

**Rafael José Pauliello**

**Análise técnica do aproveitamento eólico e solar para a conversão em energia elétrica**

Trabalho de conclusão do curso de graduação do  
Departamento de Engenharia Mecânica da Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. José R. Simões Moreira

**São Paulo**

**2006**

**Rafael José Pauliello**

**Análise técnica do aproveitamento eólico e solar para a conversão em energia  
elétrica**

**São Paulo  
2006**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Pauliello, Rafael José**

**Análise de viabilidade técnico-econômica do aproveitamento eólico e solar para a conversão em energia elétrica, por R.J.Pauliello. São Paulo: EPUSP, 2006 68p.**

**Trabalho de conclusão de curso - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Fontes Alternativas 2.Energia Eólica 3. Energia Solar I.Pauliello. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica III.t.**

## **AGRADECIMENTOS**

Dentre as possíveis manifestações e formas de expressão da razão, certamente a paciência constitui uma das mais difíceis. Agradeço a meu orientador e família, pelas inúmeras demonstrações ao longo da realização deste estudo.

## **RESUMO**

O presente trabalho tem como principais objetivos identificar e descrever as tecnologias disponíveis para conversão das fontes eólica e solar em energia elétrica. Além disso, é desejado avaliar a viabilidade técnica e comercial e desenvolver um modelo matemático da eficiência de conversão daquelas que demonstrarem uma adequada aplicação em plantas de grande escala. Também é desejado caracterizar os regimes eólico e solar sobre o território brasileiro, usando suas médias anuais e finalmente, obter equações que permitam avaliar a variação temporal e espacial do fluxo de radiação e velocidade do vento.

## **ABSTRACT**

The present work has how main objectives to identify and to describe the available technologies for conversion of wind and solar sources in electric energy. Also, is wished to evaluate the technical and commercial viability and to develop the mathematical model of conversion's efficiency from that who demonstration a adequate application in plants of large size. Too is wished to characterize the wind and insolation regime at the brazilian territory, using your annual average and finally, to obtain equations who permit to appraise the temporal and spatial variation of radiation flux and wind velocity.

# SUMÁRIO

## LISTA DE FIGURAS

## LISTA DE TABELAS

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Projeção da demanda futura de energia elétrica .....	1
1.2	Perspectiva das fontes não renováveis .....	4
1.3	Perspectiva das fontes poluentes .....	6
1.4	Perspectiva das fontes verdes .....	8
<b>2</b>	<b>CÉLULAS FOTOVOLTAICAS .....</b>	<b>11</b>
2.1	Silício monocristalino (m-Si) .....	13
2.2	Silício policristalino (p-Si) .....	14
2.3	Silício amorfo hidrogenado (a-Si) .....	14
<b>3</b>	<b>COLETORES SOLARES .....</b>	<b>16</b>
3.1	Coletor tipo placa plana (PP) .....	16
3.2	Coletor tipo calha parabólica (CP) .....	18
3.3	Coletor tipo parabolóide de revolução (PR) .....	20
3.4	Heliostatos e torre central (H&TC) .....	23
<b>4</b>	<b>TURBINAS EÓLICAS .....</b>	<b>24</b>
4.1	Turbina de eixo horizontal (HAWT) .....	24
4.2	Turbina de eixo vertical (VAWT) .....	27
<b>5</b>	<b>SISTEMAS HÍBRIDOS .....</b>	<b>28</b>
5.1	Torre solar .....	28

<b>6</b>	<b>MODELAMENTO DAS EFICIÊNCIAS ENERGÉTICAS .....</b>	<b>30</b>
6.1	Células fotovoltaicas .....	30
6.2	Coletores solares .....	30
6.3	Turbinas eólicas .....	41
<b>7</b>	<b>DADOS CLIMATOLÓGICOS .....</b>	<b>49</b>
7.1	Perfis de insolação .....	49
7.2	Caracterização da insolação sobre o território brasileiro .....	51
7.3	Distribuição de velocidades associadas aos ventos .....	52
7.4	Caracterização dos ventos atuantes no ter. brasileiro .....	57
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>



## LISTA DE TABELAS

Tab. 1.1.1 – Demandas anuais de energia elétrica no Brasil .....	2
Tab. 1.1.2 – Populações, consumos e emissões de CO <sub>2</sub> .....	3
Tab. 1.1.3 – Demandas projetadas para 2050 .....	3
Tab. 1.2.1 – Reservas minerais brasileiras em 2004 .....	5
Tab. 1.2.2 – Resultados da simulação de esgotamento de recursos minerais .....	6
Tab. 1.3.1 – Resultados da simulação de comercialização de créditos carbono .....	8
Tab. 7.1.1 – Fatores de correção temporais anuais .....	49
Tab. 7.3.1 – Rugosidade superficial para diversos tipos de terreno .....	54

## LISTA DE FIGURAS

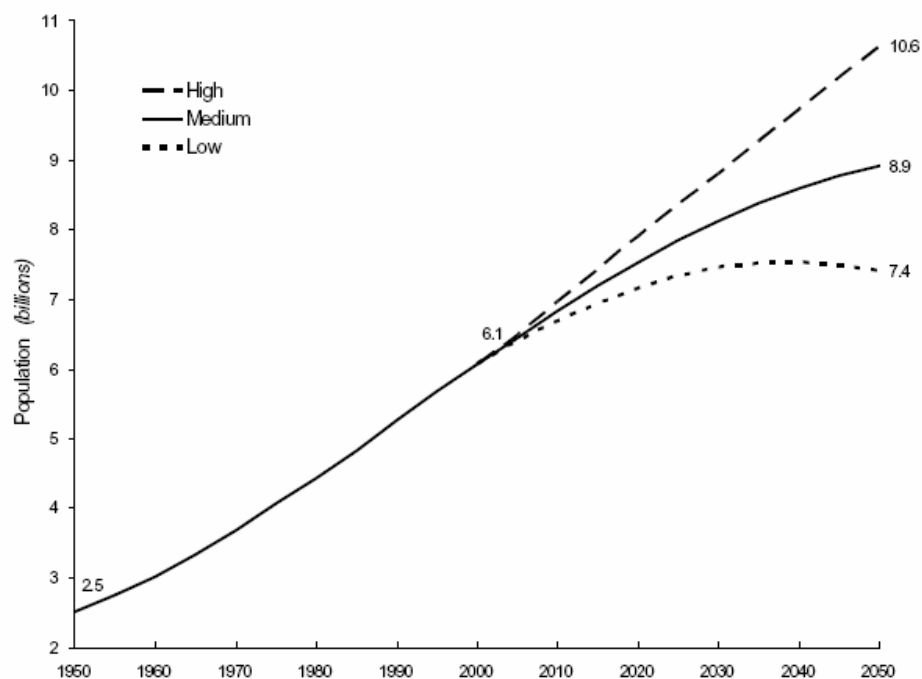
Fig. 1.1.1 – População mundial estimada (1951-2000) e projetada (2001-2050) .....	1
Fig. 1.1.2 – População brasileira estimada (1980-2005) .....	4
Fig. 1.2.1 – Participação das fontes primárias na demanda global .....	4
Fig. 1.2.2 – Participação das fontes primárias na demanda brasileira .....	5
Fig. 1.4.1 – Capacidade instalada de geração (GW) .....	9
Fig. 1.4.2 – Potencial hidrelétrico total (GW) .....	9
Fig. 2.0.1 – Teoria das bandas de energia .....	11
Fig. 2.0.2 – Curva característica de célula fotovoltaica .....	12
Fig. 2.0.3 – Associação de módulos fotovoltaicos .....	13
Fig. 2.1.1 – Etapas de fabricação de waffers de m-Si .....	14
Fig. 2.3.1 – Exemplo de aplicação do a-Si .....	15
Fig. 3.1.1 – Componentes do coletor tipo Placa Plana .....	17
Fig. 3.1.2 – Planta comercial utilizando coletores tipo Placa Plana .....	18
Fig. 3.2.1 – Detalhes da instalação do coletor tipo Calha Parabólica .....	18
Fig. 3.2.2 – Detalhe da junta elástica .....	19
Fig. 3.3.1 – Coletores tipo Parabolóide de Revolução I .....	20
Fig. 3.3.2 – Coletores tipo Parabolóide de Revolução II .....	21
Fig. 3.3.3 – Estágios do motor Stirling .....	22
Fig. 3.4.1 – Vista de instalação do tipo Heliostatos e Torre Central .....	23
Fig. 4.1.1 – Detalhes das pás, rotor e cubo de uma HAWT .....	24
Fig. 4.1.2 – Detalhamento da transmissão de uma HAWT .....	25
Fig. 4.1.3 – Detalhamento do sistema Yaw de uma HAWT .....	26
Fig. 4.2.1 – Exemplo de rotor Darrieus e Savonius .....	27
Fig. 5.1.1 – Vista artística de uma instalação do tipo Torre Solar .....	28
Fig. 5.1.2 – Croqui de uma Torre Solar .....	29
Fig. 6.2.1 – Ângulo de refração .....	32
Fig. 6.2.2 – Absorção pura em uma placa translúcida .....	33
Fig. 6.2.3 – Múltiplas reflexões, absorções e transmissões em uma placa translúcida .....	33

Fig. 6.2.4 – Múltiplas reflexões, absorções e transmissões em um sistema composto por placas translúcida e absorvedora .....	35
Fig. 6.2.5 – Seção transversal dos tubos concêntricos .....	37
Fig. 6.2.6 – Diagrama equivalente do circuito térmico .....	37
Fig. 6.2.7 – Arranjo físico de um ciclo Rankine .....	40
Fig. 6.2.8 – Representação do ciclo Rankine no diagrama T-s .....	40
Fig. 6.3.1 – Triângulo de velocidades em um rotor Panemone .....	42
Fig. 6.3.2 – Volume de controle ao redor do disco atuador .....	43
Fig. 6.3.3 – Forças aerodinâmicas atuantes sobre as pás .....	46
Fig. 6.3.4 – Variação da eficiência aerodinâmica devido a $\phi$ .....	48
Fig. 7.1.1 – Movimento de translação da Terra ao redor do Sol .....	49
Fig. 7.1.2 – Ângulo de altitude .....	50
Fig. 7.1.3 – Variação sazonal diária .....	50
Fig. 7.2.1 – Média anual de insolação diária .....	51
Fig. 7.4.1 – Velocidades médias anuais sobre a região Norte .....	58
Fig. 7.4.2 – Velocidades médias anuais sobre a região Nordeste .....	59
Fig. 7.4.3 – Velocidades médias anuais sobre a região Sudeste .....	60
Fig. 7.4.4 – Velocidades médias anuais sobre a região Sul .....	61
Fig. 7.4.5 – Velocidades médias anuais sobre a região Centro-Oeste .....	62
Fig. 7.4.6 – Direções predominantes anuais sobre o terr. brasileiro .....	63
Fig. 7.4.7 – Fatores de forma de Weibull médios anuais sobre o território brasileiro .....	64

## 1 INTRODUÇÃO

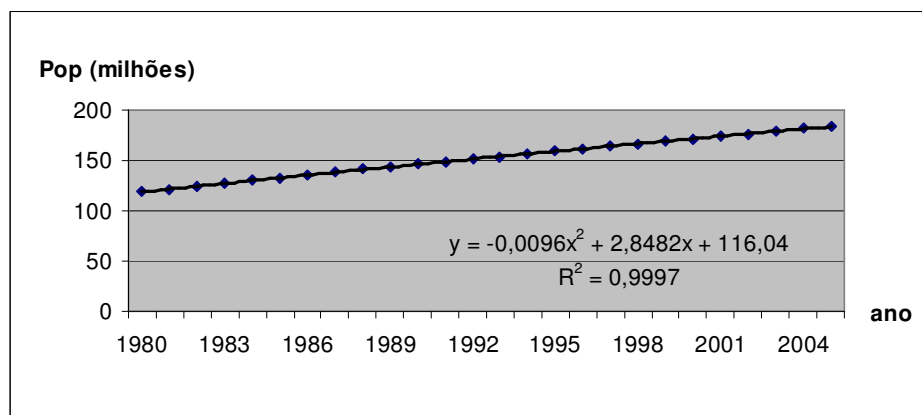
### 1.1 Projeção da Demanda Futura de Energia Elétrica

Segundo o Departamento de Economia e Bem-Estar Social da ONU (2004), baseando-se em censos demográficos bem conduzidos de diversas nações, na primeira metade do século XXI (2001 a 2050), a população mundial deverá crescer segundo uma taxa média de 0,77% ao ano, bem inferior aos 1,76% dos 50 anos anteriores, promovendo um salto dos então 6,1 bilhões para 8,9 bilhões de habitantes. Embora este seja o cenário de maior probabilidade, o campo de incertezas desta projeção se estende desde um cenário de taxa de crescimento nula (estabilização da população mundial) até um cenário com manutenção da taxa de crescimento do século XX, resultando em populações projetadas de 7,4 e 10,6 bilhões respectivamente, como demonstra a figura 1.1.1.



**Fig. 1.1.1 – População mundial estimada (1951-2000) e projetada (2001-2050)**

Particularmente para o Brasil, dispõem-se do tamanho da população atualizado com uma frequência elevadíssima, através dos registros de nascimentos e óbitos expedidos pelos cartórios e corrigidos por fatores obtidos através dos censos demográficos. Plotando-se dados de 1980 a 2005 fornecidos pelo IBGE (2004), obtêm-se por regressão a função quadrática apresentada na figura 1.1.2, demonstrando que o crescimento nos últimos 25 anos têm ocorrido a uma taxa praticamente constante (ligeiramente atenuado). Considerando a maior exatidão da população estimada (1980 a 2005) e reduzido desvio em relação a linha de tendência ( $R^2=0,9997$ ), a população futura foi projetada diretamente a partir destes dados, aumentando dos atuais 184,2 para 269,9 milhões em 2050.



**Fig. 1.1.2 – População Brasileira estimada (1980-2005)**

Conforme o Ministério das Minas e Energia (2004), no ano de 2002 o Brasil apresentou um consumo final de energia elétrica de 324,37 TWh, demonstrado na tabela 1.1.1.

UNIDADE: GWh

IDENTIFICAÇÃO	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
PRODUÇÃO	275601	291244	307980	321748	334716	348909	328509	345671	364941
CONSUMO FINAL	264805	277685	294689	307030	315753	331638	309729	324365	341866

**Tab. 1.1.1 – Demandas anuais de Energia Elétrica no Brasil**

Salvo ajustes estatísticos, não somente tal valor (consumo final anual de energia elétrica) como a população nacional e mundial estimadas para o ano de 2002, são reproduzidas pela International Energy Agency (2004) e apresentadas na tabela 1.1.2, onde ainda obtêm-se os respectivos consumo de energia elétrica e emissões de CO<sub>2</sub> (relativa a toda atividade humana) per capita.

Region/ Country	Popul- ation (million)	TPES (Mtoe)	Elec. Cons. * (TWh)	CO <sub>2</sub> Emissions** (Mt of CO <sub>2</sub> )	TPES/ Pop (toe/capita)	Elec. Cons./Pop (kWh/ capita)	CO <sub>2</sub> / Pop (t CO <sub>2</sub> / capita)
World	6195.66	10230.67	14701.24	24101.83	1.65	2373	3.89
Brazil	174.49	190.66	321.55	309.31	1.09	1843	1.77

**Tab. 1.1.2 – Populações, consumos e emissões de CO<sub>2</sub>**

Utilizando as populações projetadas para 2050 e supondo o grau de industrialização e dependência de eletricidade nas atividades domésticas se mantenha o mesmo (cenário mais otimista possível), pode-se determinar quais as demandas futuras totais e novas, conforme apresentado na tabela 1.1.3.

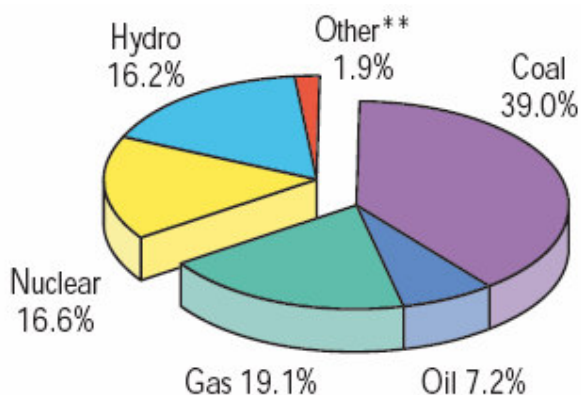
Mercado	Ano	População	Consumo Energia	Emissão
		(milhões)	Elétrica (TWh)	CO <sub>2</sub> (Mton)
Planeta	2002	6195,66	14701,24	24101,83
	2050	8900,00	21118,18	34622,02
	2050-2002	2704,34	<b>6416,94</b>	<b>10520,19</b>
Brasil	2002	174,49	321,55	309,31
	2050	269,90	497,37	478,44
	2050-2002	95,41	<b>175,82</b>	<b>169,13</b>

**Tab. 1.1.3 – Demandas projetadas para 2050**

## 1.2 Perspectiva das Fontes Não-Renováveis

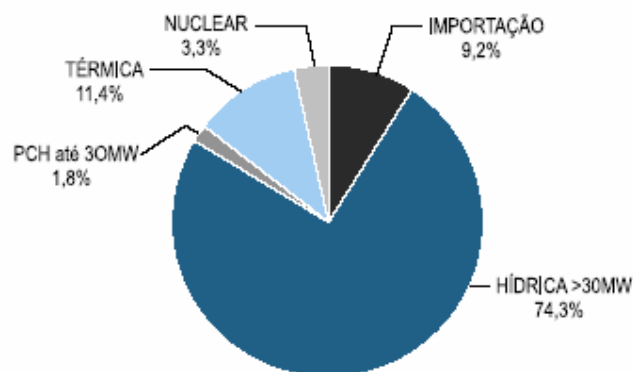
Quanto ao aspecto ambiental, podemos classificar as fontes energéticas segundo dois critérios principais. O primeiro deles, diz respeito à possibilidade de esgotamento do insumo energético, nomeando então as fontes em renováveis e não-renováveis. O outro se relaciona com a geração de rejeitos durante o processo de conversão, classificando-as em fontes poluentes (também ditas sujas) ou não poluentes (limpas). Finalmente cabe mencionar que as fontes renováveis limpas, são também denominadas de fontes verdes, devido aos seu reduzido impacto ambiental.

Cerca de 74,2% da demanda global é atualmente atendida a partir de fontes energéticas primárias não renováveis, conforme demonstra a figura 1.2.1 fornecida pela International Energy Agency (2004). A classificação outras abrange Combustíveis Renováveis, Geotérmica, Eólica e Solar.



**Fig. 1.2.1 – Participação das fontes primárias na demanda global**

Neste aspecto, como decorrência de uma Hidrologia privilegiada, o choque da crise do Petróleo na década de 70 e políticas estratégicas adequadas, a matriz energética do Brasil se difere bastante dos chamados países industrializados. Segundo o Ministério de Minas e Energia (2004), apenas cerca de 14,7% da demanda nacional é atualmente atendida a partir de fontes energéticas primárias não renováveis, conforme figura 1.2.2.



**Fig. 1.2.2 – Participação das fontes primárias na demanda Brasileira**

As atuais reservas minerais Brasileiras inventariadas e estimadas, assim como sua equivalência energética são apresentadas na tabela 1.2.1.

ESPECIFICAÇÃO	UNIDADES	MEDIDAS/ INDICADAS/ INVENTARIADAS	INFERIDAS/ ESTIMADAS	TOTAL	EQUIVALÊNCIA ENERGÉTICA 10 <sup>9</sup> tep (5)
PETRÓLEO	10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	1.685.518	459.783	2.145.301	1.500.111
GÁS NATURAL	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	245.340	106.275	351.615	243.623
CARVÃO MINERAL - in situ	10 <sup>6</sup> t	10.108	22.240	32.348	3.944.070 (2)
HIDRÁULICA	GW ano (3)	93	51	144	236.003 /ano
ENERGIA NUCLEAR	t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	177.500	131.870	309.370	1.236.287 (4)

**Tab. 1.2.1 – Reservas minerais Brasileiras em 2004**

Afim de se avaliar a possível duração destas reservas, foi realizada uma simulação tomando as seguintes considerações:

- A demanda crescerá conforme anteriormente explicado, sendo o acréscimo anual atendido por usinas que utilizem exclusivamente uma das fontes primárias não renováveis como insumo.
- No decorrer do tempo não sejam descobertas novas reservas de minerais.
- Todas as atuais reservas estejam disponíveis para fins de conversão energética, “compensando” de certa forma a hipótese anterior.

É interessante destacar que embora a energia nuclear não tenha participação significativa na matriz energética Brasileira, o país detém a sexta maior reserva mundial de Urânio e mesmo assim apenas utilizando carvão conseguiríamos atender a demanda por mais de 100 anos, conforme tabela 1.2.2.



Fonte	Equivalência Energética (10 <sup>3</sup> TEP)	Equivalência Energética (TWh)	Esgotamento	Duração (anos)
<b>Carvão Mineral</b>	3944070	45870	2219	214
<b>Gás Natural</b>	243623	2833	2043	38
<b>Petróleo</b>	1500111	17446	2112	107
<b>Urânio</b>	1236287	14378	2100	95

**Tab. 1.2.2 – Resultados da simulação de esgotamento de recursos minerais**

Tais valores embora aproximados, expressam em sua ordem de grandeza a gravidade do problema. O Carvão Mineral constitui um importante insumo industrial, dentre elas as acearias. A disponibilidade do petróleo sustenta praticamente toda fabricação de embalagens dos produtos que consumimos, grande parte dos medicamentos, tintas e vernizes, elastômeros, plásticos, espumas e outros. O uso do Urânio para a produção de radiação e não de calor, possibilita entre outras coisas a produção de radiofármacos, marcadores tumorais para diagnóstico e avanço das pesquisas tanto na área Biológica como de Física de Partículas entre outras. O que será do desenvolvimento tecnológico e conseqüente qualidade de vida que nossa sociedade alcançou, sem estas matérias-primas? Não é concebível que somente a elevação de preços quando da proximidade de escassez dos recursos, consiga frear seu consumo. É imperativo que seu uso para fins energéticos seja descontinuado o mais rápido possível, para o bem das gerações futuras.

### **1.3 Perspectiva das Fontes Poluentes**

Além disso, dos 74,2% da demanda global e dos 14,7% da demanda nacional atendidas por fontes primárias não renováveis, nenhuma delas constitui fonte limpa de fato. Pois excetuando-se as usinas nucleares, que produzem toneladas de rejeitos radioativos e material contaminado, todas outras emitem grandes quantidades de CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> na atmosfera. As termoelétricas a gás natural são menos poluentes que as usinas a carvão mineral, mas ainda assim para a geração de um MWh as usinas a gás natural emitem 110kg de Carbono na atmosfera, contra os 360 Kg das usinas a carvão mineral. Cabe destacar que até mesmo os biocombustíveis, embora fontes renováveis de energia, são apenas menos poluentes.

Os efeitos danosos desta agressão ambiental já são amplamente conhecidos por todos: Efeito Estufa, Chuva Ácida e Poluição Atmosférica Urbana, com consequente desequilíbrio do ecossistema, deterioração de alimentos e aumento de doenças respiratórias, dermatológicas e cancerígenas.

Este quadro poderia ser revertido se no preço destes combustíveis fossem adicionados os custos da despoluição associada a ele, evidenciando assim a inviabilidade de seu uso. Talvez uma primeira tentativa nesta direção, tenha sido o surgimento das chamadas “Bolsas de Créditos de Carbono” .

Créditos de carbono são certificados que países em desenvolvimento como Brasil, China e Índia têm o direito de emitir para cada tonelada de gases do efeito estufa (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs e SF<sub>6</sub>) não lançados na atmosfera ou retirados da mesma (seqüestro de carbono). As Reduções Certificadas de Emissões (RCE), constituem assim direitos de poluir e podem ser comercializadas com países industrializados que não consigam ou não desejem reduzir suas emissões.

Atualmente existem mercados de carbono no Reino Unido e nos EUA (a Bolsa do Clima de Chicago – CCX). Fundada em 2003, deverá numa primeira fase organizar a comercialização das RCE apenas nos EUA, México, Canadá. Já existem mercados em planejamento no Canadá, União Européia e no Japão (Kyoto). Em 2010 com a ratificação do Protocolo de Kyoto, será formado um mercado global sem a participação dos EUA.

Afim de se avaliar o impacto econômico, foi realizada uma simulação tomando as seguintes considerações:

- As emissões crescerão conforme explicado no item 1.1. Será considerado que todos os acréscimos de emissões a partir de 2005, sejam evitados pela utilização de Projetos Limpos, permitindo desta forma a comercialização de Créditos Carbono.
- Para fins de cálculo foi utilizada a média dos acréscimos de emissão entre 2005 e 2050.
- Os valores dos créditos carbono foram fornecidos diretamente pelas bolsas e as taxas de câmbio através do Banco Central. Ambos são referentes a metade do mês de Abril/06.

Comercializando-se os certificados na Comunidade Européia (ECX), seria possível levantar cerca de 6,5 bilhões de Reais anuais, conforme demonstra a tabela

1.3.1. que seguindo raciocínio análogo ao proposto linhas atrás, poderia ser debitado do custo final de produção das fontes limpas, melhorando desta forma a viabilidade econômica destas.

Mercado	Preço ton CO2	Câmbio	Preço (R\$)	Aumento anual médio (ton CO2)	Faturamento (Bilhões R\$)
CCX	\$4,80	2,1228	10,18944	83.898.543	0,85
União Européia	29,80 €	2,61508	77,929384	83.898.543	6,54

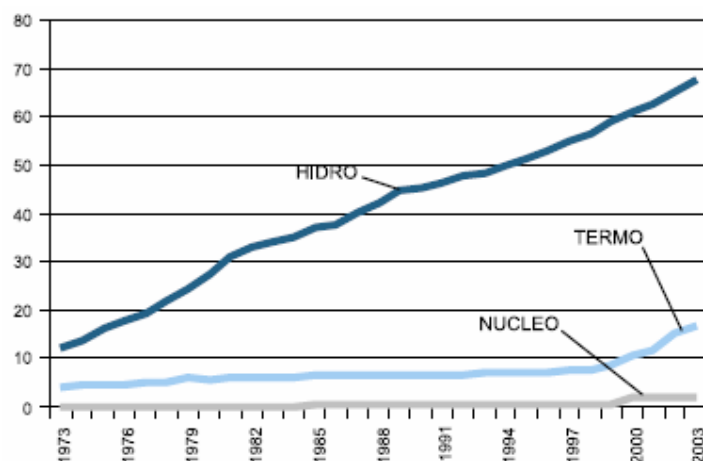
**Tab. 1.3.1 – Resultados da simulação de comercialização de créditos carbono**

## 1.4 Perspectiva das Fontes Verdes

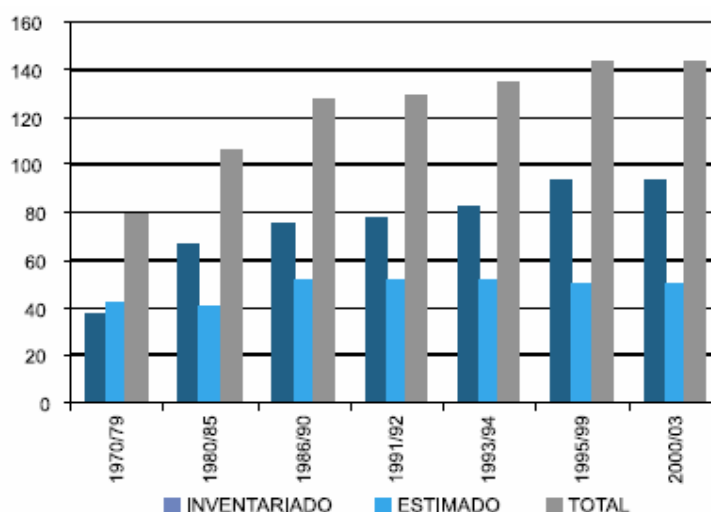
Frente ao fantasma do esgotamento das fontes não renováveis e ao começo da contabilização dos custos de despoluição das fontes sujas, inicia-se um cenário favorável ao estabelecimento das fontes verdes como matriz energética definitiva das nações.

Para o atendimento da demanda veicular, o Gás Natural pelo seu menor efeito poluidor e os Biocombustíveis pela sua renovabilidade poderiam ser utilizados de imediato, funcionando como transição entre o uso das fontes não-renováveis e das fontes verdes, no caso as Células-Combustível. Nosso país poderia assumir a liderança desta revolução energética, gerando empregos para a população e divisas por meio da exportação de Biocombustíveis e equipamentos.

Já para o atendimento da demanda fixa de energia elétrica, destacam-se como opções ideais as fontes hidráulica, solar, eólica e geotérmica. O potencial hidrelétrico é medido em termos de energia firme, que é a geração máxima contínua na hipótese de repetição futura do período hidrológico crítico. O potencial hidrelétrico inventariado compreende as usinas em operação, em construção e os aproveitamentos já estudados nos níveis de inventário, viabilidade e projeto básico. Atualmente o Brasil é o terceiro maior conversor de hidroeletricidade, com uma capacidade de quase 70GW como demonstra a figura 1.4.1.



**Fig. 1.4.1 – Capacidade Instalada de geração (GW)**



**Fig. 1.4.2 – Potencial hidrelétrico total (GW)**

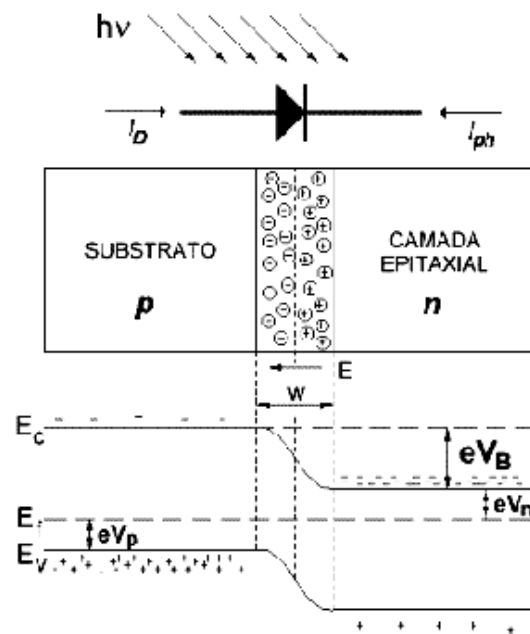
Observando o potencial total (inventariado e estimado) na figura 1.4.2, percebe-se que seu valor vêm se estabilizando nas últimas décadas, possivelmente indicando o final do mapeamento. Desta forma teríamos ainda pouco mais de 70GW a explorar, o mesmo que a atual capacidade instalada, dos quais certamente os últimos 30GW a custos operacionais muito maiores, uma vez que devem tratar-se de pequenos aproveitamentos ou aproveitamentos com maior necessidade de intervenções.

Tendo explorado mais de 50% dos aproveitamentos hidrelétricos economicamente interessantes e com um território localizado predominantemente entre a linha do Equador e o Trópico de Capricórnio, as fontes Eólicas e Solar se destacam como as alternativas com maior potencial de crescimento no Brasil. Um dos atrativos da energia eólica é que as turbinas alinhadas através de uma fazenda não interferem com o uso do solo para a agricultura ou pecuária. Além disso, a maior parte da receita gerada permanece na comunidade local, enquanto que na energia oriunda de uma termelétrica a petróleo, o dinheiro gasto com eletricidade pode acabar no Oriente Médio.

Para se ter uma idéia de sua viabilidade técnica, o Departamento de Energia dos Estados Unidos constatou que somente três estados (Dakota do Norte, Kansas e Texas) possuem energia eólica controlável suficiente para atender às necessidades energéticas de todo os EUA. Além disso, segundo a American Wind Energy Association o custo do kWh da eletricidade eólica caiu dos 38 centavos de dólar no início da década de 80, dependendo principalmente da velocidade do vento para 3 a 6 centavos. O vento já fornece 10% da eletricidade da Dinamarca, 14% do Norte da Alemanha e 23% da província de Navarra na Espanha.

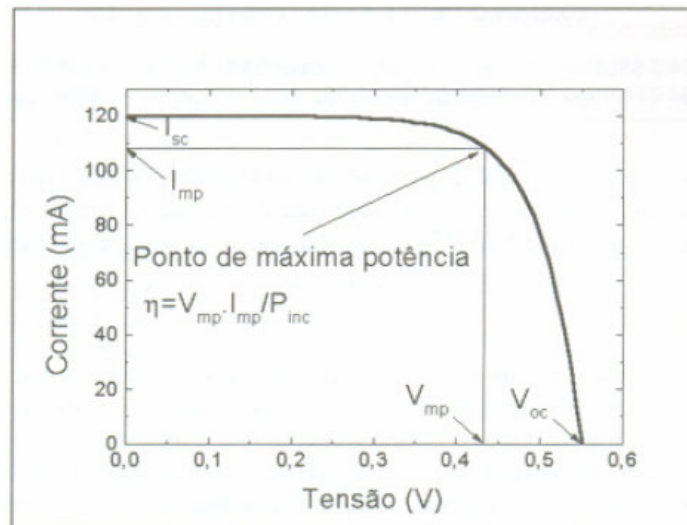
## 2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Estabelecida uma junção PN, a zona de depleção se formará na tentativa de anular os campos elétricos internos ao semiconductor. Quando um ou mais fótons incidem sobre o material, sua energia é transferida aos elétrons, permitindo que alguns deles consigam ultrapassar a barreira potencial, saltando da Banda de Valência para a Banda de Condução. Caso os terminais externos sejam interligados por um condutor surgirá uma corrente elétrica.



**Fig. 2.0.1 – Teoria das bandas de energia**

Em sistemas de orientação fixa, o arranjo dos painéis é geralmente orientado de forma a maximizar a captação solar nos meses de inverno, quando a irradiação disponível diminui e a demanda aumenta. Já nos chamados tracking systems, sistemas dotados de estruturas com 1 ou 2 graus de liberdade, é possível acompanhar o deslocamento relativo do Sol, maximizando desta forma a captação em quaisquer condições. Porém faz-se necessário avaliar se os custos envolvidos, compensarão a energia extra coletada.



**Fig. 2.0.2 – Curva característica de célula fotovoltaica**

Onde:

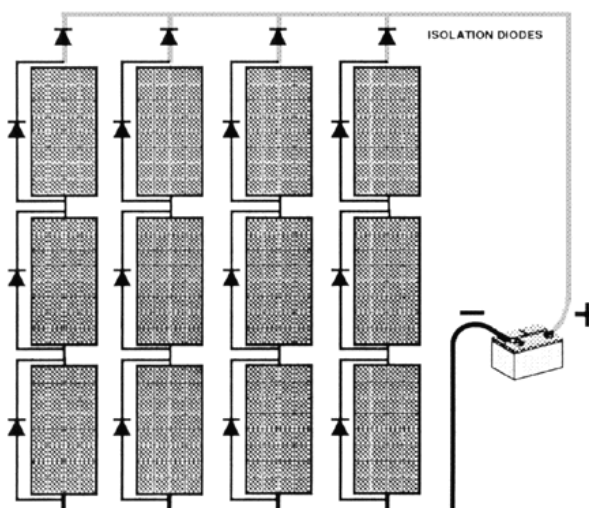
$I_{sc}$  - Corrente de curto circuito (short circuit)

$I_{oc}$  - Corrente de circuito aberto (open circuit)

$I_{MP}$  - Corrente de máxima potência

Mesmo assim, devido a baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, na prática estas são interligadas formando um módulo. O arranjo das células nos módulos podem ser feito conectando-as em série (aumento de tensão) ou em paralelo (aumento de corrente).

Caso uma célula num arranjo em série, se apresente encoberta ou defeituosa, todo o desempenho do conjunto ficaria comprometido. Para evitar que isso ocorra, utiliza-se um diodo de passo ou de "bypass" em paralelo com um grupo de células, reduzindo assim o custo também. Outra possibilidade consiste das células apresentarem num horário de pouca insolação, uma ddp inferior à da bateria a qual estejam conectadas, fazendo com que corrente elétrica circule no sentido contrário e impedindo assim seu funcionamento como gerador. Neste caso utiliza-se um diodo de bloqueio.



**Fig. 2.0.3 – Associação de módulos fotovoltaicos**

Posteriormente à geração é feita a conversão DC-AC. Uma das vantagens das tecnologias fotovoltaicas é o aproveitamento tanto da radiação especular (colimada) quanto da parcela difusa. Outro aspecto consiste na conversão diretamente em energia elétrica, dispensando instalações associadas à condução de vapor, que representam custos e perdas de energia.

## **2.1 Silício Monocristalino (m-Si)**

No caso da tecnologia do silício monocristalino (m-Si), o monocristal é crescido a partir de um banho de Silício fundido de alta pureza (99,99% a 99,9999%) em reatores sob atmosfera controlada a temperaturas em torno de 1400°C e com velocidades de crescimento de cristal extremamente lentas (cm/h). Subsequentemente é necessário o corte do tarugo com serras diamantadas, a rebarbação, ataque químico e polimento para a obtenção de lâminas. Somente então é que começam os processos de difusão e dopagem, deposição de máscara condutora e interconexão das células, para a obtenção do painel fotovoltaico.





**Fig. 2.1.1 – Etapas de fabricação de wafers de m-Si**

## **2.2 Silício Policristalino (p-Si)**

Já no silício policristalino (p-Si), embora o material de partida seja o mesmo do banho, processa-se apenas uma solidificação direcional, demandando um menor tempo de fabricação. Evidentemente devido a grande quantidade de defeitos microestruturais nos contornos de grão, haverá uma redução de rendimento em relação ao m-Si.

A relação custo/potência se mantém aproximadamente a mesma em ambos os casos, fato pelo qual ambas tecnologias serão simplesmente denominados Silício cristalino (c-Si).

## **2.3 Silício Amorfo-Hidrogenado (a-Si)**

Como inconveniente, o c-Si faz uso de lâminas com 300 a 400  $\mu\text{m}$  de espessura, contra o uso dos chamados filmes finos das outras tecnologias, com 1  $\mu\text{m}$  de espessura. Tal fato possibilita não só uma redução no consumo de material, mas na possibilidade de automação e na quantidade de energia envolvida nos processos de fabricação. Como consequência, mesmo apresentando menores rendimentos, as tecnologias de filmes finos apresentam uma relação custo/potência menor que das lâminas de Silício.

Um dos principais exemplos é a tecnologia do Silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) ou simplesmente (a-Si). A produção do a-Si é feita em processos a plasma, a temperaturas inferiores a 300°C, gerando filmes finos que podem ser depositados sobre substratos de baixo custo como vidro, aço-inoxidável e alguns plásticos. Tal fato possibilita a obtenção de painéis flexíveis, inquebráveis, leves,

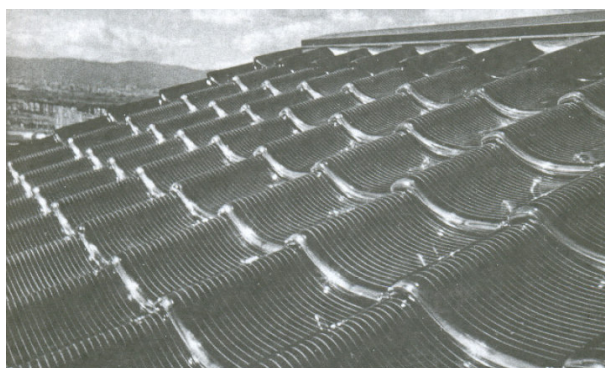
semitransparentes e com geometrias curvas. Por apresentar uma resposta espectral mais voltada para o azul, tais células ainda se demonstram eficientes sob iluminação artificial, tornando viável seu uso em calculadoras por exemplo.

Como desvantagem, pode-se mencionar o efeito Staebler-Wronski, que implica num decréscimo intrínseco de até 20% de sua eficiência de conversão inicial, estabilizando-se em seguida.

Além do Silício para a produção de células fotovoltaicas, são também empregados, o Telureto de Cádmio ( $\text{CdTe}$ ), os compostos relacionados ao Disseleto de Cobre e Índio ( $\text{CuInSe}_2$ ) ou simplesmente (CIS) e finalmente Disseleto de Cobre, Gálio e Índio ( $\text{CuInGaSe}_2$ ) ou (CIGS).

Em particular as tecnologias alternativas ao Silício, utilizam elementos que são altamente tóxicos ( $\text{Cd}, \text{Se}, \text{Te}$ ), escassos na natureza ( $\text{Ga}, \text{Te}, \text{Se}, \text{In}, \text{Cd}$ ) ou ambos, contra indicando-as portanto para o uso doméstico devido à toxicidade e a priori ao industrial devido à escassez.

Já o Silício, constitui o segundo elemento mais abundante na superfície da Terra (mais de 25% da crosta em massa), sendo cerca de 100 vezes menos tóxico que qualquer dos elementos acima citados e se não bastasse, apresentando um rendimento de até 15% em painéis comerciais, contra um máximo de 10% das outras tecnologias. Tais fatos justificam porque estas tecnologias não serão analisadas.



**Fig. 2.3.1 – Exemplo de aplicação do a-Si**

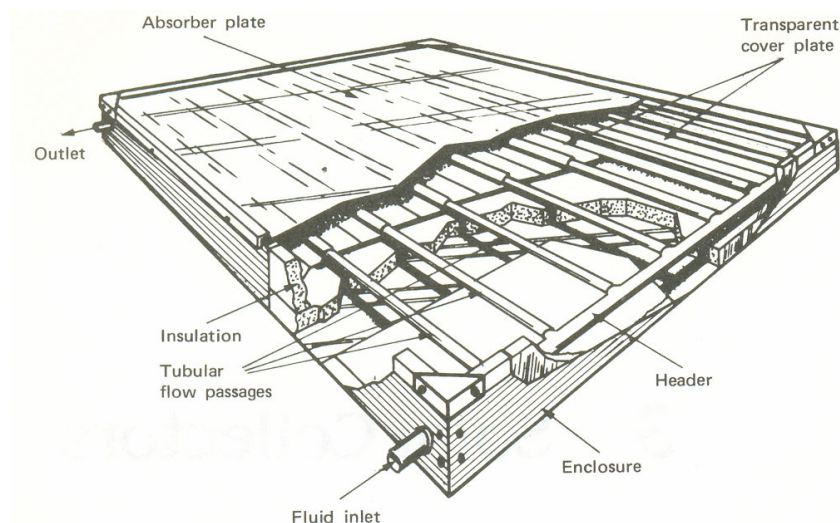
### **3 COLETORES SOLARES**

Os Coletores Solares são equipamentos responsáveis por concentrar e converter a radiação solar incidente em calor, através do emprego de componentes com elevada absorptância e sua posterior transferência, geralmente na forma de calor sensível, a um fluido de trabalho com elevado calor específico, elevado ponto de ebulição e baixo ponto de congelamento (geralmente óleo ou Propileno Glicol ou algum Polifenil Hidrogenado tal como TH, ADX10 e HVS13) visando eliminar custos com sistemas anti-congelamento, custos de isolamento térmico e super dimensionamento da tubulação, custos de manutenção e perda de eficiência devido à formação de depósitos, incrustações e corrosão. Devido ao grande comprimento das tubulações, não é possível superar as perdas de carga apenas com o efeito Termossifão, exigindo o emprego de uma bomba para este fim. O fluido é então levado até um trocador de calor, funcionando como gerador de vapor de um ciclo Rankine. É usual a instalação de um reservatório entre o coletor e o trocador, funcionando como acumulador de energia e responsável por normalizar a curva de irradiação ao longo do dia. Analogamente aos painéis solares, os coletores podem ser dotados de dispositivos para acompanhar a movimentação do Sol (Tracking Systems) com um ou dois graus de liberdade.

#### **3.1 Coletor tipo Placa Plana (PP)**

Nesta tecnologia, geralmente não se emprega nenhum tipo de concentrador, implicando em instalações relativamente extensas para o aproveitamento energético com fins comerciais. Os equipamentos são geralmente constituídos por aletas metálicas pintadas de preto para aumentar sua absorptividade, interligadas às tubulações através de soldagem, visando a redução da resistência de contato. Os tubos e a placa são geralmente de cobre ou alumínio. Podem ser dispostos paralelamente ou um único tubo em zigue-zague (serpentina). Não se deve misturar ambos devido à corrosão galvânica. As pinturas seletivas têm um custo maior e só podem ser aplicadas por eletrodeposição. A Mais comum delas é o Cromo-Preto

sobre Níquel e Cobre-Preto sobre Cobre. Ambos com Absortância e Emitância de 0,9 e 0,1 respectivamente.



**Fig. 3.1.1 – Componentes do coletor tipo Placa Plana**

Estes componentes são recobertos por estufas de vidro, visando reduzir as perdas por convecção e termicamente isoladas na parte inferior visando reduzir as perdas por condução. Além disso, é aplicada uma película seletiva sobre o vidro visando reduzir perdas por radiação. Porém como a temperatura do equipamento é superior a ambiente, na prática sempre haverá transferência de calor. O isolamento deve ser perfeitamente encapsulado, selado contra o contato com a água. Uma eventual entrada de umidade na cavidade superior diminuiria a vida da pintura, provocaria corrosão das aletas e reduziria a transmitância do vidro devido à condensação de gotículas de água sobre sua superfície. Embora apresentem transmitância de até 92% somente, se adequadamente temperados, os vidros apresentam uma durabilidade elevadíssima e deterioração desprezível em relação à radiação ultravioleta e temperaturas elevadas, diferentemente das coberturas poliméricas (Polimetacrilato de Metila e Policarbonato), apesar deste último apresentar excelentes propriedades mecânicas. Não é possível a produção de vácuo, uma vez que a cobertura se colapsaria. Vidros devem ser protegidos contra choques mecânico.

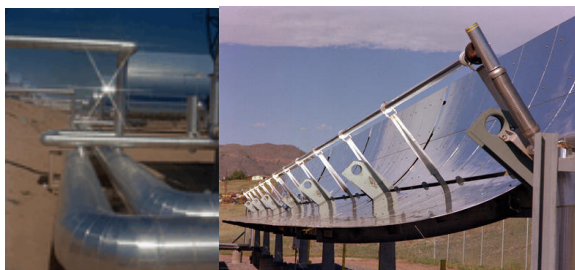
Há dispositivos contra o congelamento (esvazia circuito do coletor) e a estagnação (linha de água fria). O gabinete geralmente é confeccionado em Alumínio, aço-carbono galvanizado ou fibra de vidro.



**Fig. 3.1.2 – Planta comercial utilizando coletores tipo Placa Plana**

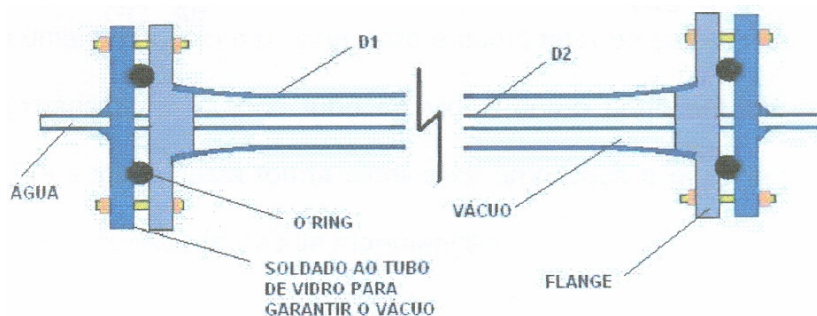
### **3.2 Coletor tipo Calha Parabólica (CP)**

Estes coletores são dotados de uma calha parabólica, confeccionada em material metálico com elevada reflexão (geralmente aço-inoxidável polido), responsável por concentrar a radiação incidente sobre uma linha focal. Do ponto de vista óptico, os materiais com características mais adequadas à confecção do refletor, são espelho, aço carbono cromado, aço-inoxidável, alumínio e mylar aluminizado em ordem decrescente de qualidade e custo. Os espelhos apresentam como aspectos negativos sua maior densidade superficial e fragilidade ao impacto. A estrutura que suporta o material refletor seja através da seleção do material ou de seu projeto geométrico, deve ser confeccionada de forma a minimizar os efeitos de dilatação térmica, peso próprio e rotação do sistema (tracking system) resultando na deformação da parábola e conseqüente perda de foco. Finalmente é importante a inclusão de sensores de velocidade e direção do vento ao tracking system, visando ao recolhimento do sistema para condições de sobrecarga estrutural.



**Fig. 3.2.1 – Detalhes da instalação do coletor tipo Calha Parabólica**

Sobre tal linha é então instalada uma tubulação geralmente metálica (Cobre ou Alumínio) para a condução do fluido de aquecimento. É importante a existência de um comprimento inicial, visando a obtenção do regime turbulento plenamente desenvolvido antes do início do refletor. Analogamente ao projeto anterior, o tubo é pintado de preto e envolto por um tubo de vidro, no interior do qual é feito vácuo visando reduzir as perdas por convecção. Em associações em série de coletores deste tipo um primeiro problema consiste na necessidade de criar juntas de dilatação, a fim de evitar o surgimento de tensões térmicas no tubo de vidro. Como agravante do problema, o tubo de vidro apresenta coeficiente de dilatação distinto do tubo metálico. Uma solução consiste na utilização de juntas elásticas flangeadas (flange com alojamento para anel o-ring de borracha). Outro problema consiste no fato dessa dilatação ser maior na porção inferior do tubo que na superior, devido à reflexão dos raios pelo concentrador. Tal efeito irá causar a flexão do tubo, com sua conseqüente perda de foco. Uma possível solução consiste na utilização de espaçadores anulares perfurados entre os dois tubos. Vácuo aumenta sensibilidade ao choque térmico.



**Fig. 3.2.2 – Detalhe da junta elástica**

Além disso, o tubo de vidro deve apresentar propriedades seletivas, permitindo que a radiação de baixo comprimento de onda (recebida do sol) seja transmitida para o tubo absorvedor com a mínima perda possível e que a radiação de alto comprimento de onda emitida pelo tubo absorvedor (devido à sua temperatura relativamente baixa) seja refletido.

Sempre que forem empregados refletores, haverá uma perda associada a parcela da radiação incidente sobre a superfície do concentrador e refletida para fora do foco. Além disso diferentemente do coletor de placa plana, somente a parcela colimada da radiação incidente poderá ser aproveitada, uma vez que depende de



reflexão especular para chegar ao tubo focal. Outra opção de concentrador consiste na utilização de lentes de Fresnell ao longo da tubulação citada.

### 3.3 Coletor tipo Parabolóide de Revolução (PR)

Nestes projetos são utilizados tracking-systems com dois graus de liberdade, um referente ao movimento de rotação da Terra (dia-noite) e outro ao movimento de translação (estações do ano).

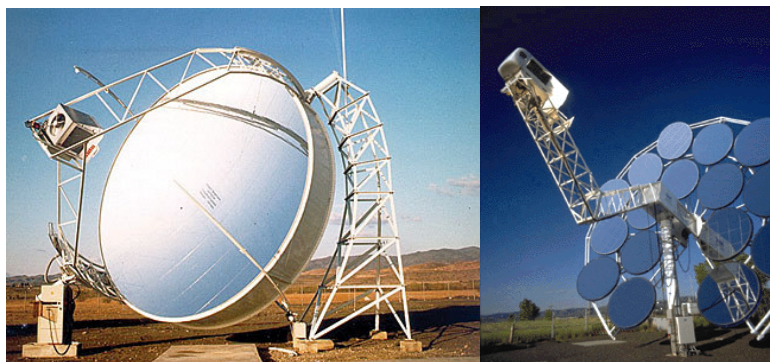
Seu concentrador apresenta o formato de um parabolóide de revolução, convergindo a radiação incidente para um foco pontual (na verdade um pequeno volume), no qual encontra-se a tubulação do fluido. Em função do rápido aumento de custo dos espelhos parabolóides com o aumento do diâmetro, e também da robustez estrutural relativa ao vento, a área dos concentradores geralmente é limitada a 50 m<sup>2</sup>, preferindo-se desta forma associar novos equipamentos em paralelo a aumentar seu diâmetro.



**Fig. 3.3.1 – Coletores tipo Parabolóide de Revolução I**

Atualmente os concentradores são constituídos por superfícies de plástico ou vidro, metalizadas com alumínio ou prata. Outra possibilidade consiste na utilização de membranas refletivas tracionadas. Superfícies metálicas também são utilizadas, embora apresentem maior custo, menor eficiência óptica e necessitem de revestimento de proteção contra corrosão atmosférica, com propriedades ópticas adequadas. Os concentradores podem assumir 4 concepções básicas: Superfícies paraboloidais monolíticas, compostas por diversos refletores esféricos (facetadas), membranas mono-facetada ou membrana multi-facetada. A estrutura pode ser

composta pela interligação de refletores autoportantes, refletores fixados sobre estrutura tubular ou treliçada ou ainda a câmara de vácuo. Nesta tecnologia, uma treliça circunferencial é recoberta de ambos os lados por uma membrana refletiva e então feito vácuo entre estas. A pressão atmosférica será responsável pela obtenção de uma curvatura contínua gerando uma superfície semi esférica. Novos materiais com coeficiente de elasticidade não uniformes têm sido pesquisados visando a obtenção de superfícies parabólicas. Quanto aos receptores são utilizadas 3 concepções básicas. Na primeira delas, denominada tubo receptor diretamente iluminado, o fluido de trabalho é transportado através das tubulações dispostas na cavidade diretamente irradiada do receptor. No segundo tipo, geralmente sódio ou outro metal liquefeito é vaporizado na superfície absorvedora e condensado sobre os tubos com o fluido de trabalho, retornando por gravidade.



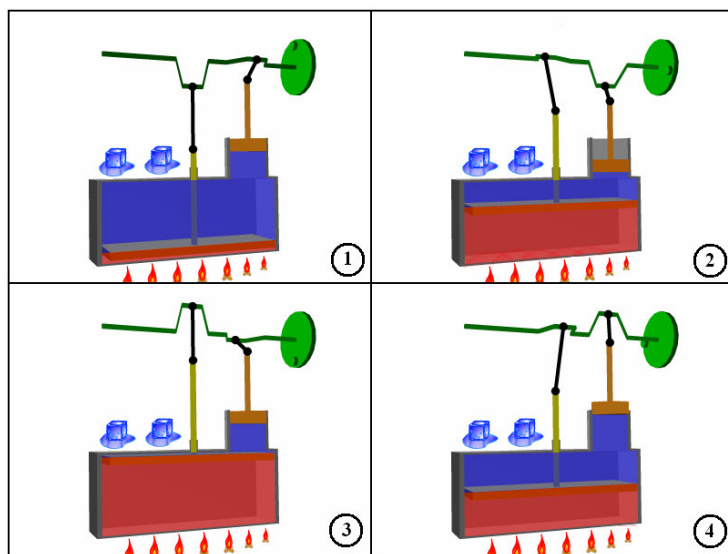
**Fig. 3.3.2 – Coletores tipo Parabolóide de Revolução II**

Devido a grande concentração de energia e complicações para instalação da tubulação, o ciclo Rankine é muitas vezes substituído pela instalação de um motor Stirling diretamente acoplado a um gerador elétrico no foco do concentrador. Conhecidos pela reduzida quantidade de partes móveis, o motor Stirling constitui o mais eficiente equipamento para conversão de calor em trabalho mecânico, não sendo usualmente empregado devido às elevadas temperaturas de operação necessárias. O ciclo é constituído por um processo de compressão isotérmica, aquecimento isovolumétrico, expansão isotérmica e finalmente um resfriamento isovolumétrico. Geralmente é utilizado hidrogênio ou hélio como fluidos de trabalho, devido a rápida transferência de calor e não ocorrência de mudança de fase, durante os processos. O grande diferencial deste ciclo, consiste na regeneração ou seja, no



aproveitamento do calor rejeitado durante o resfriamento a volume constante, para o posterior aquecimento do fluido, permitindo a obtenção de uma eficiência próxima à do ciclo de Carnot.

Seu princípio de funcionamento é bastante simples. O sistema é composto essencialmente por uma câmara, um cilindro e dois pistões, selados e preenchidos pelo fluido de trabalho. Quando tal fluido é aquecido, haverá uma expansão volumétrica e inversamente quando resfriado, haverá uma contração, movimentando desta forma o pistão superior, o qual é denominado pistão de potência. Para que os processos de aquecimento e resfriamento possam ocorrer de forma contínua e não intermitente, é adicionado um segundo pistão denominado pistão de deslocamento. Adiantado  $90^\circ$  em relação ao pistão de potência, utiliza uma parcela da energia disponível na árvore de manivelas para separar as frações do fluido que serão aquecidas e resfriadas em cada momento. Além disso, um mecanismo biela-manivela é responsável por transformar o movimento alternativo do pistão em movimento de rotação. O volante instalado na extremidade da árvore de manivelas tem por objetivo apenas evitar o travamento do mecanismo nas posições extremas de funcionamento.



**Fig. 3.3.3 – Estágios do motor Stirling**

### 3.4 Heliostatos e Torre Central

Quando o gerador Stirling não é empregado, os custos com tubulações e isolamento térmico, além da redução de eficiência da planta, limitam a associação de unidades a uma determinada quantidade, contra-indicando-o para instalações de maior porte. Nestes casos são utilizados uma grande quantidade de espelhos planos denominados heliostatos, instalados sobre o solo com tracking systems independentes. Analogamente ao projeto anterior, os diversos concentradores convergem a radiação para o topo de uma única torre envidraçada, onde situam-se as aletas das tubulações.

Uma possível concepção para o receptor consiste numa cavidade tronco-cônica, revestida internamente por uma tubulação em hélice e com uma segunda hélice menor, centrada na base, configurando o pré-aquecedor, evaporador e superaquecedor respectivamente. Assim, tal conjunto constitui um gerador de vapor, na saída do qual é instalado um atemperador, de forma que a partir de uma certa intensidade de irradiação, a temperatura de saída do vapor seja constante, variando apenas sua vazão.

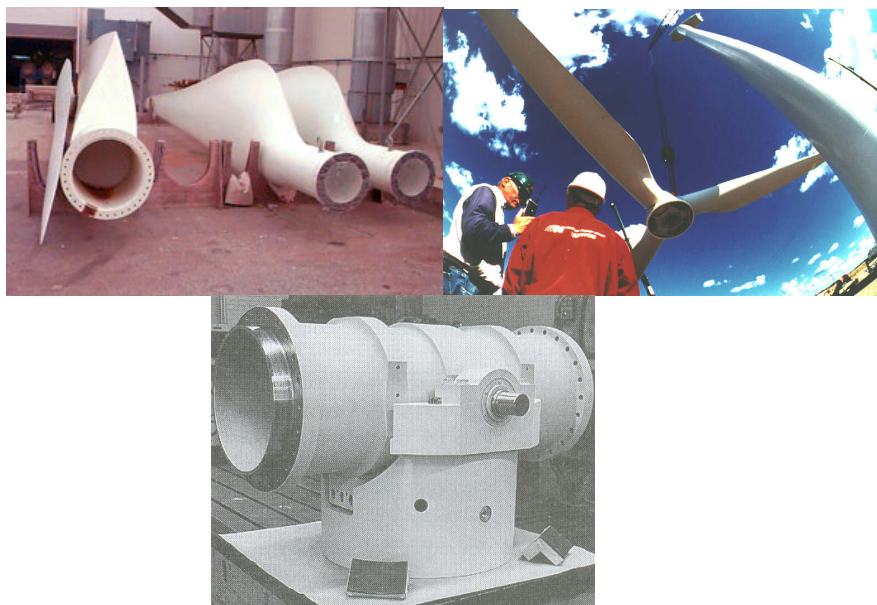


**Fig. 3.4.1 – Vista de instalação do tipo Heliostatos e Torre Central**

## 4 TURBINAS EÓLICAS

### 4.1 Turbina de Eixo Horizontal (HAWT)

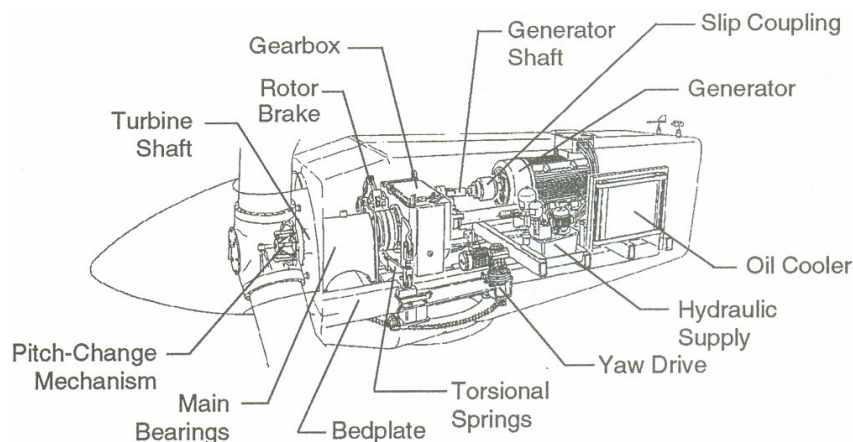
Seu rotor é constituído por 1 a 3 pás em fibra de vidro, madeira laminada ou aço ligado, solidárias a um cubo feito em aço forjado ou FoFo montado sobre o eixo com mancais de rolamento ou deslizamento. Geralmente apresentam regulagem do ângulo entre plano da pá e o plano de rotação (pitch), constituindo este o principal controle de partida, potência e parada. Sistemas hidraulicamente acionados são mais simples e apresentam maior redundância. Rotores com 3 pás minimizam as assimetrias de carregamento transmitidas a todas as peças da estrutura. Os cubos Teetered (Flexíveis), embora não reduzam o carregamento axial sobre o mancal, reduzem drasticamente a flexão do eixo.



**Fig. 4.1.1 – Detalhes das pás, rotor e cubo de uma HAWT**

A transmissão é constituída pelo eixo primário ou de baixa rotação, amplificador de velocidades e eixo secundário ou de alta velocidade. Sistemas de grande porte utilizam dois eixos concêntricos, sendo o mais externo destinado às cargas de flexão impostas pelo rotor, e o mais interno responsável pela transmissão

do torque. As engrenagens podem ser de eixos paralelos (cilíndricas de dentes retos), planetárias ou epicíclicas. Há ainda um sistema de freio responsável por limitar a velocidade de rotação já no eixo de entrada. Porém para sistemas de grande porte seu uso se torna inviável devido a grande quantidade de energia acumulada no rotor e no gerador. Neste caso o mecanismo de Yaw assume a responsabilidade de limitação de velocidade, permanecendo o freio apenas para o travamento do sistema quando parado.

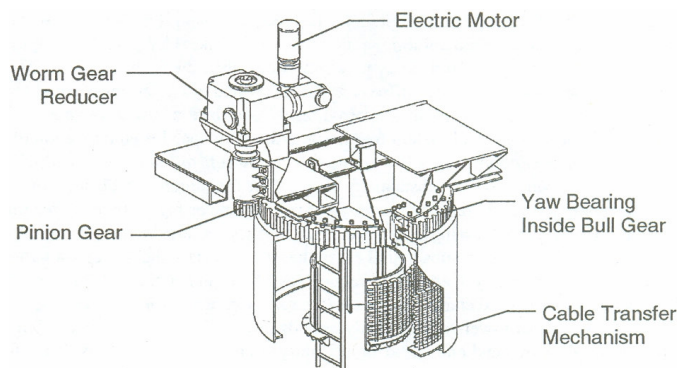


**Fig. 4.1.2 – Detalhamento da transmissão de uma HAWT**

Em função de seu maior custo e necessidade de manutenção (escovas) os geradores DC são indicados apenas para equipamentos de menor porte. Os geradores AC Síncronos por sua vez, embora apresentem excelente qualidade de energia (distorção harmônica), só poderiam ser utilizados se fosse mantida uma rotação de saída rigorosamente constante, através do uso de uma transmissão de relação variável (variador de velocidade), por exemplo. Por fim, os geradores de campo modulado necessitam de uma fonte de frequência variável para o rotor, tornando assim os geradores AC Assíncronos como a alternativa mais indicada, em função da robustez, simplicidade e baixo custo.

A estrutura Nacelle é responsável por transferir as cargas decorrentes do rotor e do power-train para a torre, além de proteger o power train contra ação do intemperismo e das aves. Possui um ou dois motores com pinhões acoplados que se movimentam sobre uma cremalheira fixa na torre, responsáveis por promover o alinhamento do rotor e power-train com a direção do vento. Tal sistema é denominado Yaw e seu acionamento é feito a partir do sinal enviado por sensores

instalados no lado externo da fuselagem. Problema do caminhamento de cabos do circuito de potência, controle e iluminação, são resolvidos através do uso de transformadores ou barramentos com escovas deslizantes.



**Fig. 4.1.3 – Detalhamento do sistema Yaw de uma HAWT**

Definido o comprimento das pás (raio do rotor), somando-se a altura mínima entre as extremidades destas e o solo, obtêm-se a altura mínima do eixo. A altura ótima é aquela que fornece o menor custo unitário possível. A estrutura pode ser tubular em aço ou concreto armado com escada marinheiro interna, ou formada por perfisados metálicos. Seu dimensionamento não é dado pelo carregamento estrutural, mas sim pelas frequências naturais de vibração.

Na cabine de solo são encontrados os capacitores de correção do fator de potência, o circuito retificador, o regulador de tensão (às vezes substituído por um autotransformador na saída do inversor), o inversor com loop de controle para o sincronismo de fase e a chave de bloqueio (synchronizing breaker). Além dos circuitos de controle e de registro do sinal dos sensores, entre eles, sensores de direção e velocidade do vento, orientação do nacelle, velocidade do rotor, ângulo de pitch, nível de vibração, pressão, nível e temperatura do óleo do câmbio, velocidade do gerador, espessura do freio e temperatura dos mancais.

## 4.2 Turbina de Eixo Vertical (VAWT)

As turbinas de eixo vertical têm como principal vantagem sua onmidirecionalidade, dispensando desta forma os complexos mecanismos de alinhamento com a direção do vento. Além disso dispensam a Nacelle já que power-train fica na cabine de solo. Não há carregamento de flexão no eixo da turbina. Apenas torção e axial, reduzindo seu diâmetro e simplificando os mancais. Como desvantagens necessitam de 2 mancais (um inferior e um superior), fundações para ancoragem de 3 a 4 cabos, formando ângulo de 30 a 40° com o solo, sendo que os acréscimos de altura implicam em custos muito maiores que os das HAWT. Por isso, o centro destas situa-se em cotas inferiores aos daquelas, capturando menos potência por unidade de área de arrasto.

O rotor Darrieus consiste de 2 ou 3 pás com perfil aerodinâmico, montadas num eixo vertical central, suportado por mancais em sua base e topo. O sistema é mantido em sua posição através de cabos metálicos ancorados no solo, instalados no mancal de topo.

Já no rotor Savonius, uma superfície sólida em forma de S é solidarizada ao eixo anteriormente citado, substituindo as pás. Embora apresente eficiência maior que a Savonius, a turbina Darrieus não é self-starting. Uma solução consiste na montagem de turbinas Savonius de pequeno porte no eixo da Darrieus, fornecendo assim o torque necessário para sua partida.



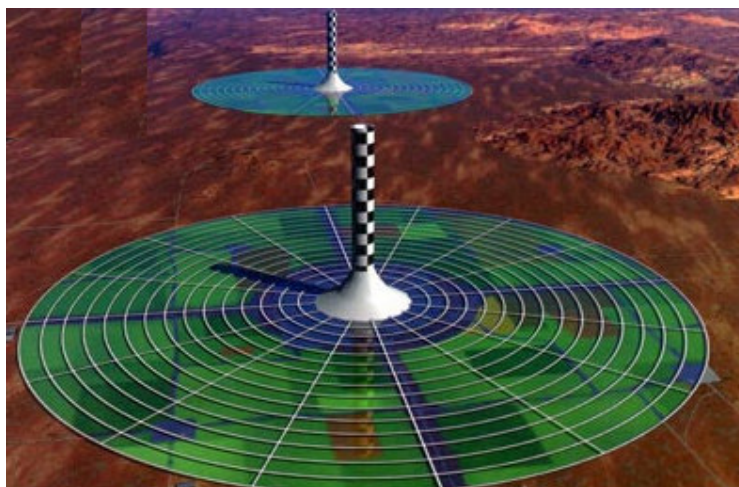
**Fig. 4.2.1 – Exemplo de rotor Darrieus e Savonius**



## 5 SISTEMAS HÍBRIDOS

### 5.1 Torre Solar

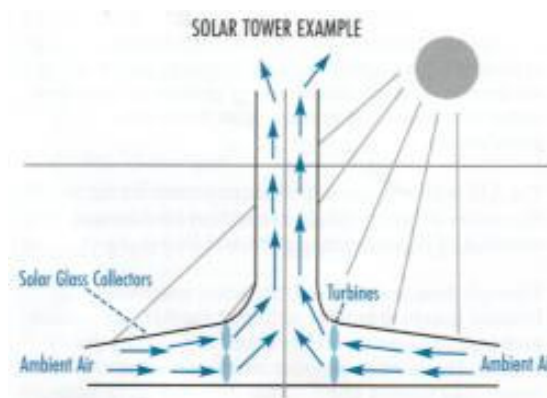
A instalação é constituída por uma estufa fechada de grandes dimensões de vidro ou policarbonato, responsável pela elevação de temperatura da massa de ar confinada abaixo dela em cerca de 50°C. Devido a diferença de densidade é estabelecido um escoamento através de uma grande chaminé de concreto posicionada centralmente na estufa. Pequenas turbinas construídas com materiais aeronáuticos associadas a geradores elétricos na base da chaminé, são responsáveis por converter a energia cinética do ar em energia elétrica. Além disso, o piso da estufa é recoberto com material de elevada capacidade térmica, responsável pelo armazenamento de calor durante o dia, para o posterior aquecimento do ar durante a noite, permitindo assim a operação durante 24h.



**Fig. 5.1.1 – Vista artística de uma instalação do tipo Torre Solar**

Quanto mais alta for a chaminé, maior será a velocidade do escoamento, exigindo assim um diâmetro menor, para uma vazão fixa. Porém isso encaminha o projeto para um problema de esbeltez excessiva. Outro aspecto a ser avaliado consiste na formação de uma grande sombra sobre a própria estufa, criando regiões sem aquecimento que alterariam o escoamento do ar aquecido. Para atenuar tal problema a estufa é dividida internamente em setores de círculo. Finalmente a estrutura da estufa deve ser suficiente robusta de forma a permitir o deslocamento de

pessoas e equipamentos sobre os painéis de vidro (limpeza), os empuxos decorrentes do aquecimento e forças decorrentes do vento.



**Fig. 5.1.2 – Croqui de uma Torre Solar**



## 6 MODELAMENTO DAS EFICIÊNCIAS ENERGÉTICAS

### 6.1 Células Fotovoltaicas

Conforme dito anteriormente é possível a obtenção em painéis comerciais utilizando a tecnologia do Silício monocristalino (m-Si), de eficiências de até 15%. Uma vez que se trata de sistema de conversão direta de energia, faz-se necessário somente computar a perda relativa ao circuito inversor estimada em 5%, não havendo quaisquer outras perdas térmicas ou mecânicas associadas.

$$\eta_{FV} = \eta_{PAINEL} \cdot \eta_{INV} = 0,15 \cdot 0,95 \cong 0,14$$

### 6.2 Coletores Solares

Define-se relação ou fator de concentração geométrica  $C$  como a razão entre a área de entrada e a área de saída de um concentrador solar:

$$C = \frac{A_1}{A_2} = \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 = \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2$$

Define-se ainda como amplitude generalizada ou invariante de Lagrange-Helmholtz à quantidade:

$$U_i = n_i \int_{abertura} dx_i dy_i du_i dv_i$$

$$\text{onde: } \begin{cases} n_i - \text{índice de refração} \\ dx_i - \text{abertura infinitesimal na direção } \vec{x} \\ dy_i - \text{abertura infinitesimal na direção } \vec{y} \\ du_i - \text{inclinação do raio em relação à normal na direção } \vec{x} \\ dv_i - \text{inclinação do raio em relação à normal na direção } \vec{y} \end{cases}$$

Resolvendo a integral para um sistema bidimensional (Calha Parabólica):

$$U_i = n_i \int_{abertura} dx_i du_i = n_i \int_0^{2a_i} \int_{-\theta_i}^{\theta_i} dx_i d(\cos \varphi) = n_i 2a_i |\sin(\theta_i) - \sin(-\theta_i)| = 4n_i a_i \sin(\theta_i)$$

A partir do teorema da conservação da amplitude, obtêm-se:

$$U_1 = U_2 \Rightarrow 4n_1 a_1 \sin(\theta_1) = 4n_2 a_2 \sin(\theta_2) \Rightarrow C = \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{n_2 \sin(\theta_2)}{n_1 \sin(\theta_1)}$$

Na prática deve ainda considerar-se que devido às irregularidades microgeométricas das superfícies refletoras, a ocorrência de absorção nas mesmas, a formação de sombras sobre os concentradores e demais influências, os fatores de concentração efetivos nunca ultrapassam 60% de seu máximo teórico.

Considerando que a atmosfera constitui tanto o meio de entrada quanto o de saída apresentando portanto o mesmo índice de refração, que embora os raios solares sejam praticamente paralelos devido ao grande diâmetro do astro é possível na superfície da Terra um ângulo de até 16' entre a normal e que a máxima inclinação de saída corresponde a um ângulo de 90°, obtêm-se:

$$C_2 = 0,6.C_{máx} = 0,6 \frac{n_2 \sin(\theta_2)}{n_1 \sin(\theta_1)} = \frac{0,6}{\sin(16')} \cong 130$$

Repetindo então o raciocínio para um sistema tridimensional (Parabolóide de Revolução):

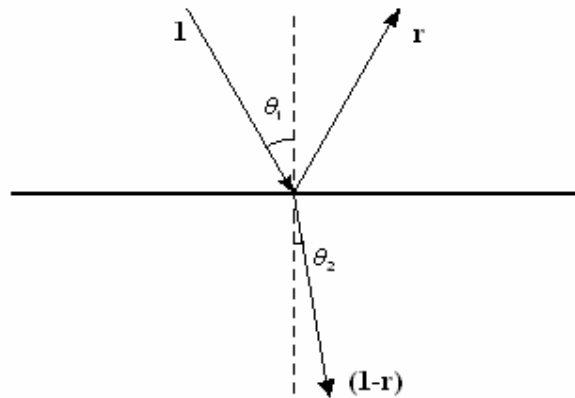
$$C_3 = 0,6.C_{máx} = 0,6 \left( \frac{n_2 \sin(\theta_2)}{n_1 \sin(\theta_1)} \right)^2 = \frac{0,6}{\sin^2(16')} \cong 27700$$

Em decorrência de seu fator de concentração unitário, os coletores de Placa Plana se demonstram inadequados para a aplicação em plantas de grande porte. Já os coletores do tipo Parabolóide de Revolução, embora bastante satisfatórios quanto a este aspecto, necessitam como visto em capítulo anterior de estruturas relativamente robustas, mecanismos de tracking system mais sofisticados, além do emprego de um

conjunto motor-gerador por módulo, elevando em muito o custo de implementação de uma planta de grande porte. Diante disso, tanto a tecnologia de coletores do tipo Calha Parabólica como Heliostatos e Torre Central se demonstram mais indicadas para a aplicação em questão, motivo pelo qual a primeira será utilizada como referência para o modelamento matemático da eficiência.

A chamada lei de Snell permite a determinação do ângulo entre a direção de propagação de um raio luminoso refratado e a direção normal à interface entre dois meios distintos, representado na figura 6.2.1.

$$n_1 \cdot \text{sen} \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen} \theta_2 \Rightarrow \theta_2 = \text{arcsen} \left( \frac{n_1}{n_2} \text{sen} \theta_1 \right)$$

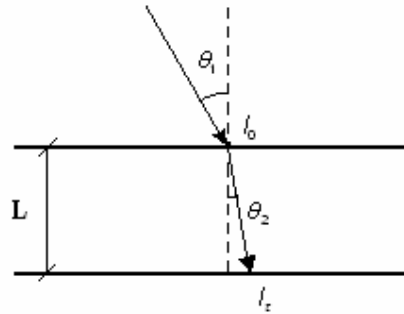


**Fig. 6.2.1 – Ângulo de refração**

De posse dos ângulos de incidência e refração, a lei de Fresnell permite determinar a parcela refletida da radiação incidente ( $r$ ):

$$\begin{cases} r_{\perp} = \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)} \\ r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} r = \frac{r_{\perp} + r_{\parallel}}{2} & \text{p/ } \theta_1 > 0 \\ r = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 & \text{p/ } \theta_1 = 0 \end{cases}$$

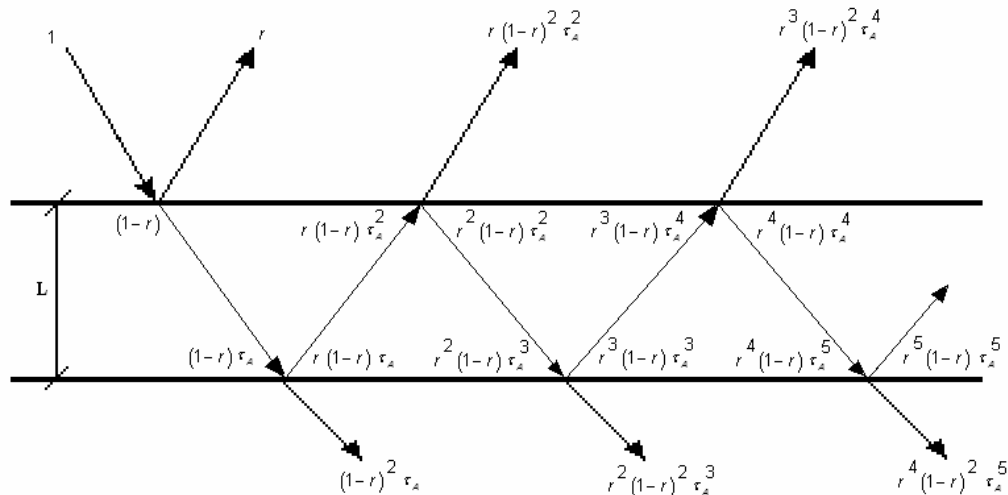
Numa placa de material translúcido como a da fig. 6.2.2, onde ocorra somente absorção, a transmissividade pode ser determinada a partir da integração da lei de Bouguer.



**Fig. 6.2.2 – Absorção pura em uma placa translúcida**

$$dI = -I k dx \Rightarrow \int_{I_0}^{I_x} \frac{dI}{I} = -k \int_0^{\frac{L}{\cos \theta_2}} dx \Rightarrow \ln \left( \frac{I_x}{I_0} \right) = -k \left( \frac{L}{\cos \theta_2} - 0 \right) \Rightarrow \frac{I_x}{I_0} = e^{-\frac{kL}{\cos \theta_2}} = \tau_A$$

Considerando então os múltiplos fenômenos de reflexão, absorção e transmissão nas interfaces dos meios, obtêm-se a situação representada na figura 6.2.3.



**Fig. 6.2.3 – Múltiplas reflexões, absorções e transmissões em uma placa translúcida**

Lembrando que a soma dos termos de uma PG infinita é dada pela expressão:

$$S_{PG} = \frac{a_1}{1-r}$$

Pode-se obter a transmissividade num dado plano pela soma de todas as parcelas transmitidas para o lado interno:

$$\tau_i = (1-r_i)^2 \tau_A + r_i^2 (1-r_i)^2 \tau_A^3 + r_i^4 (1-r_i)^2 \tau_A^5 + \dots = \frac{(1-r_i)^2 \tau_A}{1-(r_i \tau_A)^2}$$

A transmissividade será então a média aritmética entre as transmissividades nos planos perpendicular e paralelo à direção de propagação:

$$\begin{cases} \tau_{\perp} = \frac{(1-r_{\perp})^2 \tau_A}{1-(r_{\perp} \tau_A)^2} \\ \tau_{\parallel} = \frac{(1-r_{\parallel})^2 \tau_A}{1-(r_{\parallel} \tau_A)^2} \end{cases} \Rightarrow \tau = \frac{1}{2}(\tau_{\perp} + \tau_{\parallel})$$

Analogamente para a refletividade, têm-se:

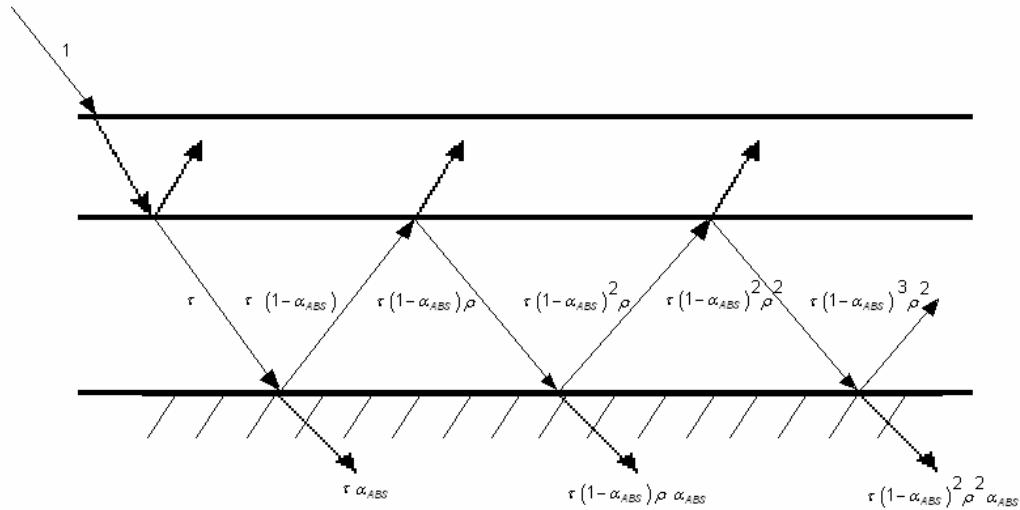
$$\rho_i = r_i + r_i(1-r_i)^2 \tau_A^2 + r_i^3(1-r_i)^2 \tau_A^4 + \dots = r_i + \frac{r_i(1-r_i)^2 \tau_A^2}{1-(r_i \tau_A)^2} = r_i(1 + \tau_A \tau_i)$$

$$\begin{cases} \rho_{\perp} = r_{\perp}(1 + \tau_A \tau_{\perp}) \\ \rho_{\parallel} = r_{\parallel}(1 + \tau_A \tau_{\parallel}) \end{cases} \Rightarrow \rho = \frac{1}{2}(\rho_{\perp} + \rho_{\parallel})$$

E para a absortividade:

$$\begin{aligned}
\alpha_i &= [(1-r_i) - (1-r_i)\tau_A] + [r_i(1-r_i)\tau_A - r_i(1-r_i)\tau_A^2] + [r_i^2(1-r_i)\tau_A^2 - r_i^2(1-r_i)\tau_A^3] + \dots = \\
&= (1-r_i)(1-\tau_A) + r_i(1-r_i)\tau_A(1-\tau_A) + r_i^2(1-r_i)\tau_A^2(1-\tau_A) + \dots = \frac{(1-r_i)(1-\tau_A)}{1-r_i\tau_A} \\
&\begin{cases} \alpha_{\perp} = \frac{(1-r_{\perp})(1-\tau_A)}{1-r_{\perp}\tau_A} \\ \alpha_{\parallel} = \frac{(1-r_{\parallel})(1-\tau_A)}{1-r_{\parallel}\tau_A} \end{cases} \Rightarrow \alpha = \frac{1}{2}(\alpha_{\perp} + \alpha_{\parallel})
\end{aligned}$$

Finalmente considerando os múltiplos fenômenos de reflexão, absorção e transmissão num sistema composto de placa ou tubo translúcido e placa ou tubo absorvedor, obtêm-se a situação representada na figura 6.2.4.



**Fig. 6.2.4 – Múltiplas reflexões, absorções e transmissões em um sistema composto por placas translúcida e absorvedora**

Novamente pode-se obter a radiação absorvida pela placa ou tubo absorvedor, denominada produto  $\tau\alpha$ , pela soma de todas as parcelas absorvidas por este:

$$P_{\tau\alpha} = \tau\alpha_{ABS} + \tau(1-\alpha_{ABS})\rho\alpha_{ABS} + \tau(1-\alpha_{ABS})^2\rho^2\alpha_{ABS} + \dots = \frac{\tau\alpha_{ABS}}{1-(1-\alpha_{ABS})\rho}$$

É importante destacar que devido ao material translúcido para a radiação solar, funcionar como material opaco para a radiação de grande comprimento de onda (emitida pelo material absorvedor), não é necessário considerá-la para a determinação da eficiência do sistema.

Utilizando os valores usuais das propriedades do ar, vidro e superfície absorvedora (pintura negra sobre substrato metálico), pode-se determinar o produto  $\tau\alpha$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{ar} = 1,0 \\ n_{vidro} = 1,526 \\ e_{vidro} = 2,3mm \\ k_{vidro} = 4,0m^{-1} \\ \alpha_{abs} = 0,97 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} r = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 = \left( \frac{1 - 1,526}{1 + 1,526} \right)^2 \cong 0,043 \\ \tau_A = e^{\frac{-kL}{\cos \theta_2}} = e^{\frac{4,2,3 \cdot 10^{-3}}{\cos(0^\circ)}} \cong 0,991 \\ \tau = \frac{(1-r)^2 \tau_A}{1 - (r\tau_A)^2} = \frac{(1-0,043)^2 0,991}{1 - (0,043 \cdot 0,991)^2} \cong 0,909 \\ \rho = r(1 + \tau_A \tau) = 0,043(1 + 0,991 \cdot 0,909) \cong 0,082 \\ P_{\tau\alpha} = \frac{\tau\alpha_{ABS}}{1 - (1 - \alpha_{ABS})\rho} = \frac{0,909 \cdot 0,97}{1 - (1 - 0,97)0,082} \cong 0,88 \end{array} \right.$$

Sabe-se que a radiação solar incidente sobre uma superfície inclinada se relaciona com os dados referentes à superfície horizontal pelo uso de um fator geométrico.

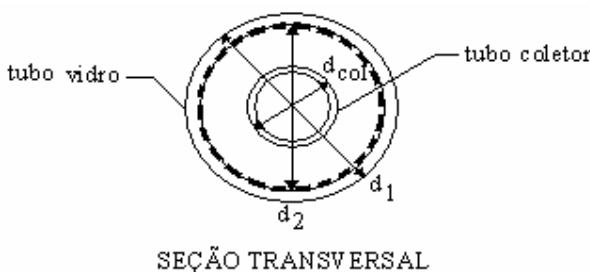
$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} \Rightarrow G_{b,T} = G_b R_b$$

Uma vez que o equipamento em análise será dotado de tracking system, a superfície absorvedora sempre será normal á direção de propagação dos raios, permitindo utilizar  $R_b=1,0$ .

Tendo em vista que nos coletores solares que fazem uso de concentradores, a contribuição da radiação difusa e da refletida pelo solo é desprezível, o fluxo de calor para a superfície absorvedora pode ser dado por apenas:

$$S = C_2 G_b P_{\tau\alpha}$$

Considerando o volume de controle envolvendo toda a tubulação conforme demonstrado na figura 6.2.5 e admitindo que a parcela de radiação absorvida pelo tubo de vidro seja desprezível (em torno de 1% da incidente), o tubo de vidro funcione como material opaco para a radiação emitida pelo tubo coletor, a radiação emitida por este para o ambiente também seja desprezível e que o sistema esteja em regime permanente, é possível determinar a taxa de calor efetivamente fornecida ao fluido pela aplicação do seguinte balanço de energia:

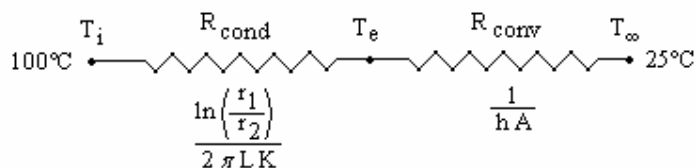


**Fig. 6.2.5 – Seção transversal dos tubos concêntricos**

$$\dot{Q}_{\text{ABSORV}} = \dot{Q}_{\text{FLUIDO}} + \dot{Q}_{\text{PERDAS}} \Rightarrow \dot{Q}_{\text{FLUIDO}} = A_{\text{COL}} S - A_{\text{VIDRO}} U (T_{P,M} - T_A)$$

$$\text{onde: } \begin{cases} A_{\text{COL}} - \text{área do coletor} \\ U - \text{coeficiente global de transferência de calor} \\ T_{P,M} - \text{temperatura média da parede} \\ T_A - \text{temperatura ambiente} \end{cases}$$

Desta forma o principal mecanismo de perda de calor, se dará através da condução radial na parede do tubo de vidro e convecção natural em sua face externa. Estimando a temperatura da face interna em 100°C e a temperatura ambiente em 25°C, obtêm-se o modelo apresentado na figura 6.2.6.



**Fig. 6.2.6 – Diagrama equivalente do circuito térmico**



E resultando no seguinte coeficiente global de transferência de calor:

$$U = \frac{1}{\frac{r_2}{K_{vidro}} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) + \frac{1}{h_{conv}}}$$

Onde o coeficiente de convecção pode ser calculado a partir da definição do número de Nusselt:

$$\bar{Nu}_D = \frac{\bar{h}_{conv} D}{K} \Rightarrow \bar{h}_{conv} = \frac{K}{D} \bar{Nu}_D \quad \left\{ \begin{array}{l} K - \text{condutividade térmica do ar} \\ D - \text{diâmetro externo do tubo de vidro} \\ \bar{Nu}_D - \text{Nusselt médio baseado no diâmetro} \\ \text{externo do tubo de vidro} \end{array} \right.$$

$$\bar{Nu}_D = \left[ 0,60 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left(1 + (0,559 / Pr)^{9/16}\right)^{8/27}} \right]^2 \quad \left\{ \begin{array}{l} Ra - \text{número de Rayleigh} \\ Pr - \text{número de Prandtl} \end{array} \right.$$

$$Ra = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) D}{\alpha \nu} \quad \left\{ \begin{array}{l} g - \text{aceleração da gravidade} \\ \beta - \text{coeficiente de expansão volumétrica} \\ \alpha - \text{difusividade térmica do ar} \\ \nu - \text{viscosidade cinemática do ar} \end{array} \right.$$

A partir das dimensões dos componentes, pode-se então estimar o coeficiente global em:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_l = 100^\circ C \\ T_E \cong 60^\circ C \\ T_\infty = 25^\circ C \\ d_{col} = 12,5 mm \\ d_2 = 32,0 mm \\ d_1 = 36,6 mm \\ K_{vidro} = 1,4 W / mK \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T_f = \frac{T_E + T_\infty}{2} = 315,5 K \Rightarrow \beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{315,5} = 3,17 \cdot 10^{-3} K^{-1} \\ \alpha = 24,8 \cdot 10^{-6} m^2 / s \\ \nu = 17,45 \cdot 10^{-6} m^2 / s \Rightarrow Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{17,45 \cdot 10^{-6}}{24,8 \cdot 10^{-6}} = 0,704 \\ K_{ar} = 27,45 \cdot 10^{-3} W / mK \end{array} \right.$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D}{\alpha\nu} = \frac{9,8.3,17.10^{-3}(60-25)36,6.10^{-3}}{24,8.10^{-6}.17,45.10^{-6}} \cong 9,2.10^7$$

$$\bar{Nu}_D = \left[ 0,60 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left(1 + (0,559 / \text{Pr})^{9/16}\right)^{8/27}} \right]^2 = \left[ 0,60 + \frac{0,387 (9,2.10^7)^{1/6}}{\left(1 + (0,559 / 0,704)^{9/16}\right)^{8/27}} \right]^2 \cong 55$$

$$\bar{h}_{conv} = \frac{K}{D} \bar{Nu}_D = \frac{27,45.10^{-3}}{36,6.10^{-3}} 55 = 41,25 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

$$U = \frac{1}{\frac{r_2}{K_{vidro}} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) + \frac{1}{h_{conv}}} = \frac{1}{\frac{36,6.10^{-3}}{1,4} \ln\left(\frac{36,6}{32}\right) + \frac{1}{41,25}} \cong 36 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

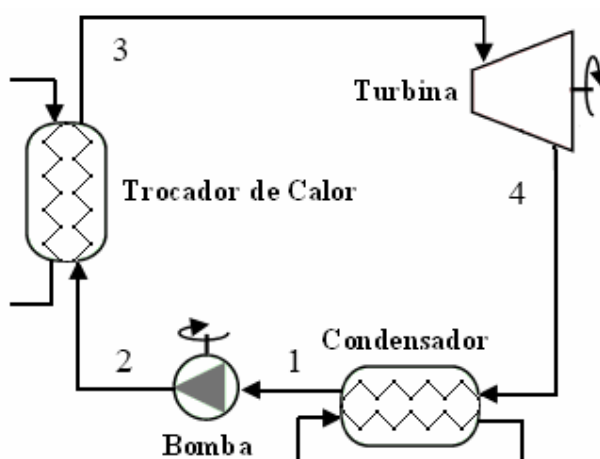
Finalmente a eficiência do coletor pode ser dada por:

$$\eta_{COL} = \frac{P_S}{P_E} = \frac{\dot{Q}_{FLUIDO}}{A_{CONC} G_{b,T}} = \frac{A_{COL} \left[ S - \frac{A_{VIDRO}}{A_{COL}} U (T_{P,M} - T_A) \right]}{C_{m\acute{a}x} A_{COL} G_{b,T}} = \frac{\left[ C_2 G_b P_{\tau\alpha} - \frac{d_{VIDRO}}{d_{COL}} U (T_{P,M} - T_A) \right]}{C_{m\acute{a}x} G_b}$$

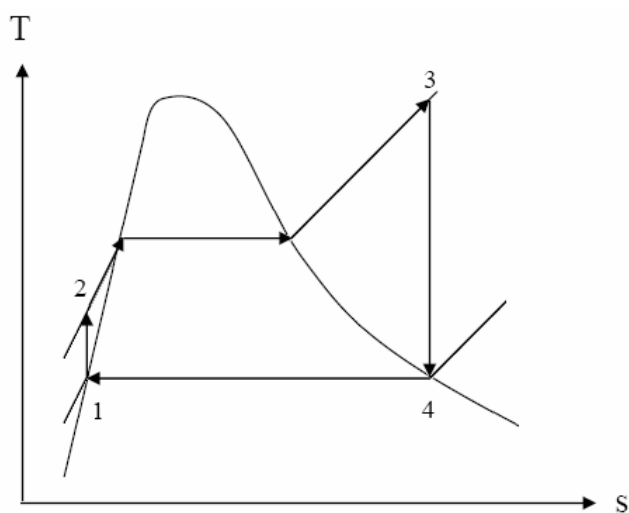
Adotando então  $U = 100 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$ , obtêm-se:

$$\eta_{COL} = \frac{\left[ C_2 G_b P_{\tau\alpha} - \frac{d_{VIDRO}}{d_{COL}} U (T_{P,M} - T_A) \right]}{C_{m\acute{a}x} G_b R_b} = \frac{0,6 \left[ 130.1345.0.88 - \frac{36,6}{12,5} 100(60-25) \right]}{130.1345} \cong 0,49$$

O último estágio do sistema consiste na transferência de calor do óleo para a água gerando vapor para um ciclo de potência. Tal ciclo pode ser aproximado por um ciclo de Rankine, composto pelos 4 processos apresentados na figura 6.2.7 e representados no diagrama T-s da figura 6.2.8.



**Fig. 6.2.7 – Arranjo físico de um ciclo Rankine**



**Fig. 6.2.8 – Representação do ciclo Rankine no diagrama T-s**

- 1-2 Bombeamento adiabático reversível na bomba
- 2-3 Transferência de calor a pressão constante no trocador de calor
- 3-4 Expansão adiabática reversível na turbina
- 4-1 Transferência de calor a pressão constante na caldeira

Considerando que os processos ocorram conforme descrito, em regime permanente e que as variações de energia cinética e potencial sejam desprezíveis, pode-se determinar a eficiência do ciclo através:

$$\eta_{RANK} = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{Q}_h} = \frac{\dot{W}_t - \dot{W}_b}{\dot{Q}_h} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)}$$

Pode-se então perceber a grande influência das condições operacionais, tais como temperatura dos reservatórios térmicos quente e frio na eficiência do ciclo. As condições usuais resultam em eficiências da ordem de 35%. Caso sejam ainda considerados a existência de perdas associadas ao ciclo real, tais como atrito nos internos da turbina, perda de calor através da carcaça desta, irreversibilidades nos internos da bomba, atrito nas paredes das tubulações ou resfriamento abaixo do ponto de saturação no condensador, a eficiência se reduz para cerca de 30%.

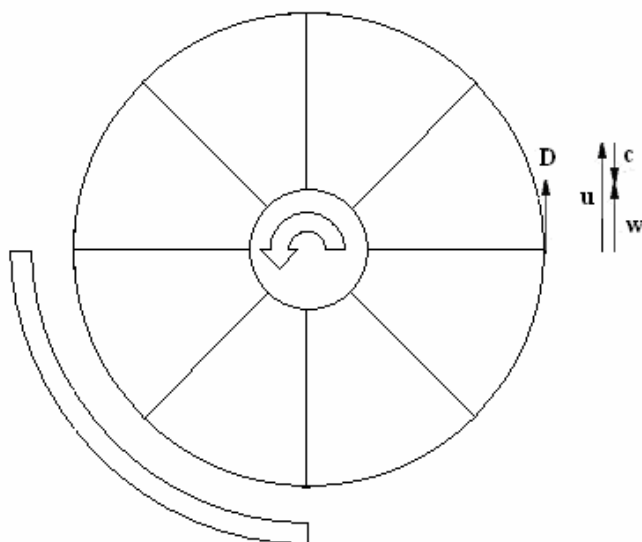
Finalmente é necessário considerar a ocorrência de perdas mecânicas nos mancais e na caixa de transmissão devido ao atrito, estimadas em 5% e perdas no gerador devido á dispersão do campo magnético e efeito Joule, estimadas em 5%.

Uma vez que as conversões analisadas ocorrem em série, a eficiência total do sistema será dada pelo produto das eficiências de cada conversão:

$$\eta_{CP} = \eta_{COL} \cdot \eta_{RANK} \cdot \eta_{MEC} \cdot \eta_{ELE} = 0,49 \cdot 0,30 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cong 0,13$$

### 6.3 Turbinas Eólicas

Um dos aspectos negativos das turbinas de eixo vertical consiste no trabalho realizado pelo rotor contra o escoamento durante metade do ciclo. Embora possa ser minimizado pelo uso de um anteparo curvo dotado de um mecanismo capaz de alterar sua posição angular segundo a direção do vento, como demonstrado no rotor do tipo Panemone da figura 6.3.1, tal fato representa uma redução na eficiência do equipamento.



**Fig. 6.3.1 – Triângulo de velocidades em um rotor Panemone**

Além disso, considerando que o rotor gire no sentido antihorário, a pá se deslocará através do fluido para cima no ponto indicado, segundo uma velocidade  $c = \omega R$  ou considerando um referencial sobre a pá, o fluido escoará com uma velocidade  $\vec{c}$  para baixo. Somando-se vetorialmente com a velocidade do escoamento  $\vec{u}$  obtêm-se  $\vec{w} = \vec{u} - \vec{c}$ . Vê-se desta forma que a velocidade relativa entre fluido e pá numa VAWT será sempre menor que a velocidade do escoamento, representando uma nova redução de eficiência.

Finalmente, como decorrência de sua concepção as VAWTs apresentam menor rigidez estrutural, inviabilizando economicamente sua aplicação em alturas muito elevadas para a obtenção de maior velocidade de escoamento.

Desta forma, as limitações de eficiência e tamanho das VAWTs, tornam as turbinas de eixo horizontal mais indicadas para o uso em instalações comerciais de grande porte.

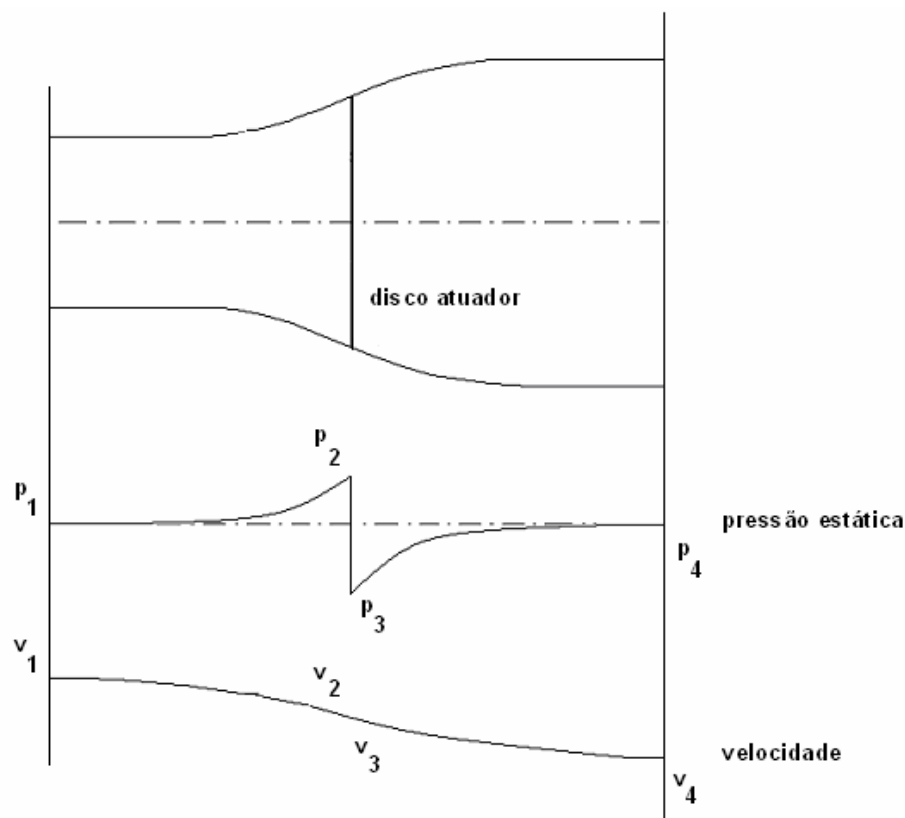
Segundo a teoria do disco atuador, o rotor de uma HAWT é assumido como um disco permeável e indeformável de espessura desprezível, através do qual o escoamento de ar é estabelecido, permitindo que parte da energia cinética deste seja transformada em energia de rotação do disco.

Para tal é considerado um volume de controle ao redor do disco, constituído pelas regiões do fluido perturbadas pela presença do mesmo. Pode-se notar através

da figura 6.3.2, que devido a resistência imposta pelo disco ao escoamento, a medida que este se aproxima do primeiro, a velocidade é decrementada continuamente, acompanhada por uma aumento da pressão estática. No dorso do disco, naturalmente ocorre a formação de uma região de baixa pressão, cuja recuperação até a pressão estática do ambiente é realizada às custas de um novo decremento no valor da velocidade.

Além disso, uma vez que pela equação da continuidade a vazão mássica deve ser constante ao longo do tubo de corrente e a velocidade sofre uma redução, nota-se também um aumento da seção, visando a acomodação do fluido.

Inicialmente faz-se necessário determinar uma expressão para a velocidade na seção 2, em função das velocidades nas seções 1 e 4. Aplicando a equação de Bernoulli ao trecho à montante do disco, obtêm-se:



**Fig. 6.3.2 – Volume de controle ao redor do disco atuador**

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \Rightarrow p_2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 - \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Analogamente para o trecho à jusante:

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho v_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho v_4^2 \Rightarrow p_3 = p_4 + \frac{1}{2}\rho v_4^2 - \frac{1}{2}\rho v_3^2$$

Observando que tanto a pressão à montante como à jusante são iguais a pressão atmosférica e que as velocidades nas seções 2 e 3 apresentam o mesmo valor, das expressões anteriores obtêm-se:

$$p_2 - p_3 = p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 - \frac{1}{2}\rho v_2^2 - p_4 - \frac{1}{2}\rho v_4^2 + \frac{1}{2}\rho v_3^2 = \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_4^2)$$

Permitindo calcular a força axial sobre o disco através:

$$F_x = A_2(p_2 - p_3) = \frac{1}{2}\rho A_2(v_1^2 - v_4^2)$$

Por outro lado, aplicando o princípio da conservação da Quantidade de Movimento ao volume de controle:

$$F_x = \dot{m}(v_1 - v_4) = \rho A_2 v_2 (v_1 - v_4)$$

Igualando-se as equações, resulta finalmente que:

$$v_2 = \frac{(v_1 + v_4)}{2}$$

Para a determinação da Potência disponível para conversão, basta aplicar a 1ª Lei da Termodinâmica a um volume de controle envolvendo o disco atuador:

$${}_2\dot{Q}_3 - {}_2\dot{W}_3 = \dot{m}_2(h_2 + \frac{1}{2}v_2^2 + gz_2) - \dot{m}_3(h_3 + \frac{1}{2}v_3^2 + gz_3)$$

Uma vez que não há troca de calor, pela equação da continuidade as vazões mássicas são constantes e não há variação de altura, considerando-se o conceito de entalpia de estagnação, pode-se reescrever a Potência disponível conforme abaixo:

$${}_2\dot{W}_3 = \dot{m}(h_2^0 - h_3^0)$$

Uma vez que não há realização de trabalho, troca de calor ou perdas, associadas ao escoamento nos trechos a montante e a jusante do disco atuador, sabe-se que não haverá variação da entalpia de estagnação nos referidos trechos, permitindo novamente reescrever a equação obtida como abaixo, onde as entalpias das seções 1 e 4 são a entalpia do ar atmosférico.

$$\dot{W} = \dot{m}(h_2^0 - h_3^0) = \dot{m}(h_1^0 - h_4^0) = \dot{m}(h_1 + \frac{1}{2}v_1^2 - h_4 - \frac{1}{2}v_4^2) = \frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_4^2)$$

Considerando-se a definição de massa específica e equação da continuidade:

$$\dot{W} = \frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_4^2) = \frac{1}{2}\rho A_2 v_2(v_1^2 - v_4^2) = \frac{1}{2}\rho A_2(\frac{v_1 + v_4}{2})(v_1^2 - v_4^2)$$

Definindo a relação entre as velocidades à jusante e à montante como razão de velocidades  $x$ :

$$x = \frac{v_4}{v_1} \Rightarrow \begin{cases} (v_1 + v_4) = v_1(1 + x) \\ (v_1^2 - v_4^2) = (v_1 + v_4)(v_1 - v_4) = v_1(1 + x)v_1(1 - x) \end{cases}$$

Substituindo na equação anterior, obtêm-se:



$$\dot{W} = \frac{1}{2} \rho A_2 v_1^3 \frac{1}{2} (1+x)^2 (1-x)$$

Cujo ponto de máximo pode facilmente ser determinado:

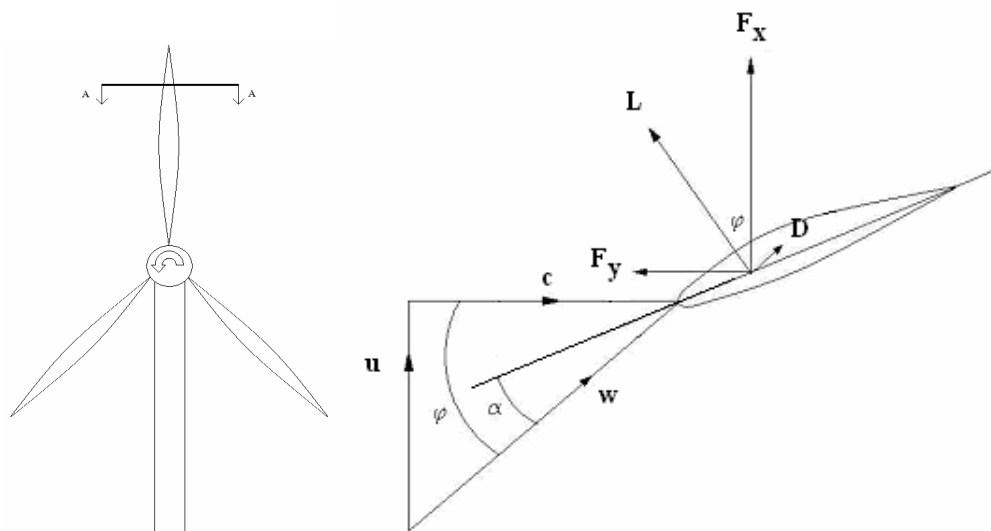
$$\frac{\partial \dot{W}}{\partial x} = K \left[ 2(1+x)(1-x) + (1+x)^2(-1) \right] = K \left[ -3x^2 - 2x + 1 \right] = K(x+1)(-3x+1)$$

$$\therefore x_{\max} = \frac{1}{3}$$

Substituindo na equação anterior, obtêm-se que a máxima Potência disponível é dada por :

$$\frac{1}{2} (1+x)^2 (1-x) = \frac{16}{27} \Rightarrow P = \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho A_2 v_1^3 \right) = \frac{16}{27} P_{EOL}$$

Fica demonstrado assim, ser possível capturar no máximo 59,3% da energia cinética associada a um escoamento, utilizando a tecnologia HAWT. Porém é necessário considerar ainda que uma parcela desta energia será usada na flexão das pás, não contribuindo para compor o torque de acionamento do rotor. Tal parcela pode ser determinada a partir do corte transversal indicado na figura 6.3.3.



**Fig. 6.3.3 – Forças aerodinâmicas atuantes sobre as pás**

Considerando que visto de frente o rotor gire no sentido antihorário, a pá se deslocará através do fluido para a esquerda no corte mencionado, segundo uma velocidade  $c = \omega R$  ou considerando um referencial sobre a pá, o fluido escoará com uma velocidade  $\vec{c}$  para a direita. Somando-se vetorialmente a velocidade axial do fluido  $\vec{u}$ , obtêm-se então a velocidade relativa entre fluido e pá  $\vec{w}$ .

Devido ao escoamento através do perfil, atuarão sobre este uma força de arrasto (na mesma direção de  $w$ ) e outra de sustentação (ortogonal) com intensidades dadas pelas expressões a seguir:

$$\begin{cases} D = C_D \frac{1}{2} \rho A w^2 \\ L = C_L \frac{1}{2} \rho A w^2 \end{cases}$$

Os coeficientes de Arrasto e Sustentação dependem principalmente das dimensões, geometria e acabamento superficial do perfil, além do ângulo entre o eixo deste a direção da velocidade  $\vec{w}$ , indicado por  $\alpha$  e denominado ângulo de ataque. Para efeito de cálculos YAHYA(1983) considera-se  $C_L$  cinco vezes maior que  $C_D$ .

Expressando estas forças, segundo um referencial fixo para a estrutura da turbina, encontram-se as forças axial  $\vec{F}_x$  (responsável pela flexão das pás) e tangencial  $\vec{F}_y$  (responsável pelo torque motor) conforme:

$$\begin{cases} F_x = L \cos \phi + D \sin \phi \\ F_y = L \sin \phi - D \cos \phi \end{cases}$$

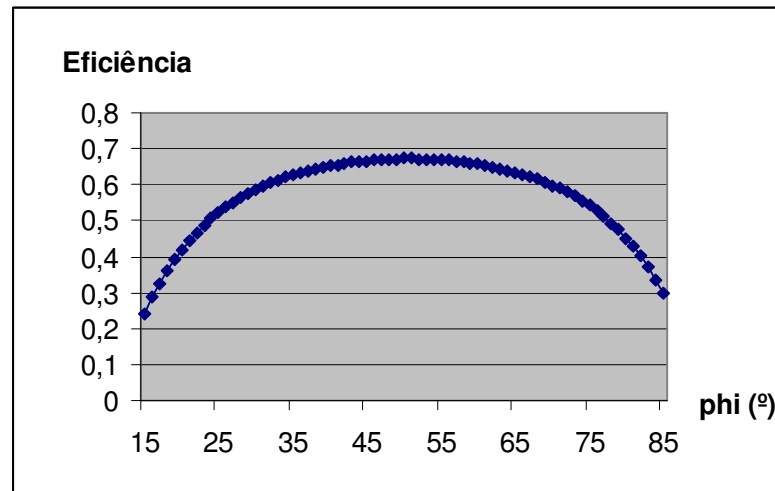
A eficiência aerodinâmica pode ser expressa por:

$$\eta = \frac{P_s}{P_E} = \frac{\vec{F}_y \cdot \vec{c}}{\vec{F}_y \cdot \vec{u} + \vec{F}_x \cdot \vec{u}} = \frac{F_y \cdot c}{0 + F_x \cdot u} = \frac{F_y}{F_x} \cot \phi$$

Substituindo obtêm-se:

$$\eta = \frac{F_y}{F_x} \cot \phi = \frac{L \sin \phi - D \cos \phi}{L \cos \phi + D \sin \phi} \cot \phi = \frac{1 - \frac{D}{L} \cot \phi}{1 + \frac{D}{L} \tan \phi} = \frac{1 - \frac{C_D}{C_L} \cot \phi}{1 + \frac{C_D}{C_L} \tan \phi}$$

Substituindo valores usuais para a relação entre os coeficientes de Arrasto e Sustentação, é possível construir um gráfico da variação da eficiência aerodinâmica em função do ângulo  $\phi$ , conforme apresentado na figura 6.3.4 evidenciando um valor máximo da ordem de 67,2%.



**Fig. 6.3.4 – Variação da eficiência aerodinâmica devido a  $\phi$**

Finalmente é necessário considerar a ocorrência de perdas mecânicas nos mancais e na caixa de transmissão devido ao atrito, estimadas em 10% e perdas no gerador devido á dispersão do campo magnético e efeito Joule, estimadas em 5%.

Uma vez que as conversões analisadas ocorrem em série, a eficiência total do sistema será dada pelo produto das eficiências de cada conversão:

$$\eta_{HAWT} = \eta_{EOL} \cdot \eta_{AER} \cdot \eta_{MEC} \cdot \eta_{ELE} = 0,593 \cdot 0,672 \cdot 0,9 \cdot 0,95 \cong 0,34$$

## 7 DADOS CLIMATOLÓGICOS

### 7.1 Perfis de insolação

A intensidade de radiação extraterrestre apresenta uma variação temporal correspondente ao movimento de translação ao redor do Sol. Tal fato decorre da inclinação do eixo imaginário de rotação da Terra e do formato elíptico da órbita de translação, conforme se visualiza na figura 7.1.1. Seu reflexo na radiação sobre a superfície da Terra pode ser avaliado multiplicando-se a radiação média anual pelos respectivos fatores da tabela 7.1.1 (em função da latitude e mês do ano).



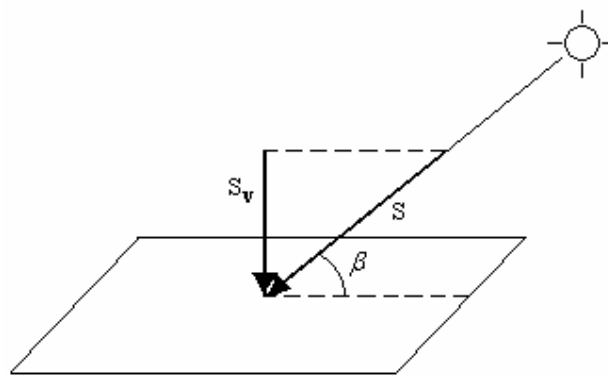
**Fig. 7.1.1 – Movimento de translação da Terra ao redor do Sol**

	0	S5	S10	S15	S20	S25	S30
<b>JAN</b>	0,941	0,992	1,044	1,096	1,149	1,208	1,271
<b>FEV</b>	0,988	1,018	1,050	1,081	1,114	1,152	1,193
<b>MAR</b>	1,023	1,031	1,039	1,046	1,053	1,057	1,061
<b>ABR</b>	1,034	1,013	0,991	0,972	0,951	0,919	0,885
<b>MAI</b>	1,012	0,967	0,921	0,873	0,823	0,774	0,722
<b>JUN</b>	0,993	0,937	0,880	0,822	0,762	0,697	0,628
<b>JUL</b>	1,004	0,955	0,905	0,849	0,791	0,735	0,675
<b>AGO</b>	1,034	1,006	0,977	0,943	0,907	0,868	0,826
<b>SET</b>	1,046	1,042	1,039	1,034	1,030	1,021	1,011
<b>OUT</b>	1,023	1,042	1,061	1,084	1,109	1,137	1,168
<b>NOV</b>	0,971	1,010	1,050	1,098	1,149	1,205	1,266
<b>DEZ</b>	0,930	0,987	1,044	1,102	1,161	1,226	1,296

**Tab. 7.1.1 – Fatores de correção temporal anuais**

Multiplicando-se tais fatores por 12h, também é possível estimar com boa precisão a duração do dia em função da latitude e mês do ano.

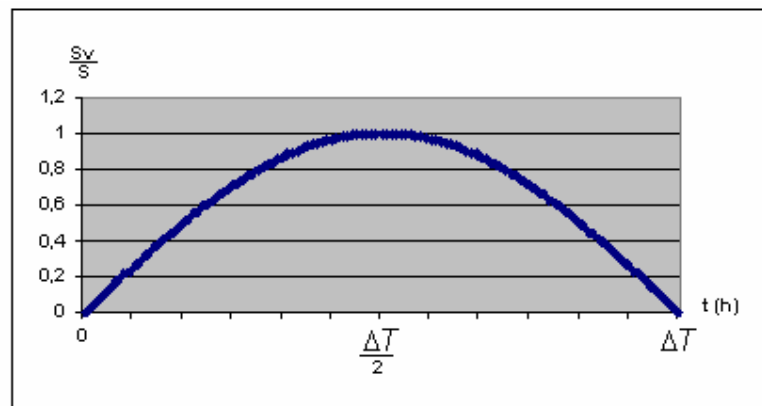
Obtida a intensidade de radiação sobre a superfície do planeta, para cada latitude e mês do ano, haverá ainda uma outra variação temporal correspondente ao movimento de rotação da Terra. Geralmente os valores apresentados nos perfis solarimétricos correspondem a medições realizadas exatamente ao meio dia. Para os demais horários a componente vertical da radiação será menor conforme demonstra a figura 7.1.2.



**Fig. 7.1.2 – Ângulo de altitude**

Desta forma, pode-se modelar o comportamento pela expressão abaixo, resultando no perfil da figura 7.1.3.

$$S_v = S \cdot \sin(\beta) = S \cdot \sin\left(\frac{t}{\Delta T} \pi\right)$$



**Fig. 7.1.3 – Variação sazonal diária**

## 7.2 Caracterização da insolação sobre o território Brasileiro

Embora os dados solarimétricos locais podem ser levantados com a utilização de poucos instrumentos, um piranômetro para medição da radiação total, um piroheliômetro para determinação da parcela de radiação direta e um heliógrafo para determinação da duração dos períodos de insolação, atualmente os mapas solarimétricos têm sido construídos de forma muito mais sofisticada.

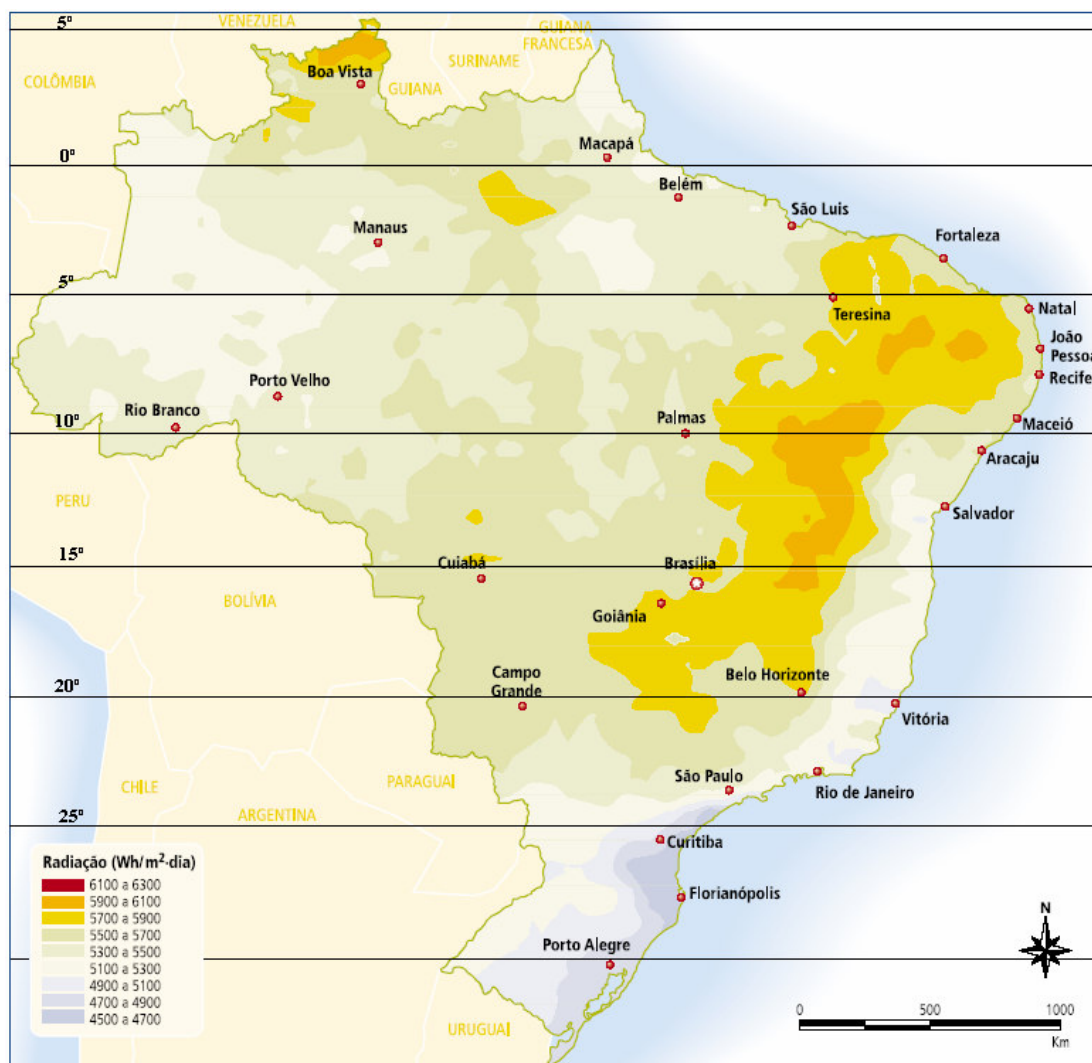


Fig. 7.2.1 – Média anual de insolação diária

Uma vez que as intensidades de radiação extraterrestre, assim como os efeitos decorrentes da rotação da Terra podem ser precisamente determinados, o principal fator de modulação do fluxo que atinge a superfície consiste nas nuvens. O modelo BRAZILSR estima a espessura da camada de nuvens e conseqüentemente a radiação solar sobre a superfície da Terra, a partir das imagens fornecidas pelo satélite geoestacionário GOES-8, indicando a intensidade de radiação refletida por aquelas (Albedo das nuvens).

As médias anuais de insolação diária, calculadas a partir das leituras de 1995 a 1998, são apresentadas na forma de mapas de código de cores, na figura 7.2.1.

### 7.3 Distribuições de velocidades associadas aos ventos

A potência associada ao escoamento de um fluido pode ser obtida a partir da aplicação da primeira lei da termodinâmica a um volume de controle envolvendo um tubo de corrente, no qual não ocorra troca de calor, variação da entalpia ou mudança de cota.

$$\begin{aligned}\dot{Q} - \dot{W} &= \dot{m}_2 \left( h_2 + \frac{1}{2} v_2^2 + g z_2 \right) - \dot{m}_1 \left( h_1 + \frac{1}{2} v_1^2 + g z_1 \right) \\ \dot{W} &= \dot{m} \left( \frac{1}{2} v_1^2 - \frac{1}{2} v_2^2 \right) = \dot{m} \left( \frac{1}{2} v_1^2 - 0 \right) = \frac{1}{2} \dot{m} v_1^2\end{aligned}$$

Considerando a equação da continuidade, obtêm-se então:

$$P_{EOL} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} \rho v A v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Fica assim evidenciada a dependência direta da potência eólica com relação a área de varredura e o cubo da velocidade. Porém tal velocidade apresentará diferentes valores não somente para diferentes pontos da área de varredura, como em diferentes instantes para um mesmo ponto, influenciando fortemente a potência associada ao escoamento.

Assim para a descrição da variação espacial dos ventos são utilizados perfis verticais de velocidades para determinação das velocidades médias em função da

altura, acrescidos de modelos de turbulência, responsáveis pelas micro-flutuações ao redor dos valores médios, conforme. Uma vez que a caracterização da turbulência é de maior interesse para o dimensionamento das estruturas à fadiga e controle vibracional, serão apresentados a seguir apenas os principais perfis de velocidades.

- Lei da Potência: Obtida a partir de dados experimentais, apresenta fácil aplicação e boa precisão em baixas altitudes para a determinação do perfil vertical de velocidades.

$$u(z) = u_R \left( \frac{z}{z_R} \right)^\alpha \quad \text{onde:} \quad \begin{cases} u_R - \text{velocidade na altura de referência} \\ z_R - \text{altura de referência (10,0m)} \\ \alpha - \text{expoente empírico de variação da velocidade} \end{cases}$$

Os valor correto de  $\alpha$  é de difícil determinação, uma vez que varia com a rugosidade do terreno, gradiente de temperatura na atmosfera sobre o local e a velocidade do vento em regime permanente dentre outros fatores. Em 1977 Kaufman propôs uma expressão para a determinação de  $\alpha$  a partir da velocidade de referência.

$$\alpha = 0,55 \cdot u_R^{-0,77}$$

Em 1979 a expressão é aperfeiçoada por Spera e Richards, com a inclusão da rugosidade superficial do terreno  $z_0$ , cujos valores de referência são apresentados na tabela 7.3.1.

$$\alpha = \left( \frac{z_0}{10} \right)^{0,2} \left[ 1 - 0,55 \log(u_R) \right]$$

- Lei Logarítmica-Linear: Deduzida a partir da mecânica dos fluidos, embora envolva uma complexidade um pouco maior, apresenta boa precisão para a determinação do perfil vertical de velocidades, em grandes altitudes inclusive, uma vez que considera fenômenos de instabilidade atmosférica.



Tipo de terreno	Rugosidade Superficial Típica (m)
<b>áreas urbanas e suburbanas</b>	
metrópoles com muitas edificações altas	3
metrópoles e cidades grandes	1,2
cidades pequenas	0,55
bairros afastados	0,4
<b>florestas e matas</b>	1,2 a 0,4
<b>campos e fazendas</b>	
muitas árvores e arbustos com poucas edificações	0,3
árvores e arbustos espalhados	0,15
muitos arbustos	0,085
poucas árvores, verão	0,055
plantações e capim alto	0,05
árvores isoladas	0,025
capim baixo (sem corte)	0,02
poucas árvores, inverno	0,01
capim cortado	0,007
neve sobre área cultivável	0,002
<b>grandes extensões de água</b>	
áreas costeiras com ventos oceânicos	0,001
mar aberto calmo	0,0001
<b>deserto plano</b>	0,001 a 0,0001
<b>neve sobre terreno plano</b>	0,0001
<b>gelo</b>	0,00003 a 0,00001

**Tab. 7.3.1 – Rugosidade superficial para diversos tipos de terreno**

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) + \psi_s \left( \frac{z}{L_s} \right) \right]$$

$$\text{onde: } \begin{cases} u_* - \text{velocidade de fricção (m/s)} \\ \kappa - \text{Constante de Von Karman } (\cong 0,4) \\ z_0 - \text{rugosidade superficial (m)} \\ \psi_s - \text{função estabilidade atmosférica (m/s)} \\ L_s - \text{comprimento de estabilidade de Monin-Obukhov (m)} \end{cases}$$

Uma vez que a razão  $u_*/\kappa$  é de difícil avaliação, usualmente é calculada utilizando a velocidade de referência  $u_R$  na altura de referência.

$$\frac{u_*}{\kappa} = \frac{u_R}{\ln \left( \frac{z_R}{z_0} \right) + \psi_s \left( \frac{z_R}{L_s} \right)}$$

A estabilidade da atmosfera é governada pela distribuição vertical de temperaturas, decorrente do aquecimento pela radiação solar e resfriamento na superfície da terra, responsáveis pelos movimentos convectivos nas adjacências destes fenômenos. Em decorrência disso, a atmosfera é classificada em neutra, estável ou instável. As funções para cada um destes estados é apresentada a seguir:

$\psi_s = 0$ , para uma atmosfera neutra

$\psi_s = 4,5 \frac{z}{L_s}$ , para o trecho linear ( $z \leq L_s$ ) de uma atmosfera estável

$\psi_s = 4,5 \left( 1 + \ln \left( \frac{z}{L_s} \right) \right)$ , trecho logarítmico de uma atmosfera estável

$\psi_s = -0,5 \frac{z}{L_s}$ , para o trecho linear ( $z \leq L_s$ ) de uma atmosfera instável

$\psi_s = -0,5 \left( 1 + \ln \left( \frac{z}{L_s} \right) \right)$ , trecho logarítmico de uma atmosfera instável

Outro importante aspecto para a caracterização dos ventos consiste na descrição da sua variação temporal. Para tal é analisada a persistência e a distribuição de freqüências anual das velocidades.

A primeira consiste no tempo de permanência sem interrupção da velocidade média, em determinada intensidade e direção, comumente representada sobre a rosa dos ventos, permitindo o dimensionamento de sistemas de armazenamento de energia, a seleção da forma de interconexão elétrica ou mesmo a avaliação da viabilidade econômica.

Já a distribuição de freqüências expressa o tempo anual acumulativo em um determinado intervalo de velocidades, sendo de fundamental importância para a determinação da energia anual de entrada. Embora também hajam trabalhos publicados utilizando distribuições Gamma, Lognormal, Gaussiana Inversa e Normal-quadrática, a chamada distribuição de Weibull é a que melhor se ajusta à variação do regime de ventos.

$$f(u) = \frac{8760}{C} k \left( \frac{u}{C} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{u}{C} \right)^k} \quad \text{onde:} \quad \begin{cases} C - \text{fator de escala (m/s)} \\ k - \text{fator de forma} \end{cases}$$

Na década de 70 os valores mais adequados para os fatores de forma e escala foram então definidos pelo departamento de energia da NASA para o programa de energia eólica norte-americano, originando a chamada distribuição de referência.

$$\begin{cases} C_R = 7,17 \text{ m/s} \\ k_R = 2,29 \\ \rho_R = 1,225 \text{ kg/m}^3 \end{cases}$$

Considerando todos os aspectos apresentados, pode-se estimar a energia anual de entrada com maior precisão, a partir da densidade ou fluxo de potência para um tubo de corrente num dado instante:

$$p_w = \frac{P_{EOL}}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3$$

Integrando em relação ao tempo, pode-se obter a densidade anual de energia para o referido tubo de corrente:

$$e_w(z) = \int_{ANO} p_w(z) dt = \int_0^\infty p_w(z) f(u) du = \frac{1}{2} \rho \int_0^\infty u^3(z) f(u) du$$

E finalmente integrando em relação a área de varredura, é possível obter a energia anual de entrada:

$$E_w = \int_A e_w(z) dA = \int_H e_w(z) L(z) dz = \frac{1}{2} \rho \int_{z_{MIN}}^{z_{MAX}} \int_0^\infty u^3(z) f(u) L(z) du dz$$

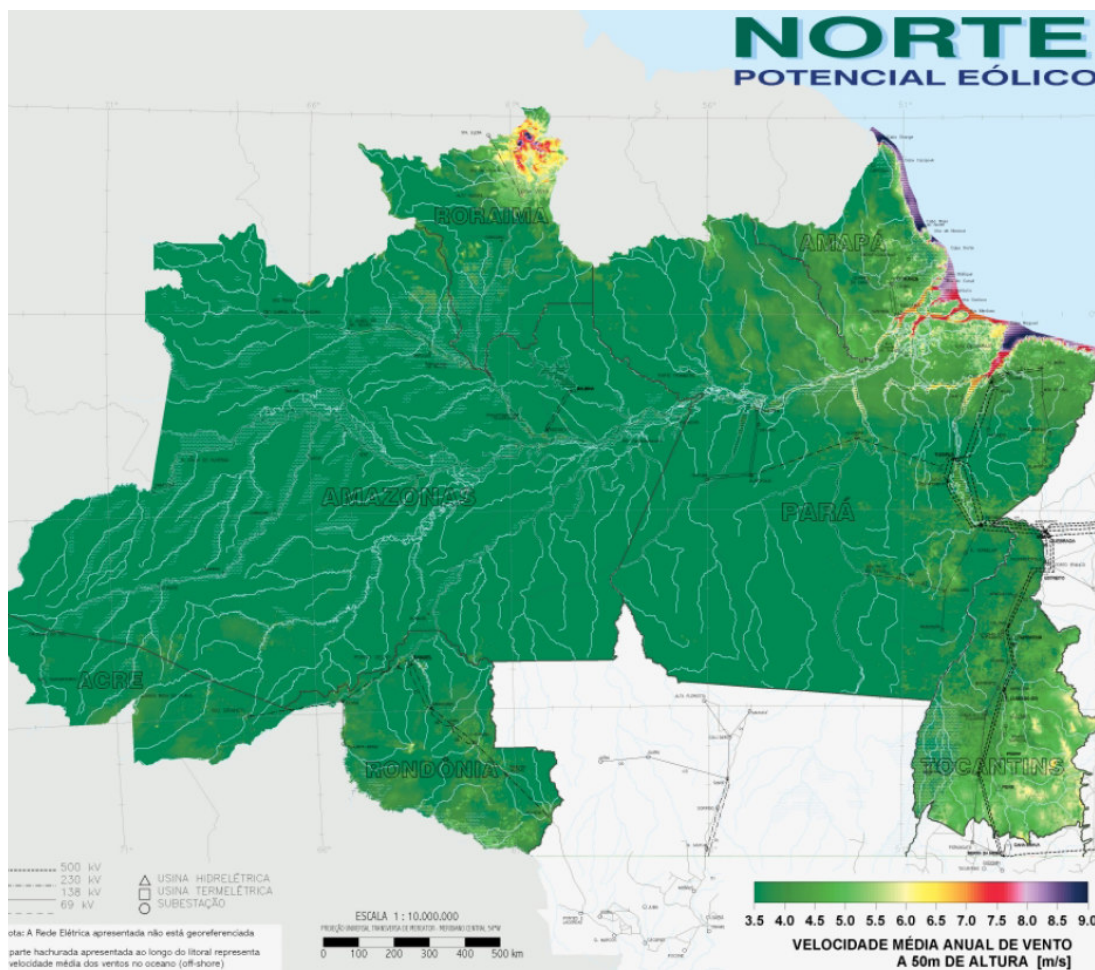
Por fim é interessante destacar, que a determinação da localização de uma planta é definida não somente através da energia anual de entrada, do nível de turbulências e da persistência das velocidades médias, mas diversos outros fatores

como a ocorrência de tempestades, furacões e nevascas, a proximidade de ocupação humana, a acessibilidade do local, a disponibilidade de materiais para construção e a distância do centro de consumo.

#### **7.4 Caracterização dos ventos atuantes no território Brasileiro**

As informações apresentadas a seguir foram obtidas através de simulação computacional utilizando o aplicativo comercial MesoMap. A etapa de pré-processamento envolveu a discretização do território brasileiro com uma resolução final de  $15km^2$ , refinada para  $3,6km^2$  em alguns locais, seguida de uma cuidadosa alimentação do sistema com mapas digitais de relevo, hidrografia e vegetação e um sem número de outras informações. As simulações foram então executadas para 360 dias do ano e um período de 15 anos, gerando um banco de dados de variáveis do vento e meteorológicas, tais como temperatura, pressão, umidade relativa, energia cinética turbulenta e fluxo de calor. O pós-processamento envolveu a compilação dos dados em mapas temáticos utilizando códigos de cores e rosas dos ventos. Os resultados obtidos foram comparados com as leituras das estações de medição eólica sobre o território, subsidiando novas iterações até que a validação fosse obtida. Os mapas finais foram publicados no Atlas de Potencial Eólico do Brasil.

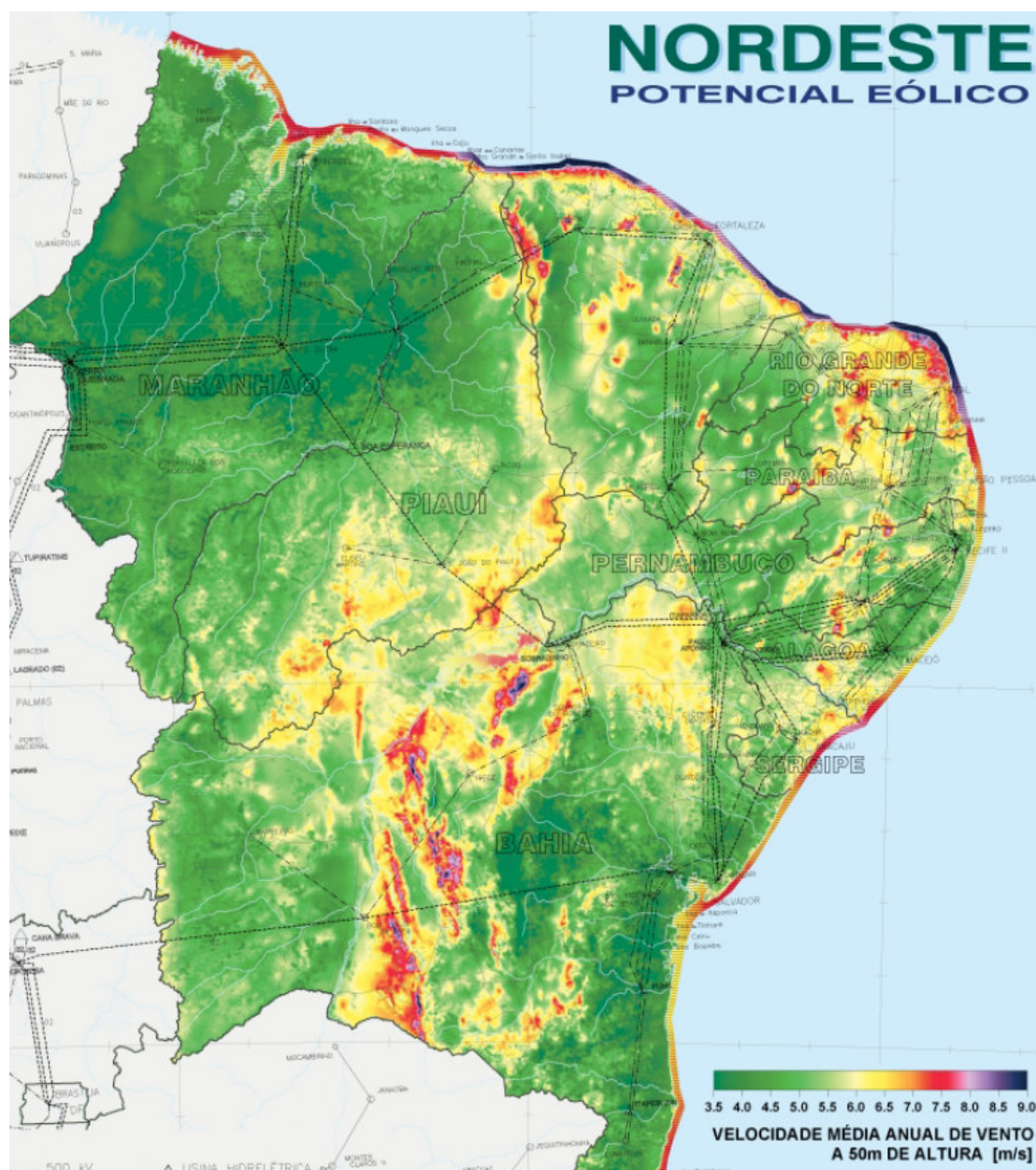
A figura 7.4.1 demonstra que na região da Bacia Amazônica, o escoamento atmosférico apresenta predominância na direção leste (alísios) e velocidades médias anuais inferiores a 3,5m/s a 50m de altura. Isso ocorre devido ao elevado atrito superficial associado a longas trajetórias sobre florestas densas e com reduzidos gradientes horizontais de pressão. Única ressalva ocorre na divisa com a Venezuela, na região da serra Pacaraima onde devido às altitudes entre 1000 e 2000m, ocorrem ventos médios anuais de 8,0m/s.



**Fig. 7.4.1 – Velocidades médias anuais sobre a região Norte**

Na faixa costeira que se estende do norte do Amapá até o Cabo de São Roque (RN), a combinação de brisas marinhas (devido a diferença de temperatura entre terra e mar) e os ventos alísios de leste, resultam em velocidades médias anuais entre 5,0 e 9,0m/s aumentando segundo o afastamento da linha do Equador.

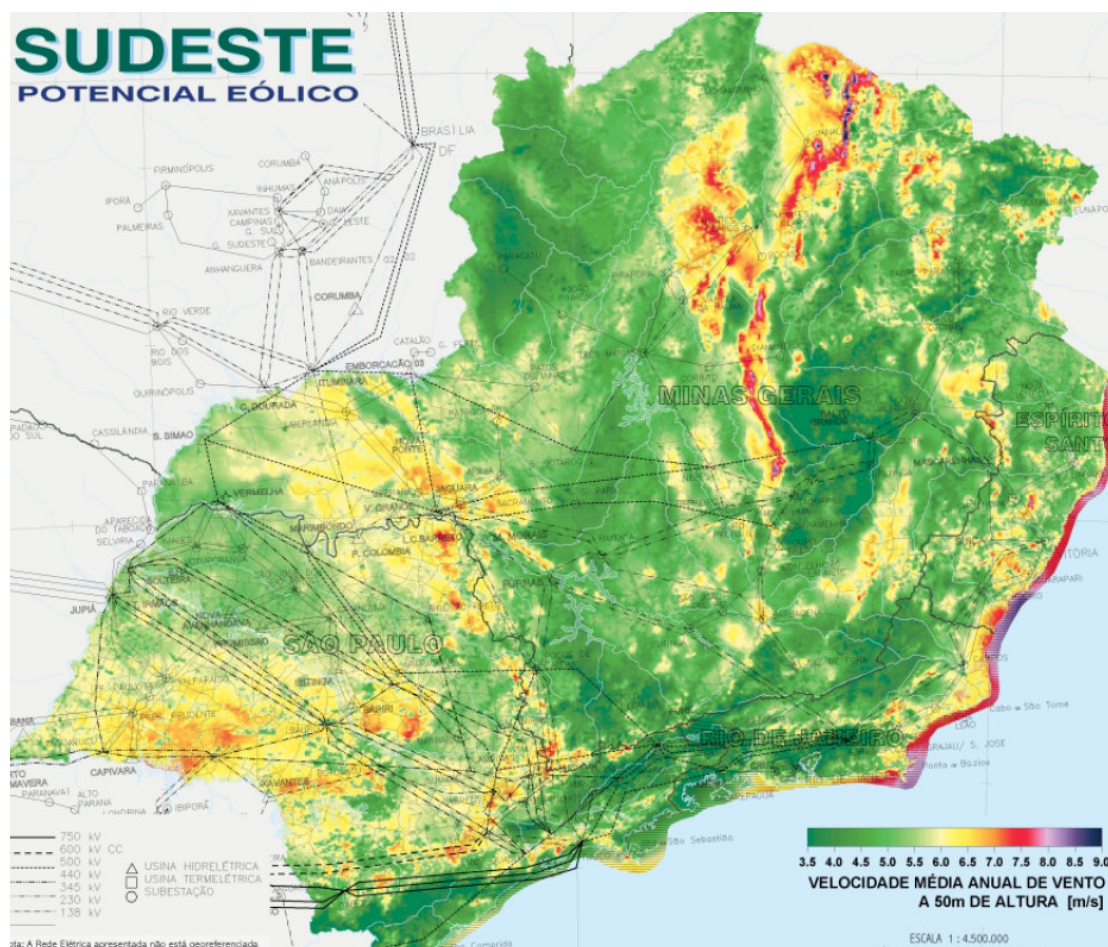
No trecho seguinte as velocidades voltam a diminuir permanecendo entre 6,0 e 7,5m/s até o Rio Janeiro. Única ressalva se faz na divisa entre os estados de ES e RJ, onde devido ao bloqueio causado pelas montanhas adjacentes à costa, o escoamento originado pelo Anticiclone Subtropical Atlântico é forçado a se desviar para Sul e pelo princípio da conservação de massa atinge velocidades médias anuais de até 9,0 m/s como demonstram as figuras 7.4.1, 7.4.2 e 7.4.3.



**Fig. 7.4.2 – Velocidades médias anuais sobre a região Nordeste**

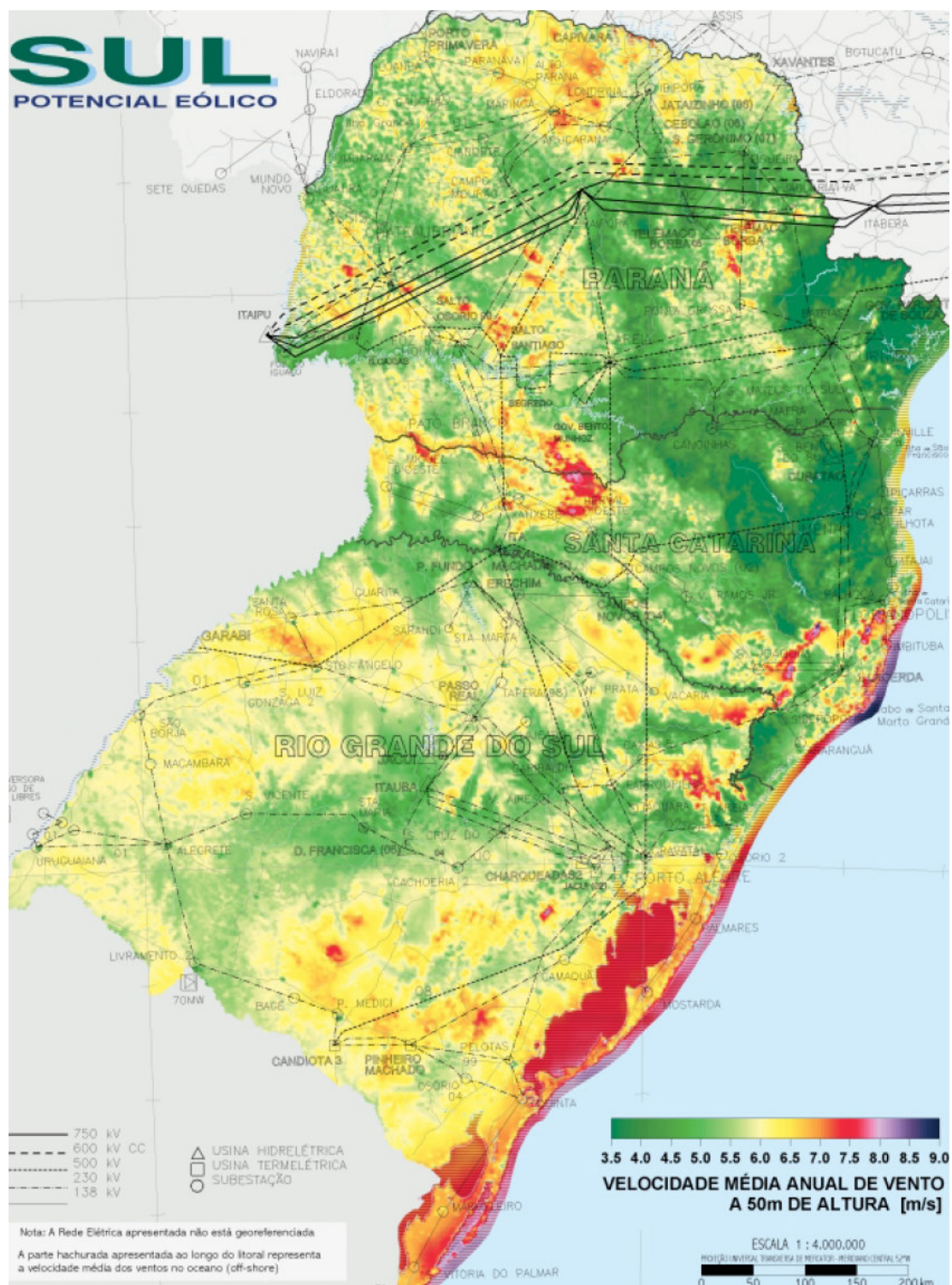
Além disso nas áreas de serras e chapadas que se estendem ao longo da costa brasileira desde o RN até o RJ a distâncias de até 1000 km da costa, devido ao achatamento vertical da área de escoamento, velocidades médias anuais de 6,5 até 8,0 m/s são encontradas, conforme figuras 7.4.2 e 7.4.3.





**Fig. 7.4.3 – Velocidades médias anuais sobre a região Sudeste**

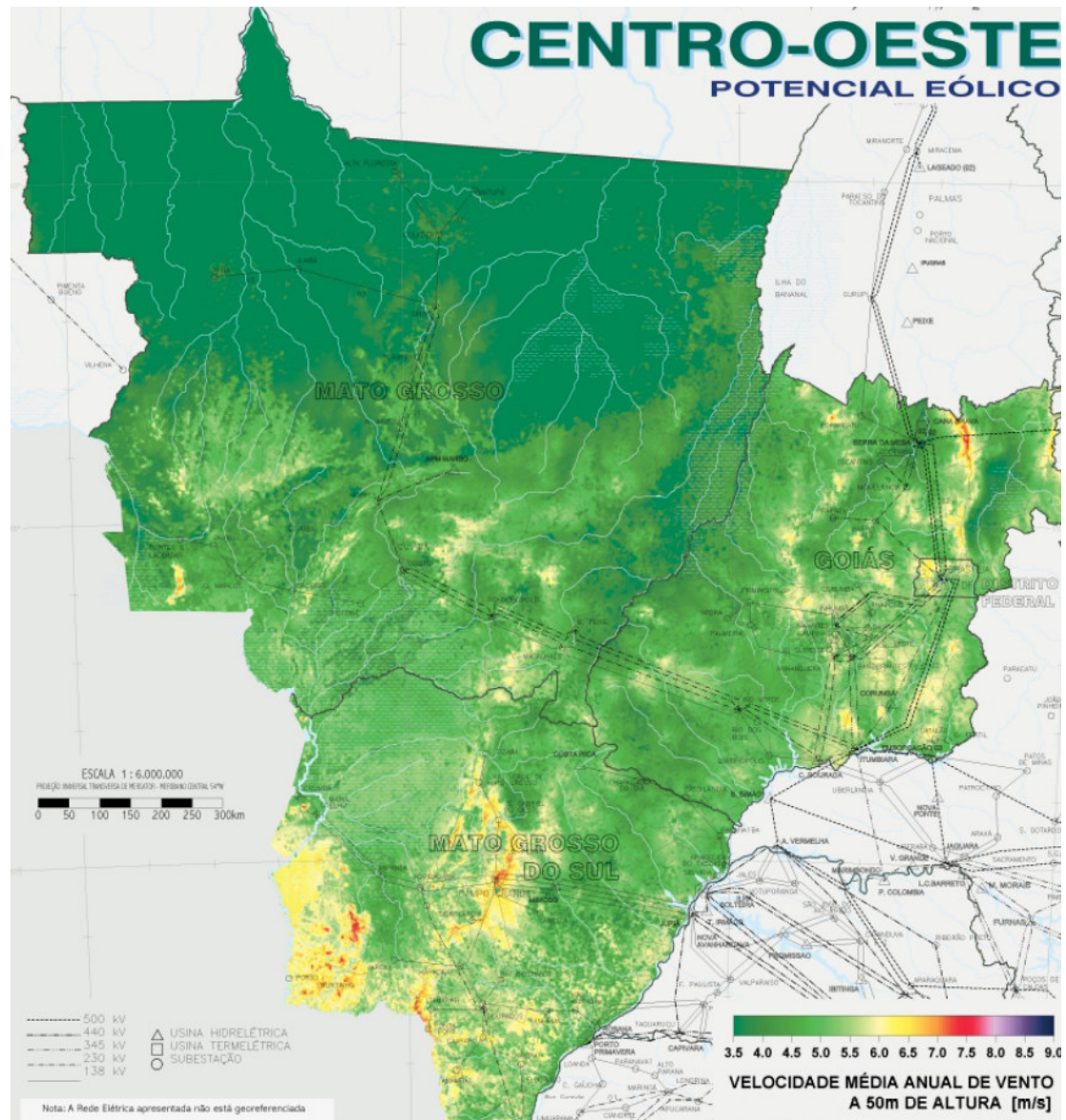
Nos planaltos do Sul, o gradiente de pressão entre a Depressão de Nordeste da Argentina e o Anticiclone Subtropical Atlântico sustenta um escoamento permanente com médias anuais entre 5,5 e 6,5 m/s ao longo desta área, atingindo até 8,0 m/s nos trechos mais montanhosos pelo efeito de compressão vertical e no litoral do RS pela contribuição das brisas marinhas, verificado na figura 7.4.4.



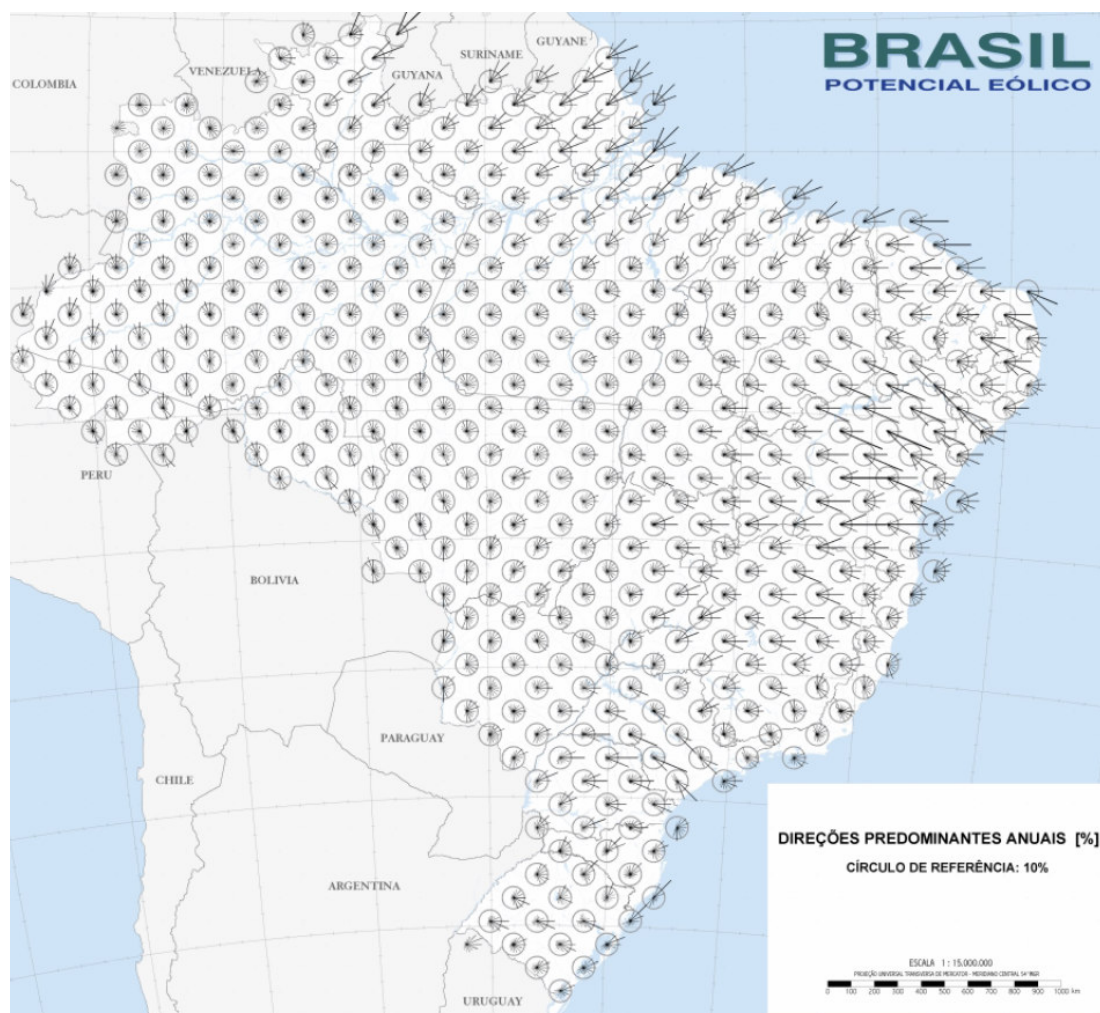
**Fig. 7.4.4 – Velocidades médias anuais sobre a região Sul**



Finalmente no Planalto Central, as velocidades aumentam para Sul, devido aos maiores gradientes de pressão e menor rugosidade superficial do terreno, atingindo valores de 6,0 m/s. Na fronteira com o Paraguai são encontradas velocidades médias anuais de 7,0 m/s, novamente devido ao efeito de compressão vertical.

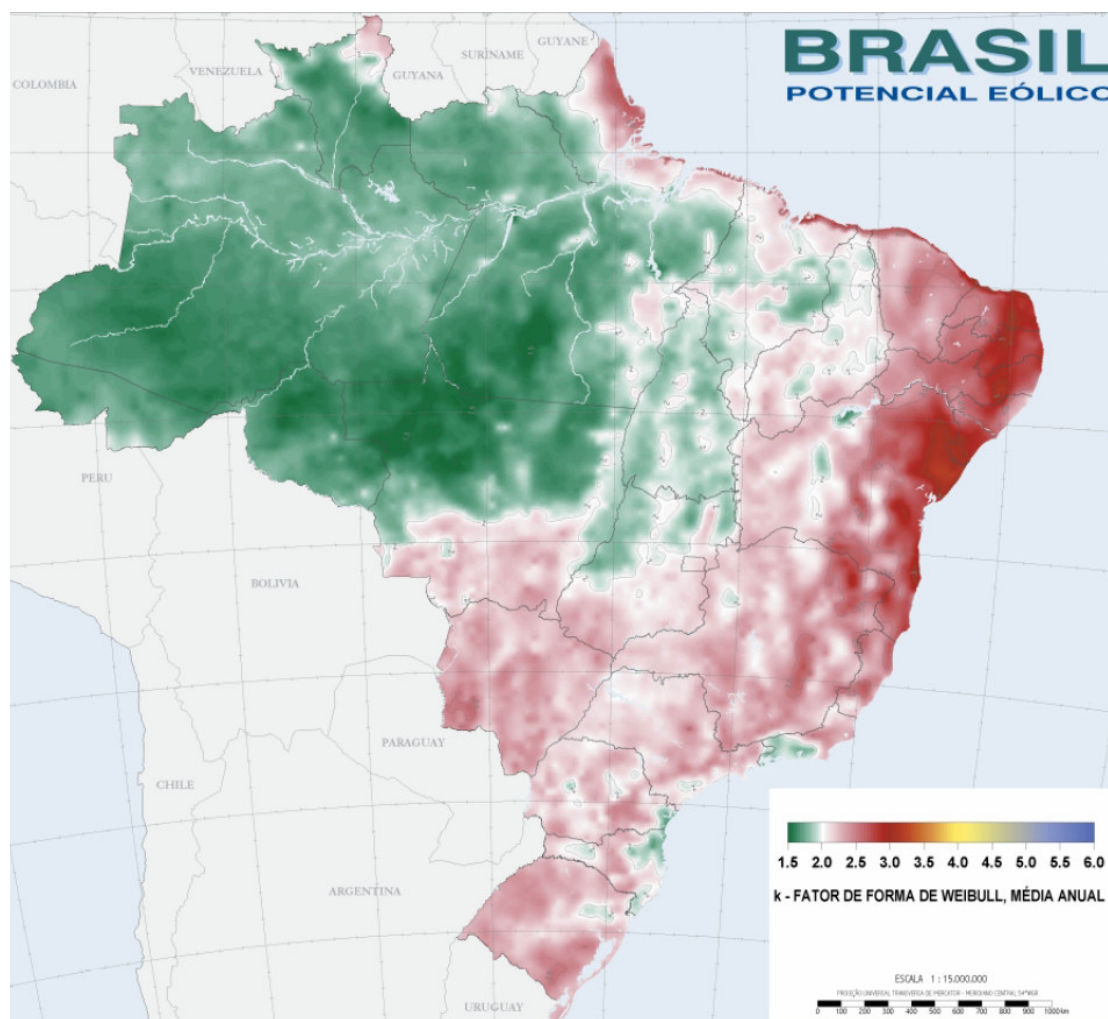


**Fig. 7.4.5 – Velocidades médias anuais sobre a região Centro-Oeste**



**Fig. 7.4.6 – Direções predominantes anuais sobre o território brasileiro**

Além das velocidades médias anuais, a publicação referida também apresenta para o território brasileiro, as direções predominantes anuais através de diversas rosas do ventos reproduzidas na figura 7.4.6 e os fatores de forma de Weibull médios anuais, reproduzido na figura 7.4.7.



**Fig. 7.4.7 – Fatores de forma de Weibull médios anuais sobre o território brasileiro**

## 8 CONCLUSÕES

Inicialmente utilizando os censos populacionais disponibilizados pela ONU e IBGE e os balanços energéticos disponibilizados pelo Ministério de Minas e Energia do Brasil e pela agência internacional de energia (IEA), foram projetadas as populações mundial e brasileira em 2050, assim como seu consumo de energia elétrica e emissão de CO<sub>2</sub>, supondo a manutenção das atuais matrizes energéticas, do grau de industrialização e da dependência de eletricidade nas atividades domésticas. Particularmente no caso do Brasil, tal demanda representaria um aumento de 54% em relação a demanda de 2002.

Foi determinado também que se a demanda emergente fosse atendida exclusivamente por algum dos insumos energéticos não renováveis, com exceção do carvão mineral, todos se extinguiriam em menos de 100 anos. Por outro lado, se a demanda emergente fosse atendida por fontes não poluentes, além do não agravamento dos atuais níveis de poluição, conseguiria-se com a comercialização dos créditos carbono correspondentes na comunidade européia, uma arrecadação de cerca de 6,54 bilhões de reais anuais. Frente a este cenário, as chamadas fontes verdes (renováveis e não poluentes) foram avaliadas como a solução correta e mais indicada para o problema.

Tendo atualmente já explorado mais de 50% dos aproveitamentos hidrelétricos economicamente interessantes e com um território privilegiadamente localizado entre a linha do Equador e o Trópico de Capricórnio, as fontes Eólicas e Solar despontam como as alternativas verdes mais atrativas para o Brasil.

Visando a conversão de tais fontes primárias em energia elétrica, foram identificadas dez tecnologias, as quais foram agrupadas segundo seu princípio de funcionamento em Células Fotovoltaicas, Coletores Solares, Turbinas Eólicas e Sistemas Híbridos. Para cada uma delas foi então realizada uma descrição detalhada de seus componentes, princípio operacional, vantagens e desvantagens.

Quanto às Células Fotovoltaicas, ponderando-se o custo de implementação, a eficiência e o impacto ambiental, o Silício Monocristalino (m-Si) ainda constitui a melhor solução. A eficiência do sistema, juntamente com os diodos de proteção e by-pass e o circuito inversor foi estimado em 14%.

As tecnologias de coletores solares do tipo Calha Parabólica e Heliostatos com Torre Central se demonstraram as mais indicadas para a aplicação em questão. Os coletores do tipo Placa Plana foram descartados devido a demandarem uma maior quantidade de módulos e dimensões de instalação, em decorrência de seu fator de concentração unitário. Já os coletores do tipo Parabolóide de Revolução foram descartados devido ao seu alto custo estrutural aliado a restrições dimensionais, embora oferecessem um ótimo fator de concentração. A eficiência característica foi calculada a partir da aplicação das leis fundamentais da mecânica a um sistema constituído de um coletor do tipo Calha Parabólica, juntamente com um ciclo Rankine, um sistema de transmissão e um gerador, resultando num valor de 13%.

Finalmente quanto às turbinas eólicas, notadamente as HAWTs constituem a melhor alternativa, uma vez que as turbinas de eixo vertical em decorrência de sua própria concepção, trabalham contra o escoamento durante metade do ciclo, capturam velocidades relativas entre fluido e pá inferiores a velocidade do escoamento e apresentam menor rigidez estrutural. Novamente a partir da aplicação das leis fundamentais da mecânica, determinou-se a eficiência de um sistema constituído por rotor, transmissão e gerador em 34%.

Os regimes de ventos e insolação sobre o território brasileiro foram caracterizados através de seus valores médios anuais. Em particular para os ventos, foram identificadas a lei das potências e a lei logarítmica-linear como as mais indicadas para a obtenção da variação espacial (perfil de velocidades) e a distribuição de Weibull para a obtenção da variação temporal. Já para a variação temporal do fluxo de irradiação, decorrente do movimento de translação da Terra foi adotada uma tabela de fatores de correção e para a variação decorrente do movimento de rotação, uma função seno.

Desta forma, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica sobre o tema, resultando numa metodologia capaz de avaliar a viabilidade técnico-comercial dos empreendimentos, uma vez de posse dos custos de implementação, operação e manutenção associados a estes.



## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atlas de irradiação solar do brasil.** Brasília: Ministério de Minas e Energia, 1998.
- Atlas do potencial eólico brasileiro.** Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2003.
- Balanco energético nacional.** Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2004.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. Brasília. Disponibiliza um conversor de moedas com atualização diária das taxas de câmbio. Disponível em: <  
<http://www5.bcb.gov.br/>>. Acesso em Abril de 2006.
- BERNARD, R.; MENGUY, G.; SCHWARTZ, M. **La radiación solar: conversión térmica y aplicaciones.** Paris: Editorial Lavoisier, 1982.
- BOYLE, G. **Renewable energy: power for a suitable future.** Oxford: Oxford University Press, 1996.
- CHICAGO CLIMATE EXCHANGE. Chicago. Disponibiliza o histórico operacional da bolsa. Disponível em: <<http://www.chicagoclimatex.com/>>. Acesso em Abril de 2006.
- Estimativas populacionais anuais.** Rio de Janeiro: IBGE, 2004.
- EUROPEAN CLIMATE EXCHANGE. Amsterdam. Disponibiliza o histórico operacional da bolsa. Disponível em: <<http://www.europeancclimateexchange.com/>>. Acesso em Abril de 2006.
- FUJI, I. **From solar energy to mechanical power.** Japan: Harwood Academic Publishers, 1990.
- GARCIA, F.; PALMISANO, F.G. **Gerador solar de vapor.** São Paulo: \_\_, 2005. Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- Key world energy statistics.** Paris: Internacional Energy Agency, 2004.
- KREIDER, J.F.; KREITH, F. **Solar energy handbook.** New York: Mc Graw-Hill, 1981.
- KREIDER, J.F.; KREITH, F. **Solar heating and cooling: active and passive design.** 2. ed. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1982.

KREIDER, J.F.; KREITH, F. **Solar heating and cooling: engineering practical design and economics**. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1977.

LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Fontes não-convencionais de energia: as tecnologias solar, eólica e de biomassa**. 3.ed. Florianópolis: UFSC, 2000.

LOFTNESS, R.L. **Energy handbook**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1978.

MOMOI, A. **Projeto e testes de coletor solar de alta eficiência**. São Paulo: \_\_, 2005. Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PATEL, M.R. **Wind and solar power systems**. New York: CRC Press, 1999.

SANDIA NATIONAL LABORATORY. **A compendium of solar dish/stirling technology**. Albuquerque: SNL, 1994.

SPERA, DAVID A. **Wind Turbine technology – fundamental concepts of wind turbine engineering**. New York: ASME Press, 1994.

VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

**World population to 2300**. New York: ONU, 2004.

YAHYA, S.M. **Turbines, compressors and fans**. New Delhi: Mc Graw-Hill, 1983.