. National Renewable Energy Laboratory. Washington, 1996.

\_\_\_\_\_. **Wind Resource Assessment Handbook. Fundamentals for conducting a successful monitoring program.** Albany, NY: AWS. Scientific In, 1997. Disponível em: [http://www.nrel.gov/wind/avian\\_lit.htm](http://www.nrel.gov/wind/avian_lit.htm) Acessado em: 21 fev. 2005.

\_\_\_\_\_. National Wind Coordinating Committee – NWCC. **Wind Energy / Bird Interactions: A Guidance Document**, 1999.

\_\_\_\_\_. **Energy Efficiency and Renewable Energy. Wind and Hydropower Technologies Program**, 2000. Disponível em: <http://www.eere.energy.gov/windandhydro> . Acessado em: 30 out. 2004.

\_\_\_\_\_. **State Wind Working Group Handbook. Energy Efficiency and Renewable Energy – EERE. Wind and Hydropower Technologies.** NREL/BK-500-346000, August 2003. Disponível em <http://www.windpoweringamarica.gov>. Acessado em: 20 nov. 2004.

\_\_\_\_\_. U.S. Department of Energy. **Wind Energy Costs.** Disponível em <http://www.eere.energy.gov/> . Acessado em 15 jun. 2005.

VON BERTALANFFY, L. **Teoria Geral dos Sistemas.** Petrópolis: Vozes, 1973.

WACHSMANN, U.; TOLMASQUIM, M.T. **Windpower in Brazil – A transition using the German experience.** RIO 02 – World Climate & Energy Event. January 2002.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science and Introductory Survey.** Academic Press, ISBN 1-12-732950-1, 1977.

WINDPOWER. **Associação da Indústria Eólica Dinamarquesa.** Disponível em: <http://www.windpower.org> Acessado em: 05 jan. 2003.

WINKELMAN, J. E. **The impact of the Sep Wind Park near Oosterbierum (Fr.), The Netherlands on birds 3: Flight behavior during daylight.** RIN Rep. 92/4. DLO- Instituut voor Bosen Natuuronderzoek. Arnhem, The Netherlands, 1992. 69pp. (Dutch, English summary).

## **APÊNDICE I**

## DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO AR

Em meteorologia, certas leis de gases fornecem a relação entre pressão  $p$  e densidade  $\gamma$ . Para gases ideais (como na atmosfera), a equação do processo politrópico é:

$$\frac{p}{\gamma^n} = c \quad (1)$$

onde  $c$  = constante

Esta equação pode ser empregada para obter relações entre pressão, temperatura, densidade e altitude.

Destas relações, uma das mais importantes é  $-\frac{dT}{dz}$  que é a taxa de variação da temperatura  $T$  com a altura  $Z$ , denominada taxa de queda de temperatura, que pode ser deduzida como demonstrado a seguir.

Das leis de Boyle e Charles conhecida como “equação de estado” temos:

$$\gamma = \frac{gp}{RT} \quad (2)$$

$$p = \frac{\gamma RT}{g} \quad (3)$$

onde:

$p$  = pressão absoluta

$T$  = temperatura em graus absolutos

$R$  = constante dos gases (para o Ar)

$\gamma$  = densidade do ar

$g$  = aceleração da gravidade

Substituindo (3) em (1) e diferenciando em relação a  $T$  e  $\gamma$  resulta:

$$\frac{Td\gamma}{\gamma dT} = \frac{1}{n-1} \quad (4)$$



Substituindo  $d\left(\frac{\gamma RT}{g}\right)$  ou  $dp$  na equação  $-\gamma = \frac{dp}{dz}$  temos:

$$\frac{dz}{dT} = -\frac{R}{g} \left( \frac{T d\gamma}{\gamma dT} + 1 \right)$$

$$-\frac{dT}{dz} = \frac{g(n-1)}{nR}$$

Para T constante  $n = 1$ .

A atmosfera padrão, ao nível do mar, corresponde a uma pressão de 101,3 kN/m<sup>2</sup>. Considerando  $R = 286,8$  J/kg, encontra-se para  $n$  o valor de 1,235 donde se pode calcular a pressão e a densidade em diferentes pontos. Adota-se  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>.

Foram fornecidos pelo SIMEPAR os seguintes dados:

	Referência	Santo André	Palmas	MP Pinhais
Massa específica do ar ( $\gamma$ )	1,225			
Altitude (z)	0	1200	1314	1450
Temperatura (T)	15	17,85	16,28	15
Pressão (P)	1003	916,16	893,21	890

Fonte: SIMEPAR

Utilizando-se os dados do ponto referencial (altitude 0) e os dados disponíveis das localidades foram

calculados os valores da densidade do para cada localidade:

	Referência	Santo André	Palmas	MP Pinhais
Densidade do ar ( $\gamma$ ) kg/m <sup>3</sup>	1,225	<b>1,089</b>	<b>1,078</b>	<b>1,031</b>

REFERÊNCIA:

VENNARD, J.K.; STREET, R.L. **Elementos de Mecânica dos Flúidos**. 5<sup>a</sup>. Edição. Editora Guanabara Dois S.A. Rio de Janeiro, 1978

## **APÉNDICE II**

## SIMULAÇÕES

MORRO DO CAMELINHO			SIMULAÇÃO -1		250	210,931174
Ua=6,5	H=30	1,042	1,235	0,844	8760 h	
v	f	f(h)	pe	pc	ee	uap
3	0,0828	725	1,0	0,8	612	
3	0,0944	827	2,0	1,7	1.395	
4	0,1105	968	5,0	4,2	4.083	
5	0,1168	1.023	9,6	8,1	8.247	
6	0,1142	1.001	23,4	19,7	19.738	
7	0,1047	917	39,9	33,7	30.907	
8	0,0905	793	67,8	57,2	45.377	
9	0,0742	650	99,5	83,9	54.583	
10	0,0579	508	135	114	57.954	
11	0,0431	378	170	144	54.301	
12	0,0307	269	202	171	45.832	
13	0,0209	183	231	195	35.713	
14	0,0136	119	256	216	25.746	
15	0,0085	74,5	275	232	17.302	
16	0,0051	44,7	273	230	10.299	
17	0,0029	25,7	262	221	5.686	
18	0,0016	14,2	234	197	2.804	
19	0,0009	7,5	215	181	1.367	
	0,9733	8.526,02		49,5	421.947	2.000
			0,27	0,23	1.687.788,18	

MORRO DO CAMELINHO			SIMULAÇÃO - 2		250,00	211
ua=6,7	H=44	1,042	1,235	0,844	8760 h	
v	f	f(h)	pe	pc	ee	uap
2,50	0,0784	686,95	1,00	0,84	579,78	
3,00	0,0897	785,61	2,00	1,69	1.326,12	
4,00	0,1058	926,74	5,00	4,22	3.910,86	
5,00	0,1130	989,65	9,55	8,06	7.976,81	
6,00	0,1118	979,67	23,37	19,72	19.323,37	
7,00	0,1039	910,43	39,94	33,71	30.690,17	
8,00	0,0914	800,32	67,81	57,23	45.803,66	
9,00	0,0763	668,72	99,45	83,94	56.129,38	
10,00	0,0608	532,88	135,29	114,18	60.846,87	
11,00	0,0463	405,93	170,27	143,71	58.335,93	
12,00	0,0338	296,13	202,02	170,50	50.491,32	
13,00	0,0236	207,15	231,27	195,19	40.433,62	
14,00	0,0159	139,09	255,74	215,84	30.022,63	
15,00	0,0102	89,73	275,00	232,10	20.825,30	
16,00	0,0064	55,64	273,07	230,47	12.823,59	
17,00	0,0038	33,19	262,07	221,19	7.340,63	
18,00	0,0022	19,05	233,96	197,46	3.761,28	
19,00	0,0012	10,52	215,00	181,46	1.909,73	
	0,97	8.537,42		53,01	452.531,04	2.144,70
				0,25	1.810.124,14	

MORRO DO CAMELINHO			SIMULAÇÃO - 3		250,00	211,00
ua=6,9	H=65	1,04	1,24	0,84	8760 h	
<b>v</b>	<b>f</b>	<b>f(h)</b>	<b>pe</b>	<b>pc</b>	<b>ee</b>	<b>uap</b>
2,5	0,0744	651,76	1,00	0,84	550,09	
3	0,0853	747,43	2,00	1,69	1.261,65	
4	0,1014	887,88	5,00	4,22	3.746,87	
5	0,1092	956,73	9,55	8,06	7.711,40	
6	0,1093	957,55	23,37	19,72	18.886,96	
7	0,1029	901,51	39,94	33,71	30.389,38	
8	0,0918	804,45	67,81	57,23	46.039,90	
9	0,0780	683,69	99,45	83,94	57.385,77	
10	0,0634	555,25	135,29	114,18	63.401,60	
11	0,0493	431,95	170,27	143,71	62.074,65	
12	0,0368	322,44	202,02	170,50	54.976,78	
13	0,0264	231,26	231,27	195,19	45.139,62	
14	0,0182	159,53	255,74	215,84	34.433,79	
15	0,0121	105,94	275,00	232,10	24.587,61	
16	0,0077	67,76	273,07	230,47	15.616,80	
17	0,0048	41,77	262,07	221,19	9.239,34	
18	0,0028	24,83	233,96	197,46	4.902,72	
19	0,0016	14,23	215,00	181,46	2.583,06	
	0,9756	8.545,95		56,5	482.928,02	2.288,76
				0,27	1.931.712,06	

MORRO DO CAMELINHO			SIMULAÇÃO - 4			
ua=6,7	H=44	1,0	1,235	0,844	8760 h	
<b>v</b>	<b>f</b>	<b>f(h)</b>	<b>pe</b>	<b>pc</b>	<b>ee</b>	<b>uap</b>
2,5	0,0784	687	2,1	1,8	1.218	
3	0,0897	786	4,2	3,5	2.785	
4	0,1058	927	16,3	13,8	12.749	
5	0,1130	990	36,4	30,7	30.404	
6	0,1118	980	65,6	55,4	54.241	
7	0,1039	910	107,7	90,9	82.757	
8	0,0914	800	162,2	136,9	109.561	
9	0,0763	669	234,8	198,2	132.521	
10	0,0608	533	322,4	272,1	145.000	
11	0,0463	406	403,0	340,1	138.071	
12	0,0338	296	461,8	389,8	115.419	
13	0,0236	207	490,9	414,3	85.826	
14	0,0159	139	500,6	422,5	58.768	
15	0,0102	90	503,2	424,7	38.107	
16	0,0064	55,6	504,1	425,5	23.673	
17	0,0038	33,2	504,5	425,8	14.131	
18	0,0022	19,0	503,9	425,3	8.101	
19	0,0012	10,5	505,2	426,4	4.487	
	1,0	8.537		123,9	1.057.818	2.506,7
				0,29	5.289.091,2	

SANTO ANDRÉ			SIMULAÇÃO - 2		250,00	220
Ua=5,5	H=44	1,089	1,235	0,88	8760 h	
v	f	f(h)	pe	pc	ee	uap
2,0	0,0936	820	1,00	0,84	692	
3,0	0,1233	1.080	2,00	1,69	1.824	
4,0	0,1371	1.201	5,00	4,22	5.068	
5,0	0,1357	1.188	9,55	8,06	9.579	
6,0	0,1224	1.072	23,37	19,72	21.141	
7,0	0,1019	892	39,94	33,71	30.077	
8,0	0,0789	691	67,81	57,23	39.534	
9,0	0,0571	500	99,45	83,94	41.951	
10,0	0,0387	339	135,29	114,18	38.719	
11,0	0,0247	216	170,27	143,71	31.074	
12,0	0,0148	130	202,02	170,50	22.136	
13,0	0,0084	73	231,27	195,19	14.345	
14,0	0,0045	39	255,74	215,84	8.474	
15,0	0,0023	20	275,00	232,10	4.598	
16,0	0,0011	9	273,07	230,47	2.178	
17,0	0,0005	4	262,07	221,19	943	
18,0	0,0002	2	233,96	197,46	359	
19,0	0,0001	1	215,00	181,46	133	
	0,9450	8.278		32,96	272.825	1.238
				0,15	1.091.298	

SANTO ANDRÉ			SIMULAÇÃO - 3		250,00	221
Ua=8,2	H=65	1,089	1,235	0,882	8760 h	
v	f	f(h)	pe	pc	ee	uap
2,0	0,0446	391	1,00	0,88	345	
3,0	0,0631	553	2,00	1,76	975	
4,0	0,0775	679	5,00	4,41	2.995	
5,0	0,0872	764	9,55	8,42	6.436	
6,0	0,0920	806	23,37	20,61	16.621	
7,0	0,0923	808	39,94	35,23	28.471	
8,0	0,0885	775	67,81	59,81	46.365	
9,0	0,0816	715	99,45	87,71	62.722	
10,0	0,0726	636	135,29	119,33	75.937	
11,0	0,0625	548	170,27	150,18	82.260	
12,0	0,0521	457	202,02	178,18	81.388	
13,0	0,0422	370	231,27	203,98	75.375	
14,0	0,0331	290	255,74	225,56	65.483	
15,0	0,0253	222	275,00	242,55	53.767	
16,0	0,0188	165	273,07	240,85	39.648	
17,0	0,0136	119	262,07	231,15	27.498	
18,0	0,0096	84	233,96	206,35	17.270	
19,0	0,0065	57	215,00	189,63	10.874	
	0,9633	8.438		82,3	694.427	3.142
				0,37	2.777.709	

SANTO ANDRÉ			SIMULAÇÃO - 4		500,00	441
Ua=5,5	H=44	1,089	1,235	0,882	8760 h	
<i>v</i>	<i>f</i>	<i>f(h)</i>	<i>pe</i>	<i>pc</i>	<i>ee</i>	<i>uap</i>
2,0	0,0936	820	2,1	1,85	1.519	
3,0	0,1233	1.080	4,2	3,70	4.002	
4,0	0,1371	1.201	16,3	14,38	17.266	
5,0	0,1357	1.188	36,4	32,10	38.154	
6,0	0,1224	1.072	65,6	57,86	62.014	
7,0	0,1019	892	107,7	94,99	84.755	
8,0	0,0789	691	162,2	143,06	98.822	
9,0	0,0571	500	234,8	207,09	103.506	
10,0	0,0387	339	322,4	284,36	96.423	
11,0	0,0247	216	403,0	355,45	76.858	
12,0	0,0148	130	461,8	407,31	52.879	
13,0	0,0084	73	490,9	432,97	31.819	
14,0	0,0045	39	500,6	441,53	17.335	
15,0	0,0023	20	503,2	443,82	8.793	
16,0	0,0011	9	504,1	444,62	4.201	
17,0	0,0005	4	504,5	444,97	1.897	
18,0	0,0002	2	503,9	444,44	808	
19,0	0,0001	1	505,2	445,59	327	
	0,9450	8.278		84,72	701.378	1.590
				0,19	2.805.513	

SANTO ANDRÉ			SIMULAÇÃO - 5		500,00	441
Ua=8,2	H=65	1,089	1,235	0,882	8760 h	
<i>v</i>	<i>f</i>	<i>f(h)</i>	<i>pe</i>	<i>pc</i>	<i>ee</i>	<i>uap</i>
2,0	0,0446	391	2,1	1,85	723	
3,0	0,0631	553	4,2	3,70	2.047	
4,0	0,0775	679	16,3	14,38	9.762	
5,0	0,0872	764	36,4	32,10	24.531	
6,0	0,0920	806	65,6	57,86	46.655	
7,0	0,0923	808	107,7	94,99	76.774	
8,0	0,0885	775	162,2	143,06	110.904	
9,0	0,0816	715	234,8	207,09	148.085	
10,0	0,0726	636	322,4	284,36	180.959	
11,0	0,0625	548	403,0	355,45	194.695	
12,0	0,0521	457	461,8	407,31	186.045	
13,0	0,0422	370	490,9	432,97	159.993	
14,0	0,0331	290	500,6	441,53	128.179	
15,0	0,0253	222	503,2	443,82	98.383	
16,0	0,0188	165	504,1	444,62	73.193	
17,0	0,0136	119	504,5	444,97	52.935	
18,0	0,0096	84	503,9	444,44	37.196	
19,0	0,0065	57	505,2	445,59	25.551	
	0,9633	8.438		184,5	1.556.611	3.530
				0,42	6.226.446	

SANTO ANDRÉ			SIMULAÇÃO - 6		500,00	441
12,50	H=100	1,089	1,235	0,882	8760 h	
<i>v</i>	<i>f</i>	<i>f(h)</i>	<i>pe</i>	<i>pc</i>	<i>ee</i>	<i>uap</i>
2,0	0,0197	173	2,1	1,85	320	
3,0	0,0288	253	4,2	3,70	935	
4,0	0,0371	325	16,3	14,38	4.673	
5,0	0,0443	388	36,4	32,10	12.467	
6,0	0,0503	441	65,6	57,86	25.512	
7,0	0,0550	482	107,7	94,99	45.774	
8,0	0,0583	511	162,2	143,06	73.064	
9,0	0,0602	528	234,8	207,09	109.242	
10,0	0,0608	533	322,4	284,36	151.484	
11,0	0,0602	527	403,0	355,45	187.425	
12,0	0,0585	512	461,8	407,31	208.716	
13,0	0,0559	490	490,9	432,97	211.973	
14,0	0,0525	460	500,6	441,53	203.246	
15,0	0,0487	426	503,2	443,82	189.203	
16,0	0,0444	389	504,1	444,62	173.006	
17,0	0,0400	350	504,5	444,97	155.846	
18,0	0,0355	311	503,9	444,44	138.228	
19,0	0,0311	273	505,2	445,59	121.458	
20,00	0,0269	236	505,00	445,41	105.049	238
21,00	0,0230	202	505,00	445,41	89.759	
22,0	0,0194	170	505,0	445,41	75.755	
		7.979	286	286,16	2.283.137	5177
				0,65		

ILHA DO MEL			SIMULAÇÃO 2		250,00	254
Ua=5,2	H=44	1,254	1,235	1,0154	8760 h	
<i>v</i>	<i>f</i>	<i>f(h)</i>	<i>pe</i>	<i>pc</i>	<i>ee</i>	<i>uap</i>
2,0	0,1034	906	1,00	1,02	920	
3,0	0,1342	1.175	2,00	2,03	2.387	
4,0	0,1460	1.279	5,00	5,08	6.493	
5,0	0,1405	1.231	9,55	9,70	11.936	
6,0	0,1225	1.073	23,37	23,73	25.465	
7,0	0,0980	858	39,94	40,56	34.806	
8,0	0,0724	634	67,81	68,85	43.683	
9,0	0,0497	436	99,45	100,98	43.988	
10,0	0,0318	279	135,29	137,37	38.289	
11,0	0,0190	167	170,27	172,89	28.803	
12,0	0,0106	93	202,02	205,13	19.114	
13,0	0,0056	49	231,27	234,83	11.468	
14,0	0,0027	24	255,74	259,68	6.234	
15,0	0,0013	11	275,00	279,24	3.093	
16,0	0,0005	5	273,07	277,28	1.332	
17,0	0,0002	2	262,07	266,11	521	
18,0	0,0001	1	233,96	237,56	178	
19,0	0,00003	0	215,00	218,31	59	
	0,9387	8.223		33,90	278.769	1.098
				0,13	1.115.078	

ILHA DO MEL			SIMULAÇÃO 3		250,00	254
Ua=5,5	H=65	1,254	1,235	1,0154	8760 h	
<i>v</i>	<i>f</i>	<i>f(h)</i>	<i>pe</i>	<i>pc</i>	<i>ee</i>	<i>uap</i>
2,0	0,0936	820	1,00	1,02	833	
3,0	0,1233	1.080	2,00	2,03	2.194	
4,0	0,1371	1.201	5,00	5,08	6.098	
5,0	0,1357	1.188	9,55	9,70	11.524	
6,0	0,1224	1.072	23,37	23,73	25.434	
7,0	0,1019	892	39,94	40,56	36.185	
8,0	0,0789	691	67,81	68,85	47.563	
9,0	0,0571	500	99,45	100,98	50.471	
10,0	0,0387	339	135,29	137,37	46.582	
11,0	0,0247	216	170,27	172,89	37.384	
12,0	0,0148	130	202,02	205,13	26.631	
13,0	0,0084	73	231,27	234,83	17.258	
14,0	0,0045	39	255,74	259,68	10.195	
15,0	0,0023	20	275,00	279,24	5.532	
16,0	0,0011	9	273,07	277,28	2.620	
17,0	0,0005	4	262,07	266,11	1.134	
18,0	0,0002	2	233,96	237,56	432	
19,0	0,0001	1	215,00	218,31	160	
	0,9450	8.278		39,6	328.230	1.292
				0,18	1.312.920	

ILHA DO MEL			SIMULAÇÃO 4		500,00	508
Ua=5,2	H=44	1,254	1,235	1,0154	8760 h	
<i>v</i>	<i>f</i>	<i>f(h)</i>	<i>pe</i>	<i>pc</i>	<i>ee</i>	<i>uap</i>
2,0	0,1034	906	2,1	2,13	1.932	
3,0	0,1342	1.175	4,2	4,26	5.013	
4,0	0,1460	1.279	16,3	16,55	21.168	
5,0	0,1405	1.231	36,4	36,96	45.495	
6,0	0,1225	1.073	65,6	66,61	71.481	
7,0	0,0980	858	107,7	109,36	93.856	
8,0	0,0724	634	162,2	164,70	104.489	
9,0	0,0497	436	234,8	238,42	103.855	
10,0	0,0318	279	322,4	327,36	91.245	
11,0	0,0190	167	403,0	409,21	68.172	
12,0	0,0106	93	461,8	468,91	43.693	
13,0	0,0056	49	490,9	498,46	24.342	
14,0	0,0027	24	500,6	508,31	12.202	
15,0	0,0013	11	503,2	510,95	5.660	
16,0	0,0005	5	504,1	511,86	2.458	
17,0	0,0002	2	504,5	512,27	1.002	
18,0	0,0001	1	503,9	511,66	384	
19,0	0,00003	0	505,2	512,98	139	
	0,9387	8.223		84,71	696.585	1.372
				0,33	2.786.342	



ILHA DO MEL			SIMULAÇÃO 5		500,00	508
Ua=5,2	H=65	1,254	1,235	1,0154	8760 h	
<i>v</i>	<i>f</i>	<i>f(h)</i>	<i>pe</i>	<i>pc</i>	<i>ee</i>	<i>uap</i>
2,0	0,0936	820	2,1	2,13	1.749	
3,0	0,1233	1.080	4,2	4,26	4.607	
4,0	0,1371	1.201	16,3	16,55	19.878	
5,0	0,1357	1.188	36,4	36,96	43.925	
6,0	0,1224	1.072	65,6	66,61	71.394	
7,0	0,1019	892	107,7	109,36	97.574	
8,0	0,0789	691	162,2	164,70	113.769	
9,0	0,0571	500	234,8	238,42	119.161	
10,0	0,0387	339	322,4	327,36	111.006	
11,0	0,0247	216	403,0	409,21	88.482	
12,0	0,0148	130	461,8	468,91	60.877	
13,0	0,0084	73	490,9	498,46	36.632	
14,0	0,0045	39	500,6	508,31	19.957	
15,0	0,0023	20	503,2	510,95	10.123	
16,0	0,0011	9	504,1	511,86	4.837	
17,0	0,0005	4	504,5	512,27	2.183	
18,0	0,0002	2	503,9	511,66	931	
19,0	0,00008	1	505,2	512,98	377	
	0,9450	8.278		97,54	807.460	1.590
				0,38	3.229.839	

ILHA DO MEL			SIMULAÇÃO 6		500,00	508
Ua=5,8	H=100 m	1,254	1,235	1,0154	8760 h	
<i>v</i>	<i>f</i>	<i>f(h)</i>	<i>pe</i>	<i>pc</i>	<i>ee</i>	<i>uap</i>
2,0	0,0851	745	2,1	2,13	1.589	
3,0	0,1135	995	4,2	4,26	4.242	
4,0	0,1286	1.126	16,3	16,55	18.639	
5,0	0,1302	1.141	36,4	36,96	42.168	
6,0	0,1209	1.059	65,6	66,61	70.540	
7,0	0,1041	912	107,7	109,36	99.743	
8,0	0,0838	734	162,2	164,70	120.953	
9,0	0,0634	556	234,8	238,42	132.447	
10,0	0,0452	396	322,4	327,36	129.672	
11,0	0,0305	267	403,0	409,21	109.199	
12,0	0,0194	170	461,8	468,91	79.790	
13,0	0,0117	103	490,9	498,46	51.258	
14,0	0,0067	59	500,6	508,31	29.969	
15,0	0,0037	32	503,2	510,95	16.400	
16,0	0,0019	17	504,1	511,86	8.498	
17,0	0,0009	8	504,5	512,27	4.182	
18,0	0,0004	4	503,9	511,66	1.953	
19,0	0,00019	2	505,2	512,98	871	
	0,9503	8.325		110,76	922.113	1.816
				0,44	3.688.453	

PALMAS			SIMULAÇÃO 1		250	218
Ua=7,2	H=30	1,078	1,235	0,873	8760 h	
<b>v</b>	<b>f(h=30)</b>	<b>f(h)</b>	<b>pe</b>	<b>pc</b>	<b>ee</b>	<b>uap</b>
3	0,0793	725	1,0	0,9	633	
3	0,0951	827	2,0	1,7	1.443	
4	0,1037	968	5,0	4,4	4.223	
5	0,1054	1.023	9,6	8,3	8.530	
6	0,1010	1.001	23,4	20,4	20.417	
7	0,0919	917	39,9	34,9	31.969	
8	0,0799	793	67,8	59,2	46.936	
9	0,0666	650	99,5	86,8	56.458	
10	0,0533	508	135	118,1	59.945	
11	0,0410	378	170	148,6	56.167	
12	0,0304	269	202	176,4	47.407	
13	0,0218	183	231	201,9	36.940	
14	0,0150	119	256	223,3	26.631	
15	0,0100	74,5	275	240,1	17.896	
16	0,0065	44,7	273	238,4	10.653	
17	0,0040	25,7	262	228,8	5.882	
18	0,0024	14,2	234	204,2	2.901	
19	0,0009	7,5	215	187,7	1.414	
	0,9733	8.526,02		49,5	436.445	2.002
				0,23		

PALMAS			SIMULAÇÃO 2		250,00	220
k=2						
Ua=7,6	H=44	1,089	1,235	0,882	8760 h	
<b>v</b>	<b>f</b>	<b>f(h)</b>	<b>pe</b>	<b>pc</b>	<b>ee</b>	<b>uap</b>
2,0	0,0722	632	1,00	0,88	558	
3,0	0,0875	767	2,00	1,76	1.352	
4,0	0,0968	848	5,00	4,41	3.739	
5,0	0,1000	876	9,55	8,42	7.379	
6,0	0,0978	857	23,37	20,61	17.655	
7,0	0,0911	798	39,94	35,23	28.120	
8,0	0,0814	713	67,81	59,81	42.625	
9,0	0,0698	612	99,45	87,71	53.646	
10,0	0,0577	506	135,29	119,33	60.336	
11,0	0,0461	403	170,27	150,18	60.591	
12,0	0,0355	311	202,02	178,18	55.437	
13,0	0,0265	232	231,27	203,98	47.344	
14,0	0,0191	168	255,74	225,56	37.814	
15,0	0,0134	117	275,00	242,55	28.454	
16,0	0,0091	80	273,07	240,85	19.166	
17,0	0,0060	52	262,07	231,15	12.101	
18,0	0,0038	33	233,96	206,35	6.895	
19,0	0,0024	21	215,00	189,63	3.925	
	0,0014	8.025		60,70	487.136	2.210
	0,00			0,28	1.948.542	

PALMAS			SIMULAÇÃO 3		250,00	220
Ua=8,1	H=65	1,089	1,235	0,882	8760 h	
<b>v</b>	<b>f(h=65)</b>	<b>f(h)</b>	<b>pe</b>	<b>pc</b>	<b>ee</b>	<b>uap</b>
2,0	0,0456	400	1,00	0,88	353	
3,0	0,0645	565	2,00	1,76	997	
4,0	0,0791	693	5,00	4,41	3.055	
5,0	0,0887	777	9,55	8,42	6.548	
6,0	0,0934	818	23,37	20,61	16.857	
7,0	0,0932	817	39,94	35,23	28.766	
8,0	0,0890	780	67,81	59,81	46.643	
9,0	0,0817	716	99,45	87,71	62.786	
10,0	0,0723	634	135,29	119,33	75.597	
11,0	0,0619	542	170,27	150,18	81.395	
12,0	0,0513	449	202,02	178,18	79.996	
13,0	0,0412	361	231,27	203,98	73.551	
14,0	0,0321	281	255,74	225,56	63.399	
15,0	0,0243	213	275,00	242,55	51.619	
16,0	0,0179	157	273,07	240,85	37.724	
17,0	0,0128	112	262,07	231,15	25.914	
18,0	0,0089	78	233,96	206,35	16.111	
19,0	0,0060	53	215,00	189,63	10.036	
	0,0014	8.444		80,69	681.347	3.091
	0,00			0,37	2.725.386	

PALMAS			SIMULAÇÃO 4		500,00	441
Ua=7,6	H=44	1,089	1,235	0,882	8760 h	
<b>v</b>	<b>f(h44)</b>	<b>f(h)</b>	<b>pe</b>	<b>pc</b>	<b>ee</b>	<b>uap</b>
2,0	0,0722	632	2,1	1,85	1.171	
3,0	0,0875	767	4,2	3,70	2.840	
4,0	0,0968	848	16,3	14,38	12.190	
5,0	0,1000	876	36,4	32,10	28.127	
6,0	0,0978	857	65,6	57,86	49.557	
7,0	0,0911	798	107,7	94,99	75.828	
8,0	0,0814	713	162,2	143,06	101.959	
9,0	0,0698	612	234,8	207,09	126.656	
10,0	0,0577	506	322,4	284,36	143.782	
11,0	0,0461	403	403,0	355,45	143.410	
12,0	0,0355	311	461,8	407,31	126.723	
13,0	0,0265	232	490,9	432,97	100.493	
14,0	0,0191	168	500,6	441,53	74.018	
15,0	0,0134	117	503,2	443,82	52.066	
16,0	0,0091	80	504,1	444,62	35.382	
17,0	0,0060	52	504,5	444,97	23.295	
18,0	0,0038	33	503,9	444,44	14.850	
19,0	0,0024	21	505,2	445,59	9.222	
	0,0014	8.025		139,75	1.121.566	2.544
	0,00			0,32	4.486.266	

PALMAS			SIMULAÇÃO 5		500,00	441
Ua=8,1	H=65	1,089	1,235	0,882	8760 h	
<b>v</b>	<b>f(h=65)</b>	<b>f(h)</b>	<b>pe</b>	<b>pc</b>	<b>ee</b>	<b>uap</b>
2,0	0,0456	400	2,1	1,85	741	
3,0	0,0645	565	4,2	3,70	2.093	
4,0	0,0791	693	16,3	14,38	9.958	
5,0	0,0887	777	36,4	32,10	24.959	
6,0	0,0934	818	65,6	57,86	47.317	
7,0	0,0932	817	107,7	94,99	77.570	
8,0	0,0890	780	162,2	143,06	111.568	
9,0	0,0817	716	234,8	207,09	148.238	
10,0	0,0723	634	322,4	284,36	180.151	
11,0	0,0619	542	403,0	355,45	192.648	
12,0	0,0513	449	461,8	407,31	182.864	
13,0	0,0412	361	490,9	432,97	156.120	
14,0	0,0321	281	500,6	441,53	124.101	
15,0	0,0243	213	503,2	443,82	94.454	
16,0	0,0179	157	504,1	444,62	69.641	
17,0	0,0128	112	504,5	444,97	49.886	
18,0	0,0089	78	503,9	444,44	34.700	
19,0	0,0060	53	505,2	445,59	23.581	
	0,0014	8.444		181,27	1.530.589	3.472
	0,00			0,41	6.122.357	

PALMAS			SIMULAÇÃO 6		500,00	441
Ua=8,6	H=100	1,089	1,235	0,882	8760 h	
<b>v</b>	<b>f(h=65)</b>	<b>f(h)</b>	<b>pe</b>	<b>pc</b>	<b>ee</b>	<b>uap</b>
2,0	0,0407	357	2,1	1,85	661	
3,0	0,0579	507	4,2	3,70	1.879	
4,0	0,0717	628	16,3	14,38	9.027	
5,0	0,0814	713	36,4	32,10	22.902	
6,0	0,0869	762	65,6	57,86	44.068	
7,0	0,0884	774	107,7	94,99	73.524	
8,0	0,0861	754	162,2	143,06	107.914	
9,0	0,0809	708	234,8	207,09	146.715	
10,0	0,0734	643	322,4	284,36	182.938	
11,0	0,0646	566	403,0	355,45	201.260	
12,0	0,0552	484	461,8	407,31	197.070	
13,0	0,0459	402	490,9	432,97	174.031	
14,0	0,0371	325	500,6	441,53	143.479	
15,0	0,0292	256	503,2	443,82	113.568	
16,0	0,0224	196	504,1	444,62	87.316	
17,0	0,0168	147	504,5	444,97	65.400	
18,0	0,0123	107	503,9	444,44	47.694	
19,0	0,0087	76	505,2	445,59	34.074	
20,00	0,0061	53	505,00	445,41	23.696	
21,00	0,0041	36	505,00	445,41	16.098	
		8.496		199,3	1.693.312	3841
				0,45		

MORRO PERDIDOS			SIMULAÇÃO 1		250	209
Ua=7,6	H=30	1,031	1,235	0,835	8760 h	
<b>v</b>	<b>f(h=30)</b>	<b>f(h)</b>	<b>pe</b>	<b>pc</b>	<b>ee</b>	<b>uap</b>
2	0,0515	451	1,0	0,8	377	
3	0,0722	632	2,0	1,7	1.056	
4	0,0875	767	5,0	4,2	3.201	
5	0,0968	848	9,6	8,0	6.761	
6	0,1000	876	23,4	19,5	17.096	
7	0,0978	857	39,9	33,3	28.564	
8	0,0911	798	67,8	56,6	45.198	
9	0,0814	713	99,5	83,0	59.183	
10	0,0698	612	135	113,0	69.090	
11	0,0577	506	170	142,2	71.889	
12	0,0461	403	202	168,7	68.059	
13	0,0355	311	231	193,1	60.081	
14	0,0265	232	256	213,5	49.563	
15	0,0191	168	275	229,6	38.495	
16	0,0134	117	273	228,0	26.749	
17	0,0091	80	262	218,8	17.414	
18	0,0060	52	234	195,4	10.227	
19	0,0038	33	215	179,5	5.998	
	0,9733	8.456		68,5	579.002	2.774
				0,33		

MORRO PERDIDOS			SIMULAÇÃO 2		250	209
Ua=8,0	H=44	1,031	1,235	0,835	8760 h	
<b>v</b>	<b>f(h=30)</b>	<b>f(h)</b>	<b>pe</b>	<b>pc</b>	<b>ee</b>	<b>uap</b>
2	0,0467	409	1,0	0,8	342	
3	0,0659	578	2,0	1,7	965	
4	0,0807	707	5,0	4,2	2.950	
5	0,0903	791	9,6	8,0	6.308	
6	0,0947	829	23,4	19,5	16.184	
7	0,0942	825	39,9	33,3	27.510	
8	0,0895	784	67,8	56,6	44.404	
9	0,0817	716	99,5	83,0	59.468	
10	0,0719	630	135	113,0	71.193	
11	0,0612	536	170	142,2	76.169	
12	0,0503	441	202	168,7	74.344	
13	0,0401	351	231	193,1	67.841	
14	0,0310	272	256	213,5	58.004	
15	0,0233	204	275	229,6	46.816	
16	0,0170	149	273	228,0	33.896	
17	0,0120	105	262	218,8	23.054	
18	0,0083	73	234	195,4	14.183	
19	0,0056	49	215	179,5	8.737	
	0,9733	8.447,98		74,9	632.365	3.030
				0,36		

MORRO PERDIDOS			SIMULAÇÃO 3		250	209
Ua=8,5	H=65	1,031	1,235	0,835	8760 h	
<b>v</b>	<b>f(h=30)</b>	<b>f(h)</b>	<b>pe</b>	<b>pc</b>	<b>ee</b>	<b>uap</b>
2	0,0416	365	1,0	0,8	305	
3	0,0591	518	2,0	1,7	865	
4	0,0731	640	5,0	4,2	2.673	
5	0,0828	726	9,6	8,0	5.787	
6	0,0882	773	23,4	19,5	15.077	
7	0,0893	783	39,9	33,3	26.100	
8	0,0867	760	67,8	56,6	43.024	
9	0,0811	711	99,5	83,0	59.009	
10	0,0733	642	135	113,0	72.550	
11	0,0642	562	170	142,2	79.939	
12	0,0545	478	202	168,7	80.579	
13	0,0450	394	231	193,1	76.152	
14	0,0361	317	256	213,5	67.620	
15	0,0283	248	275	229,6	56.842	
16	0,0215	189	273	228,0	42.982	
17	0,0160	140	262	218,8	30.617	
18	0,0116	101	234	195,4	19.782	
19	0,0082	71	215	179,5	12.834	
	0,9733	8.416,25		82,3	692.737	3.319
				0,39		

MORRO PERDIDOS			SIMULAÇÃO 4		500	417
Ua=8,0	H=44	1,031	1,235	0,835	8760 h	
<b>v</b>	<b>f(h=30)</b>	<b>f(h)</b>	<b>pe</b>	<b>pc</b>	<b>ee</b>	<b>uap</b>
2	0,0467	409	2,1	1,8	718	
3	0,0659	578	4,2	3,5	2.026	
4	0,0807	707	16,3	13,6	9.618	
5	0,0903	791	36,4	30,4	24.042	
6	0,0947	829	65,6	54,8	45.428	
7	0,0942	825	107,7	89,9	74.181	
8	0,0895	784	162,2	135,4	106.213	
9	0,0817	716	234,8	196,1	140.402	
10	0,0719	630	322,4	269,2	169.655	
11	0,0612	536	403,0	336,5	180.280	
12	0,0503	441	461,8	385,6	169.943	
13	0,0401	351	490,9	409,9	144.001	
14	0,0310	272	500,6	418,0	113.540	
15	0,0233	204	503,2	420,2	85.665	
16	0,0170	149	504,1	420,9	62.574	
17	0,0120	105	504,5	421,3	44.380	
18	0,0083	73	503,9	420,8	30.546	
19	0,0056	49	505,2	421,8	20.529	
	0,9733	8.447,98		168,5	1.423.740	3.411
				0,40		

MORRO PERDIDOS			SIMULAÇÃO 5		500	417
Ua=8,5	H=65	1,031	1,235	0,835	8760 h	
<i>v</i>	<i>f(h=30)</i>	<i>f(h)</i>	<i>pe</i>	<i>pc</i>	<i>ee</i>	<i>uap</i>
2	0,0416	365	2,1	1,8	639	
3	0,0591	518	4,2	3,5	1.817	
4	0,0731	640	16,3	13,6	8.713	
5	0,0828	726	36,4	30,4	22.056	
6	0,0882	773	65,6	54,8	42.322	
7	0,0893	783	107,7	89,9	70.381	
8	0,0867	760	162,2	135,4	102.912	
9	0,0811	711	234,8	196,1	139.319	
10	0,0733	642	322,4	269,2	172.888	
11	0,0642	562	403,0	336,5	189.202	
12	0,0545	478	461,8	385,6	184.196	
13	0,0450	394	490,9	409,9	161.643	
14	0,0361	317	500,6	418,0	132.364	
15	0,0283	248	503,2	420,2	104.010	
16	0,0215	189	504,1	420,9	79.346	
17	0,0160	140	504,5	421,3	58.939	
18	0,0116	101	503,9	420,8	42.607	
19	0,0082	71	505,2	421,8	30.158	
20	0,0056	49	505,0	421,7	20.767	
21	0,0038	33	505,0	421,7	13.964	
22	0,0025	22	505,0	421,7	9.167	
	0,9726	8.520		186,3	1.587.411	3803,0128
				0,45		

MORRO PERDIDOS			SIMULAÇÃO 6		500	417
Ua=9,0	H=100	1,031	1,235	0,835	8760 h	
<i>v</i>	<i>f(h=30)</i>	<i>f(h)</i>	<i>pe</i>	<i>pc</i>	<i>ee</i>	<i>uap</i>
2	0,0373	327	2,1	1,8	573	
3	0,0533	467	4,2	3,5	1.638	
4	0,0664	582	16,3	13,6	7.919	
5	0,0761	667	36,4	30,4	20.259	
6	0,0821	719	65,6	54,8	39.381	
7	0,0844	739	107,7	89,9	66.496	
8	0,0834	731	162,2	135,4	98.960	
9	0,0796	697	234,8	196,1	136.670	
10	0,0735	644	322,4	269,2	173.427	
11	0,0660	578	403,0	336,5	194.530	
12	0,0576	505	461,8	385,6	194.568	
13	0,0490	429	490,9	409,9	175.831	
14	0,0406	356	500,6	418,0	148.621	
15	0,0328	288	503,2	420,2	120.830	
16	0,0259	227	504,1	420,9	95.595	
17	0,0200	175	504,5	421,3	73.815	
18	0,0151	132	503,9	420,8	55.599	
19	0,0111	97	505,2	421,8	41.101	
20	0,0080	70	505,0	421,7	29.630	
21	0,0057	50	505,0	421,7	20.906	
22	0,0039	34	505,0	421,7	14.434	
	0,9718	8.513		201,0	1.710.785	4099
				0,48		