

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR JOÃO CARLOS  
CAMARGO E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 31 / 07 / 2000  
  
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Medidas do Potencial Fotovoltaico na Região das**  
**Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari**

Autor : **João Carlos Camargo**  
Orientador: **Ennio Peres da Silva**

81/00

090807000

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

# **Medidas do Potencial Fotovoltaico na Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari**

**Autor: João Carlos Camargo  
Orientador: Ennio Peres da Silva**

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético

Campinas, 2000

S.P. - Brasil

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	I/UNICAMP
	C14m
V.	Ex
TOMBO BC/	44553
PROC.	16-392101
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREC.º	R\$ 11,00
DATA	17/05/01
N.º CPD	

CM00156299-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C14m Camargo, João Carlos  
Medidas do potencial fotovoltaico na região das  
bacias dos Rios Piracicaba e Capivari / João Carlos  
Camargo.--Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Ennio Peres da Silva  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Energia solar. 2. Energia elétrica – Consumo. 3.  
Fotoeletricidade. I. Silva, Ennio Peres da. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

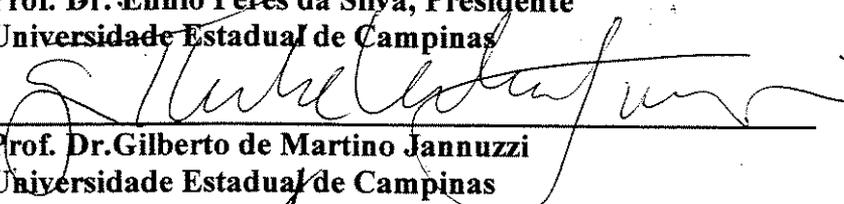
**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

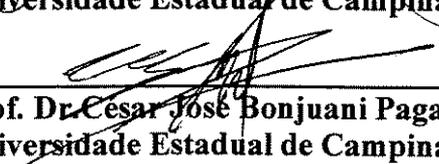
**Medidas do Potencial Fotovoltaico na Região das  
Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari**

Autor : João Carlos Camargo

Orientador: **Ennio Peres da Silva**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Ennio Peres da Silva, Presidente**  
**Universidade Estadual de Campinas**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Gilberto de Martino Jannuzzi**  
**Universidade Estadual de Campinas**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Cesar José Bonjuani Pagan**  
**Universidade Estadual de Campinas**

Campinas, 31 de Julho de 2000

## **Agradecimentos**

Ao Conselho de Aperfeiçoamento do Ensino Superior – CAPES, pelo suporte financeiro.

À Financiadora de Estudos e Pesquisas – FINEP, pelo apoio financeiro para a compra dos equipamentos (PADCT/CIAMB convênio 66.95.0407-00).

Ao pessoal do Laboratório de Hidrogênio pelo apoio na montagem e instalação dos equipamentos.

Ao Cepagri pela ajuda na obtenção dos dados meteorológicos utilizados neste projeto.

E principalmente ao Prof. Ennio pela imprescindível colaboração, pelo apoio, a paciência e pela amizade.

## Resumo

CAMARGO, João Carlos, *Medidas do Potencial Fotovoltaico na Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 108 p. Dissertação ( Mestrado).

A crise do petróleo na década de setenta e a preocupação com as questões ambientais nas últimas duas décadas, em particular o aquecimento global, muitas vezes associado com a excessiva emissão de gases de efeito estufa principalmente advindos da queima de combustíveis fósseis, tem voltado a visão de muitos para a utilização das fontes renováveis de energia. Dentre essas, desponta a energia solar fotovoltaica como uma das alternativas para se aproveitar a inesgotável fonte de energia, a luz do Sol, transformando-a diretamente em eletricidade. Dentro deste panorama, este trabalho tenta contribuir para a disseminação dessa tecnologia através da simulação do fornecimento de energia obtida de um sistema fotovoltaico para uma residência. Os dados coletados no período de onze meses são analisados com o objetivo de constatar as reais condições de funcionamento de um sistema fotovoltaico autônomo, inserido na Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, na cidade de Campinas, São Paulo, Brasil.

### *Palavras Chave*

- Energia Solar, Fontes Renováveis de Energia, Sistema Fotovoltaico Autônomo, Consumo Residencial.

## Abstract

CAMARGO, João Carlos, *Medidas do Potencial Fotovoltaico na Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 108 p. Dissertação (Mestrado).

The Oil Crisis in the seventies and the concern about environmental questions in the last two decades, Global Warming in particular, associated with the increasing of emissions greenhouse gases from fossil fuel burning, have awakened the interest to the use of the renewable sources of energy. Amongst these, the photovoltaic solar energy is an alternative which take advantage from the inexhaustible energy source, the light of the Sun, transforming it directly into electricity. With this vision, this work tries to contribute for the dissemination of this technology through the simulation of the supply of electric energy from a photovoltaic home system. The collected data in eleven months period, is analyzed with the objective of verify the real working conditions of a stand alone photovoltaic system (SHS) in the Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari (RBPC), in the city of Campinas, São Paulo, Brasil.

Key words

Solar Energy, Renewable Sources of Energy, Stand Alone Photovoltaic System (SHS), Energy Supply.

# Índice

Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	viii
Nomeclatura	x
1. Introdução	1
1.1 Objetivo e Estruturação do Trabalho	7
1.2 Características Gerais da Região dos Rios Piracicaba e Capivari (RBPC)	8
2. Energia Solar Fotovoltaica	
2.1 Panorama Atual da Energia Solar Fotovoltaica	12
2.2. Perspectivas Para a Foeletricidade	21
2.3. A Foeletricidade	25
2.3.1. Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos	28

2.3.2. Fatores que Influenciam o Desempenho dos	
Módulos Fotovoltaicos	31
2.3.3. Materiais Utilizados na Fabricação dos Módulos Fotovoltaicos	33
2.3.4. Componentes do Sistema Fotovoltaico	35
3. As Relações Terra - Sol	
3.1. Ângulos Solares	42
3.2. Ângulos Solares Relativos à Superfícies Inclinadas	44
3.3. Radiação Solar Extraterrestre	46
3.4. Radiação Solar Terrestre	47
3.5. Radiação Extraterrestre Total em uma Superfície Horizontal	48
3.6. Medida da Radiação Solar Terrestre	50
3.7. Radiação Terrestre em Superfícies Inclinadas	51
3.8. Radiação Média Diária Mensal em Superfícies Inclinadas	54
4. Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico	
4.1. Dados de Radiação	57
4.2. Consumo da Instalação	60
5. Descrição do Projeto	62
5.1. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico	69
5.2. Montagem do Sistema	71
5.3. Equipamentos Utilizados no Projeto	77

6. Apresentação e Análise dos Resultados Obtidos	78
6.1. Comportamento dos componentes do sistema fotovoltaico	84
7. Conclusões	86
7.1 Recomendações Para Estudos Futuros	87
Referências Bibliográficas	89
Anexos	94

## Lista de Figuras

Figura 1.1- Localização geográfica dos municípios abrangidos pelas bacias dos Rios Piracicaba e Capivari	10
Figura 1.2 – Municípios integrantes da Região das Bacias dos Rios Piracicaba de Capivari	11
Figura 2.1 – Esquema básico de um sistema fotovoltaico autônomo para acionamento de cargas em corrente alternada (C.A.)	14
Figura 2.2 - Composição percentual de custos em um sistema fotovoltaico	15
Figura 2.3 – Evolução dos custos de módulos solares fotovoltaicos no mercado internacional	21
Figura 2.4 – Crescimento da produção mundial de células solares fotovoltaicas incluindo todas as tecnologias atualmente comercializadas	22

Figura 2.5 - Projeção de custo instalado (US\$/Wp) para sistema solar fotovoltaico completo	23
Figura 2.6 - Curva IxV do módulo M75	30
Figura 2.7 – Máxima eficiência calculada para uma célula fotovoltaica de diferentes materiais.	32
Figura 2.8 - Diferentes esquemas de aproveitamento fotovoltaico	36
Figura 3.1 – Relação Terra-Sol no Hemisfério Norte e Sul	43
Figura 3.2 – Altitude solar, zênite e azimute para os hemisférios norte e sul	45
Figura 3.3 – Espectro da radiação solar	49
Figura 4.1 – Radiação instantânea total recebida no dia 21/04/98 registrada pelo Cepagri	59
Figura 4.2 - Comparação entre os dados de radiação do Cepagri/UNICAMP em 1997/1998, dados do CRESESB e CESP	60
Figura 5.1 – Curva de carga característica das residências da vila rural de Campinas – AM. Fonte: Cartaxo, 1998	67
Figura 5.2. - Curva de carga diária do sistema fotovoltaico	68
Figura 5.3- Esquema geral do sistema fotovoltaico mostrando o desempenho teórico de cada componente	69
Figura 5.4 – Esquema geral da instalação fotovoltaica	73
Figura 5.5 – Layout interno do painel, mostrando a disposição	

geral dos componentes	74
Figura 5.6 – Foto mostra o painel e os componentes internos, o conjunto de baterias, computador portátil (notebook) utilizado para coleta dos dados do Logger	75
Figura 5.7 – Foto do suporte dos módulos fotovoltaicos inclinado de 25° em relação a horizontal e com a face dos mesmos voltada para o norte geográfico	76
Figura 5.8 – Vista frontal dos 4 módulos fotovoltaicos	76
Figura 6.1 – Produção e consumo do sistema para o mês de Julho de 1999	79
Figura 6.2 – Produção e consumo do sistema para o mês de Agosto de 1999	79
Figura 6.3 – Produção e consumo do sistema para o mês de Setembro de 1999	79
Figura 6.4 – Produção e consumo do sistema para o mês de Outubro de 1999	79
Figura 6.5 – Produção e consumo do sistema para o mês de Novembro de 1999	80
Figura 6.6 – Produção e consumo do sistema para o mês de Dezembro de 1999	80
Figura 6.7 – Produção e consumo do sistema para o mês de Janeiro de 1999	80
Figura 6.8 – Produção e consumo do sistema para o mês de Fevereiro de 2000	80
Figura 6.9 – Produção e consumo do sistema para o mês de Março de 2000	81
Figura 6.10 – Produção e consumo do sistema para o mês de Abril de 2000	81

Figura 6.11 – Produção e consumo do sistema para o mês de Maio de 2000	81
Figura 6.12 – Energia média diária produzida por um módulo fotovoltaico M75 de 48 Wp para a cidade de Campinas	81
Figura 6.13 – Comparação da radiação recebida durante o tempo de funcionamento do experimento e a radiação do Cepagri e CESP	84

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros de cálculo do custo total da energia	14
Tabela 2 - Sistemas de bombeamento fotovoltaico instalados pelo PRODEEM	
- São Paulo	15
Tabela 3- Sistemas de geração complementar fotovoltaica conectados à rede	18
Tabela 4 - Avaliação do mercado potencial fotovoltaico para uso coletivo nos estados da Bahia, Ceará e Minas Gerais - 1997 – 2005	19
Tabela 5 - Produção anual de módulos em MWp	21
Tabela 6 – Empresas e ou organismos envolvidos em pesquisa, desenvolvimento, demonstração e comercialização de tecnologias fotovoltaicas	23
Tabela 7 - Emissões de gases de efeito estufa das cadeias energéticas de diferentes fontes de energia (gCO <sub>2</sub> - equiv./kWh <sub>e</sub> )	27

Tabela 8 – Estágio atual de desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica	34
Tabela 9 - Estado de carga e valor respectivo da tensão de uma bateria chumbo-ácida	39
Tabela 10- Dia característico recomendado para cada mês	50
Tabela 11 - Valores calculados para as principais variáveis	56
Tabela 12 - Radiação média diária $kWhm^{-2}dia^{-1}$ [Cepagri]	58
Tabela 13 - Radiação média diária $kWhm^{-2}dia^{-1}$ para o ano de 1993 [CRESESB]	59
Tabela 14 - Radiação média diária $kWhm^{-2}dia^{-1}$ série histórica [CESP]	59
Tabela 15 – Cargas da residência	63
Tabela 16 - Valores obtidos para os equipamentos da Tabela 15, após a aplicação do fator de redução	63
Tabela 17 – Comparação entre lâmpadas fluorescentes compactas e incandescentes	64
Tabela 18 – Tempos médios de funcionamento por hora de alguns modelos de refrigeradores.	66
Tabela 19 – Valores obtidos do sistema fotovoltaico entre Julho 1999 – Maio 2000	83

## Nomeclatura

### *Ampère-hora (Ah)*

Quantidade de eletricidade ou medida de carga. (1 Ah = 3600 Coulomb).

### *Arranjo fotovoltaico*

Um sistema interconectado de módulos fotovoltaicos que funcionam como uma única unidade produtora de eletricidade. Os módulos são montados como uma estrutura discreta, com suporte ou armação. Em sistemas menores, um arranjo pode consistir de apenas um módulo.

### *Banda de condução*

Uma banda de energia na qual os elétrons podem se mover livremente em um sólido produzindo um transporte líquido de carga.

### *CA*

corrente alternada

### *CC*

Corrente contínua

### *Célula fotovoltaica*

A unidade básica de um sistema fotovoltaico.

### *Ciclo de vida*

Número de ciclos de carga e descarga que a bateria pode tolerar sobre determinadas condições na sua vida útil.

### *Ciclo raso*

O descarregamento diário de uma bateria em até 20% de sua carga nominal.

### *Ciclo profundo*

O descarregamento diário maior que 50% de uma bateria (normalmente até 80% da carga).

### *Concentrador*

Um módulo fotovoltaico que usa elementos óticos para aumentar a quantidade de luz incidente em uma célula fotovoltaica. Módulos concentradores devem seguir o movimento do Sol e aproveitam apenas a luz direta, pois a componente difusa não pode ser focalizada na célula. Os concentradores podem aumentar a potência de fluxo de luz centenas de vezes.

### *Constante solar*

Potência média solar que alcança a Terra por metro quadrado no equador terrestre ao meio dia.

### *Corrente de curto circuito ( $I_{cc}$ )*

A máxima corrente fornecida pela célula ou módulo fotovoltaico quando ligada a uma carga de resistência zero.

### *Curva $I \times V$*

A representação gráfica da corrente e a tensão de um dispositivo fotovoltaico. A forma da curva caracteriza o desempenho da célula ou módulo fotovoltaico.

### *Densidade de energia*

A relação entre a energia disponível de uma bateria pelo seu volume (Wh/l) ou massa (Wh/kg).

### *Descarga profunda*

Descarga da bateria até 50 % de sua capacidade de carga.

### *Efeito estufa*

O efeito da atmosfera terrestre, devido a certos gases, em aprisionar o calor; a atmosfera age como uma estufa.

### *Eficiência de conversão ( célula ou módulo)*

A relação entre a energia elétrica produzida por um dispositivo fotovoltaico sob iluminação e a energia da luz incidente sobre a célula para a mesma iluminação.

### *Elétron-volt*

Unidade de energia igual a energia que um elétron adquire quando ele passa através de uma diferença de potencial de 1 volt; é igual a  $1,6 \times 10^{-19}$  J.

### *Filme fino*

Tecnologia de confecção de células fotovoltaicas pela deposição de uma fina camada (alguns microns) como disseleneto de cobre-índium, telureto de cádmio, arsenieto de gálio ou silício amorfo.

### *Fotocorrente*

Uma corrente elétrica induzida em um material semicondutor pelos fótons provenientes da luz..

### *Gases de efeito estufa*

Gases que aprisionam o calor na atmosfera da Terra, produzindo o efeito estufa. Os dois mais importantes gases de efeito estufa são o vapor d'água e o dióxido de carbono; outros gases incluem o metano, ozônio, clorofluorcarbonos e óxidos de nitrogênio.

### *Intervalo de banda (band gap)*

Em um semicondutor, a diferença energética entre a mais alta banda de valência e a mais baixa banda de condução.

### *Inversores*

Dispositivos que convertem eletricidade CC em eletricidade CA (mono ou polifásico), em sistemas fotovoltaicos autônomos (não conectados à rede) ou sistemas conectados. Em sistemas autônomos são usados sempre que há necessidade de acionar cargas em corrente alternada.

### *Inversor de onda modulada pela largura de pulso (PWM)*

Inversores que produzem um sinal de saída de alta qualidade com um mínimo de distorção harmônica muito próximo da forma senoidal encontrada na rede de energia.

### *Inversor de onda senoidal*

Inversor que produz uma forma de onda senoidal, exatamente como a da rede.

### *Kilowatt-hora (kWh)*

Mil watts atuando no período de uma hora.  $1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$

### *MCH*

Média central hidrelétrica

### *PCH*

Pequena central hidrelétrica

### *Módulo fotovoltaico*

Uma montagem protegida de células solares e partes auxiliares, como interconexões, terminais e dispositivos de proteção (diodos) com intenção de gerar energia C.C. sob luz não concentrada.

### *Potencial de aquecimento global (GWP)*

O efeito de aquecimento esperado sobre um período de tempo, resultando de uma liberação hipotética instantânea de um quilograma de um determinado gás de efeito estufa na atmosfera atual. Cada gás tem um diferente valor de GWP. O valor é referenciado ao efeito de aquecimento de 1 kg de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O GWP capacita comparar o aquecimento radiativo relativo de vários gases, levando em conta os diferentes tempos que os gases permanecem na atmosfera e o grau em que suas bandas características de absorção já estejam saturadas.

### *Radiação Difusa*

Radiação recebida indiretamente como resultado da difusão devido a nebulosidade, fumaça, névoa, poeira ou outras obstruções na atmosfera.

### *Radiação direta*

Luz do Sol que atinge diretamente o módulo fotovoltaico.

### *Sistema autônomo*

Um sistema fotovoltaico que não tem outro tipo de gerador de eletricidade. Pode ou não incluir baterias.

### *Sistema fotovoltaico*

Um conjunto completo de componentes para converter luz solar em eletricidade pelo processo fotovoltaico, incluindo o arranjo fotovoltaico e componentes como armazenamento de energia (baterias), dispositivos de controle e regulação (controladores de carga), inversores, estruturas de montagem, preparação do local e manutenção.

### *Superfície antireflexiva*

Uma fina cobertura de material, que reduz a reflexão da luz e aumenta a transmissão de luz, aplicada na superfície da célula fotovoltaica.

#### *Taxa de descarga*

A taxa, normalmente expressa em ampéres ou tempo, nas quais a corrente elétrica é drenada da bateria.

#### *Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )*

A máxima voltagem possível em uma célula ou módulo fotovoltaico quando não há corrente circulando pela célula.

#### *Watt-pico*

A potência máxima de saída nominal de uma célula, módulo ou sistema nas condições de teste:  $1000\text{Wm}^{-2}$  de luz solar,  $25\text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura ambiente e velocidade do vento de  $1\text{ m/s}$ .

# Capítulo 1

## Introdução

O mundo assistiu nos últimos trinta anos importantes mudanças na questão das fontes de energia. Com a crise do petróleo na década de setenta, a humanidade de certa forma acordou para a precariedade de sua matriz energética baseada principalmente no petróleo e outras fontes assim chamadas de não renováveis.

Havia, na década de setenta, após a crise do petróleo, um certo pessimismo com relação às décadas vindouras no que tange ao abastecimento energético, principalmente ao petróleo e seus derivados, a principal fonte de energia do século. As previsões feitas no auge da crise do petróleo na década de 70 e nos primeiros anos que se seguiram a ela, apontavam para um aumento crescente do consumo, levando ao aumento dos preços que chegariam na alvorada do novo milênio a preços acima de 100 dólares o barril [Oswald, 1998]. A partir daí iniciou-se um direcionamento do desenvolvimento tecnológico na busca de soluções, assentando-o em dois pilares: a pesquisa de novas fontes de energia, para substituir o petróleo e a busca da eficiência dos processos de transformação, então existentes.

Nesse ínterim, cresciam as opiniões favoráveis à energia nuclear. Parecia ser, então, a fonte de energia que substituiria o petróleo no médio e longo prazo, já que as tecnologias dos reatores eram bem dominadas, e os custos de geração de energia eram competitivos com a geração com petróleo ou carvão. Mas acidentes como o de Three Miles Island nos EUA em 1979 e o mais grave, na usina de Chernobyl em 1986 na ex-URSS foram um banho de água fria no futuro baseado na fissão nuclear. Em Chernobyl, centenas de mortos, milhares de contaminados, nuvem radiativa contaminando o meio por milhares de quilômetros, gerações futuras afetadas pelas mutações genéticas...

Desde então tem crescido em todo o mundo a objeção à construção de novas usinas. Além disso, a produção, transporte e armazenamento de material radiativo é sempre motivo de polêmica pois poderiam ser utilizados na produção de armas nucleares. O lixo atômico e a desativação das usinas nucleares ao término de sua vida útil também constituem-se sérios empecilhos. Na Alemanha, o último governo eleito, apoiado pelo Partido Verde, prometeu desativar paulatinamente todas as usinas nucleares do país e fechou acordo recentemente com as mesmas, marcando a data de 2020 como fim da geração de energia elétrica com energia nuclear no país (New York Times, 15/06/2000).

No que tange aos preços e a oferta de petróleo, as previsões catastróficas não se confirmaram. Excetuando a crise da Guerra do Golfo em 1990 onde os preços tiveram um pico, a curva de preços apresentou um declínio constante nos últimos vinte anos, atingindo, em algumas oportunidades patamares similares àqueles praticados pós crise de 73: em 7/12/98, o barril de petróleo atingiu os preços mais baixos em 25 anos sendo comercializado a US\$ 10,26 e a US\$ 11,47 em Nova York [Folha de São Paulo, 11/03/2000].

Vários fatores contribuíram para isso, como a descoberta de mais petróleo, o avanço da tecnologia na prospecção e exploração, permitindo aumentar a quantidade retirada de cada poço, e no lado da demanda houve um enorme esforço de engenheiros, cientistas e governos, principalmente nos EUA - principal consumidor de energia no mundo - no sentido do aumento da eficiência do uso da energia o que culminou na transformação da curva consumo de energia versus crescimento econômico (PIB). O PIB americano cresceu pós crise do petróleo, mas o consumo de energia não acompanhou proporcionalmente esse crescimento como acontecia anteriormente, denotando um aumento da eficiência dos processos de transformação.

Se o pior não aconteceu em relação à oferta e ao preço do petróleo, e pode-se, então, o mundo respirar mais aliviado quanto ao abastecimento energético que garantiu o século do conforto, um novo componente surgiu no cenário mundial para retirar o homem do mar de rosas: a questão ambiental.

Concomitantemente ao despertar da consciência da finitude dos recursos não renováveis, cientistas e pesquisadores já começavam a associar algumas mudanças climáticas com o uso intensivo de fontes de energia não renováveis. Entre as décadas de 70 e 90, uma sucessão de anos quentes e uma série de perturbações climáticas contribuíram para a crescente preocupação com o risco de aquecimento climático global. Até o ano de 1992, os gases CO<sub>2</sub> e metano (CH<sub>4</sub>) tiveram seus níveis de concentração na atmosfera aumentados em cerca de 30 e 145% respectivamente, quando comparados ao período anterior à Revolução Industrial [Gutman, 1998]. Estudos realizados, utilizando modelos atmosféricos tridimensionais, indicaram a possibilidade de elevação da temperatura média da superfície terrestre em torno de 1,5 e 4,5°C, dentro de aproximadamente 50 a 80 anos [US Department of State, 1995].

Os debates a respeito dos riscos da degradação do meio ambiente possibilitaram a primeira grande discussão internacional culminando na Conferência de Estocolmo em 1972. No mesmo ano Dennis L. Meadows e outros pesquisadores publicam um estudo chamado Limites do Crescimento. Segue-se então os prognósticos catastróficos do Clube de Roma. Em 1973, Maurice Strong usa pela primeira vez a palavra ecodesenvolvimento para caracterizar uma concepção alternativa de política de desenvolvimento, baseado em uma crítica da sociedade industrial e conseqüentemente uma crítica da modernização industrial como método de desenvolvimento das regiões periféricas. Veio então a Declaração de Cocoyok (1974), o relatório Dag-Hammarskjöld (1975). Ambos tinham um tom alarmista sobre o problemas advindos do desenvolvimento: explosão populacional como decorrência da pobreza - pobreza gerando desequilíbrio demográfico; destruição ambiental na África, Ásia e América Latina também como decorrência da pobreza e também que os países industrializados contribuíam para os problemas do subdesenvolvimento por causa do seu nível exagerado de consumo. Os países industrializados tinham que baixar seu consumo e sua participação desproporcional na poluição da biosfera. Os dois documentos expressaram um desejo de mudança na estrutura do desenvolvimento [Brüseke, 1995].

O relatório Brundtland, que veio a seguir, propôs o *desenvolvimento sustentável*: “aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as futuras gerações satisfazerem as suas próprias necessidades”. Tinha uma visão mais realista, mantendo um tom diplomático: desejava o crescimento tanto dos países não industrializados quanto dos países industrializados.

Todas essas discussões culminaram em 1992, no Rio de Janeiro, com a conferência da ONU sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Apesar da conferência não ter correspondido nem às esperanças e nem às expectativas principalmente no que tange à limitação da emissão de CO<sub>2</sub> do acordo do clima, ela documentou o crescimento da consciência sobre os perigos que o modelo atual de desenvolvimento econômico significa. A interligação entre o desenvolvimento sócio-econômico e as transformações no meio ambiente, durante décadas ignorada, entrou no discurso oficial da maioria dos governos do mundo.

O conceito de desenvolvimento sustentável passou a ter, então, uma conotação extremamente positiva. Tanto o Banco Mundial como a UNESCO e outras entidades internacionais adotaram-no para marcar uma nova filosofia do desenvolvimento que combina eficiência econômica com justiça social e prudência ecológica. Este tripé virou fórmula mágica, que não tem faltado em nenhuma solicitação de verbas para projetos de natureza mais variada no campo sócio-econômico dos países e regiões do terceiro mundo [Brüseke, 1995].

Mais recentemente seguiu-se à ECO-92, a Conferência das Partes (COP-1) em 1995 na Alemanha com o objetivo de revisar o compromisso dos países desenvolvidos em reduzir suas emissões aos níveis, ou abaixo, de 1990 até o ano 2000. Em 1997 aconteceu a COP-2 em Genebra. Nela constatou-se que as emissões mundiais de CO<sub>2</sub> continuavam aumentando, já que os países desenvolvidos não lograram êxito na estabilização das emissões aos níveis de 1990. Dos nove países da OECD<sup>1</sup>, com emissões superiores à 50 Mt de carbono em 1990, apenas dois - Reino Unido e Alemanha - pareceram atingir aquele objetivo [Cavaliero, 1998].

---

1 OCDE (Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico): Estados Unidos, Japão, Alemanha, França, Itália, Reino Unido, Canadá, Austrália, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Finlândia, Grécia, Islândia, Irlanda, Luxemburgo, México, Países Baixos, Nova Zelândia, Noruega, Portugal, Espanha, Suécia, Suíça e Turquia.

A última, chamada COP-5 organizada pela UNFCCC (United Nation Framework Convention on Climate Change) realizada no final de 1999 na Alemanha, ratificou as decisões da COP-4 realizada em Buenos Aires em 1998 sobre os limites de emissão de CO<sub>2</sub> nos países industrializados.

A preocupação com as questões ambientais, principalmente com o aquecimento global, parece ter entrado definitivamente na pauta do empresariado global. Em uma pesquisa realizada entre os empresários de todo o mundo participantes do Fórum Econômico Mundial, em Davos, Suíça, em 2000, responderam quais eram os três maiores desafios para os próximos dez anos. Em primeiro lugar foi a mudança climática (20,3%), em seguida “o fim da ética tradicional” (15,7%) e só depois por um tema mais ou menos tradicional no empresariado: a ineficiência das organizações internacionais, citada por 15,1% (Jornal Folha de São Paulo, 28/01/2000).

Embora existam incertezas, acredita-se que as variações climáticas nas últimas décadas ocorridas no planeta, estejam de certa forma ligadas ao aquecimento global, e que a queima de combustíveis fósseis seja um potencializador deste efeito. Mas não é o único efeito. O petróleo pode trazer conseqüências desastrosas ao ambiente antes mesmo de chegar às refinarias.

Os derramamentos de petróleo no mar, baías ou enseadas, seja por acidentes em navios petroleiros ou vazamentos em tubulações, acarretam enormes conseqüências ambientais com a destruição de vida marinha, praias, mangues, etc. O vazamento de 1,2 milhões de toneladas de petróleo por falha em um duto da refinaria Duque de Caxias, da Petrobrás, na baía da Guanabara no Rio de Janeiro em janeiro de 2000 foi um exemplo disso. Estima-se que a baía levará no mínimo dez anos para se recuperar [Jornal Folha de São Paulo, 28/01/2000].

O panorama energético e a visão do homem em relação à natureza mudou indubitavelmente nas últimas décadas. Premido, outrora, pela ameaça de escassez ou agora, pelas conseqüências ambientais do uso intensivo das fontes não renováveis, o homem coloca em cheque uma série de conceitos sobre desenvolvimento e natureza. O que emergiu dessa crise é a necessidade de conciliar ambos. Negar o desenvolvimento, como alguns chegaram a apregoar, é podar as esperanças de bilhões de indivíduos que vivem no terceiro mundo de sonharem com um mínimo de suas necessidades básicas atendidas. Sem energia não há desenvolvimento. A questão então está colocada: que tipo de energia que será utilizada, que garantirá o atendimento, não só das

necessidades dessa mas também das gerações vindouras sem comprometer irreversivelmente o ambiente?

A maneira de conciliar, necessidade energética e natureza é pensar em uma energia que seja menos agressiva ao meio ambiente. O desenvolvimento sustentável, a sustentabilidade, passa sem dúvida, pelas fontes renováveis de energia. Obviamente que não há energia “não agressiva” ao ambiente. Todas elas acarretam algum tipo de impacto, porém as fontes renováveis possuem uma característica menos impactante. A energia solar com aproveitamento fotovoltaico ou térmico, a hidroeletricidade, a energia eólica, a biomassa, a energia das marés e a energia geotérmica estão no rol das energias que doravante terão sua importância aumentada no cenário energético mundial. Com exceção da energia geotérmica, das marés e a nuclear, todas as outras possuem sua origem da energia solar.

A entropia em um sistema fechado aumenta. No entanto, durante bilhões de anos, a natureza diminui a entropia e organiza a vida no planeta tomando a energia do Sol, através da fotossíntese. Essa energia é inesgotável, em comparação às energias não renováveis. Todo o dia o Sol fornece ao planeta cerca de 26 vezes a quantidade de energia que o homem consome em um ano<sup>1</sup>. Sem dúvida um potencial imenso a ser explorado.

Se o Sol é a nossa fonte primordial de energia, os sistemas fotovoltaicos são o único meio de transformá-la diretamente em eletricidade. O fenômeno fotoelétrico, ou seja, a conversão da luz em eletricidade, já era conhecido desde o século passado. Somente com o advento dos artefatos espaciais, é que eles ganharam impulso e desenvolvimento acelerado. As novas tecnologias desenvolvidas permitiram melhores desempenhos e redução de custos. Atualmente a energia solar fotovoltaica já possui nichos de mercado onde sua utilização é claramente competitiva como em instalações remotas afastadas da rede convencional de energia.

---

1. Energia diária que alcança o topo da atmosfera terrestre vinda do Sol -  $20,4 \times 10^{14}$  kWh - pelo consumo total de energia feito pelo homem em 1996 -  $7,85 \times 10^{13}$  kWh.

Apesar dos custos declinantes, a fotoeletricidade ainda tem um longo caminho a percorrer no sentido de concorrer competitivamente com as fontes tradicionais de energia. Alguns analistas acreditam que as fontes renováveis e em especial a energia solar fotovoltaica, em breve atingirão um patamar de igualdade devido à utilização em larga escala [Johansson et al, 1993]. No entanto a participação dos governos e da sociedade será decisiva na transição de um mundo baseado em energias não renováveis para fontes de energia que se encaixem na proposta do desenvolvimento sustentável. A fotoeletricidade, sem dúvida, terá muito a contribuir para isso.

A humanidade testemunha uma mudança de paradigmas quanto ao desenvolvimento e o uso de fontes de energia. A natureza é cada vez menos encarada como simples fornecedora de matéria prima ou depósito de rejeitos. O conflito homem versus natureza, modifica-se ao constatar-se que o primeiro não sobreviverá sem o segundo. Por isso a busca do desenvolvimento humano que seja minimamente prejudicial à natureza levará cada vez mais às fontes renováveis de energia. Dentro deste contexto este trabalho visa contribuir com a disseminação da tecnologia fotovoltaica

### **1.1. Objetivos e Estruturação do Trabalho**

Este trabalho tem o objetivo de apresentar os resultados do experimento com energia solar fotovoltaica realizado no Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, com intuito de simular o fornecimento de energia elétrica para uma residência inserida na Região das Bacias dos rios Piracicaba e Capivari considerando o potencial da região para essa energia.

Entende-se neste trabalho por potencial de geração de eletricidade por meio da energia solar fotovoltaica, não a quantidade total de eletricidade que poderia ser gerada nesta região, mas a disponibilidade efetiva desta energia por unidade de área, uma vez que a quantidade de eletricidade a ser produzida por um determinado sistema dependerá fundamentalmente da área de módulos empregada.

A extensão dos resultados obtidos em Campinas para a RBPC justifica-se pelo fato deste trabalho estar inserido no contexto de estudos anteriores realizados pelo Núcleo de Estudos de Problemas Ambientais como o relatório final do *Uso Eficiente de Energia e Desenvolvimento Regional* realizado pelo Departamento de Energia da FEM/UNICAMP, convênio

Funcamp/Eletróbrás/Nepam [Jannuzzi et al, 1995], ambos abordando a Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari que procura desenvolver planos de uso eficiente de energia para esta região, que fossem alternativas interessantes para o suprimento de energia.

O trabalho foi dividido em 7 capítulos. No Capítulo 1 está a introdução e uma ligeira descrição da região dos Rios Piracicaba e Capivari onde está situada a Região Administrativa de Campinas. No Capítulo 2, é mostrado o panorama da energia solar fotovoltaica quanto aos projetos em desenvolvimento, pesquisas na área, industrialização e perspectivas para a fotoeletricidade. Também é descrito o funcionamento das células fotovoltaicas, as características elétricas dos módulos, fatores que influenciam o desempenho, tecnologias disponíveis de fabricação, características únicas dos sistemas fotovoltaicos e os componentes principais dos mesmos. No Capítulo 3 há uma breve fundamentação teórica das relações Terra - Sol para cálculo da energia radiante que atinge uma superfície inclinada. O Capítulo 4 descreve as variáveis que implicam no dimensionamento de um sistema fotovoltaico. O projeto, fim mesmo deste trabalho, é descrito no Capítulo 5, a apresentação e análise dos resultados obtidos estão no Capítulo 6 e finalmente o Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## **1.2. Características gerais da Região das Bacias dos rios Piracicaba e Capivari (RBPC)**

As bacias hidrográficas dos Rios Piracicaba e Capivari são formadas por 44 rios, córregos e ribeirões, situados nas áreas territoriais de 56 municípios do Estado de São Paulo (52) e Minas Gerais (4), sendo todos os municípios paulistas pertencentes à Região Administrativa de Campinas. Estes municípios totalizam uma área de 14.312 km<sup>2</sup>, com 4.959.975 habitantes (1997), perfazendo uma densidade populacional média de 346,56 habitantes/km<sup>2</sup>. A Figura 1.1 mostra a localização geográfica da área dos municípios dentro do Estado de São Paulo e de Minas Gerais. Na Figura 1.2, os municípios que compõem a RBPC.

A Região Administrativa de Campinas possui 1.550.360 consumidores de energia elétrica, sendo 1.339.211 residenciais, 125.270 comércio e serviços, 39.988 rural, 34.443 industrial e 11458 de outra natureza. O consumo de energia elétrica total na RAC em 1997 foi de 15.920.893 MWh, sendo que Campinas respondeu por 49% deste consumo [SEADE, 1998].

Campinas é a mais importante cidade da RAC, com área de 887 km<sup>2</sup>, altitude média de 680m, localizada na latitude 22°53'20" S e longitude 47°04'40".

### *Energia Solar*

A maioria dos municípios da RBPC encontra-se localizada, segundo resultados divulgados pelo Conselho Estadual de Energia do Estado de São Paulo<sup>1</sup>, na melhor faixa de insolação do Estado, que corresponde a uma média de 2650 horas anuais, com uma radiação total em plano horizontal de 1.830 kWh/(m<sup>2</sup>.ano), equivalente a um potencial solar bruto de 6,59 GJ/(m<sup>2</sup>.ano). Uma pequena parte dos municípios, situados a leste da região, possui respectivamente os valores 2450 horas anuais, 1.700 kWh/(m<sup>2</sup>.ano) e 6,12 GJ/(m<sup>2</sup>.ano).

O resultado dos experimentos realizados em Campinas podem ser extrapolados para toda a RBPC pois o fator fundamental para o aproveitamento da energia solar fotovoltaica é a quantidade de energia solar recebida por unidade de área, e conforme já foi mostrado por Jannuzzi [Jannuzzi et al, 1985] a radiação medida em vários municípios da RBPC apresentam valores equivalentes.

---

<sup>1</sup>Balanco Energético do Estado de São Paulo - 1982 e 1983. Conselho Estadual de Energia/CESP, São Paulo, SP, 1985.

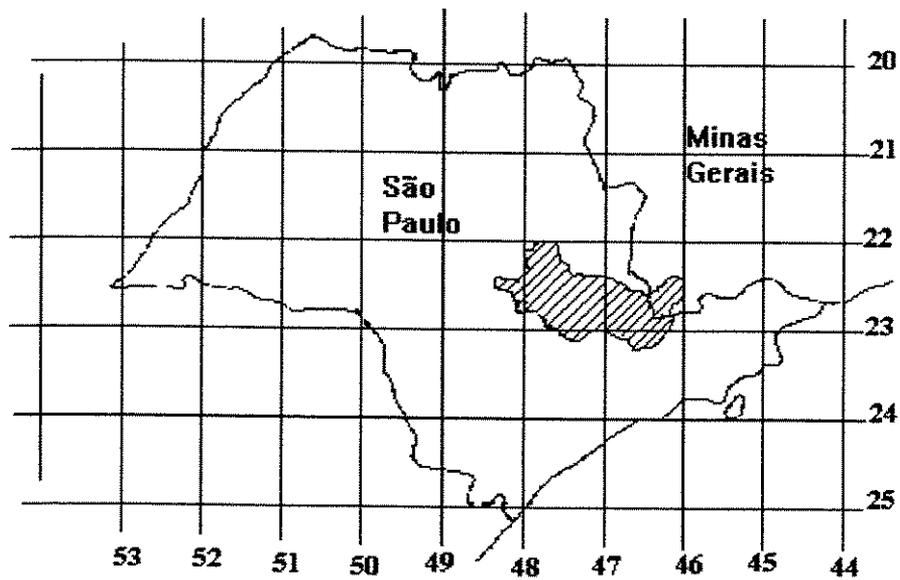


Figura 1.1- Localização geográfica dos municípios abrangidos pelas bacias dos Rios Piracicaba e Capivari.



## **Capítulo 2**

### **Energia solar fotovoltaica**

#### **2.1 Panorama atual da energia solar fotovoltaica**

Por sua característica modular, os sistemas fotovoltaicos encontram seu grande potencial de utilização em situações onde os custos dos sistemas tradicionais de suprimento energético como extensão de redes elétricas têm um custo muito elevado. Basicamente um sistema fotovoltaico autônomo utilizado para alimentar de energia uma residência é composto pelos elementos da Figura 2.1.

A dimensão territorial brasileira e os programas de eletrificação rural implementados nos últimos anos vêm tornando os custos da extensão de rede para eletrificação rural (custo por consumidor atendido) cada vez mais altos, abrindo espaço para alternativas descentralizadas de suprimento. Devido a sua dimensão e localização geográfica, o Brasil desponta como um dos países mais propícios no Mundo para o uso de sistemas fotovoltaicos para eletrificação rural [Ribeiro et al, 1999].

Dentre os programas criados para o incentivo ao uso das fontes renováveis destacam-se o PRODEEM e Luz no Campo.

O PRODEEM (Programa para o Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios) é um dos mais importantes programas implementados pelo governo atual e tem por objetivo principal viabilizar o suprimento de energia às populações que habitam o meio rural, apoiando o atendimento das demandas sociais das comunidades localizadas fora dos perímetros urbanos, promovendo o uso produtivo da energia nas propriedades rurais favorecendo a geração de empregos e a elevação da renda nas regiões ainda não assistidas pela eletrificação convencional. Para tanto, são utilizadas as fontes de energia renováveis disponíveis em cada localidade - pequenos potenciais hidráulicos, biomassa (resíduos agrícolas, resíduos florestais, óleos vegetais, biogás) e energias solar e eólica [Ribeiro et al, 1999].

A ação do PRODEEM está direcionada para a implementação de subprogramas como: o desenvolvimento social na instalação de micro sistemas de produção de energia em comunidades carentes e não servidas pela rede elétrica; o desenvolvimento econômico: aproveitamento das fontes de energia renováveis descentralizadas, para o atendimento de demandas ligadas à atividade produtiva e que favoreçam a elevação da renda, geração de empregos e a agregação de valor ao produto rural; a complementação da oferta de energia, incentivando a produção complementar de energia via fontes renováveis descentralizadas, destinada a todos os consumidores, utilizando sistemas individuais ou coletivos e contemplando, inclusive, o reforço às redes existentes [Ribeiro et al, 1999]

Dentre os projetos desenvolvidos pelo PRODEEM no Estado de São Paulo está o projeto de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água em assentamentos provisórios na região do Pontal do Paranapanema, visando o abastecimento de água para as famílias e para o gado.

Devido à abrangência do PRODEEM e o grande número de sistemas fotovoltaicos já instalados, ele é uma referência de custos para este tipo de energia. Para ilustrar, a Tabela 1 mostra os parâmetros de cálculo do custo total da energia dos sistemas instalados e a Tabela 2 descreve os sistemas instalados no projeto na região do Pontal do Paranapanema.

Um sistema fotovoltaico básico utilizado nestas aplicações encontra-se na Figura 2.1 que é composto pelo módulo fotovoltaico responsável pela produção de energia elétrica, um sistema de armazenamento (baterias) e um sistema de controle da energia armazenada. Na Figura 2.2, a composição percentual dos custos Também quando o sistema alimentará cargas em corrente alternada, um inversor de frequência é necessário.

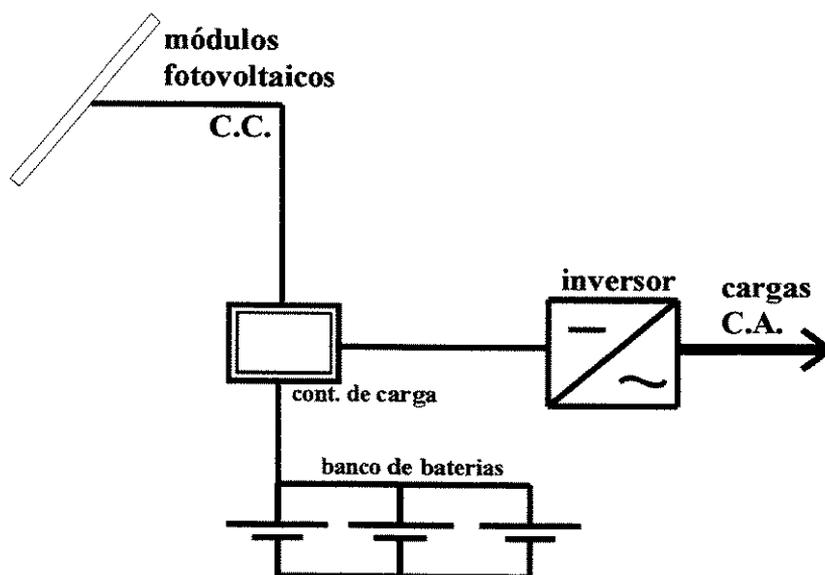


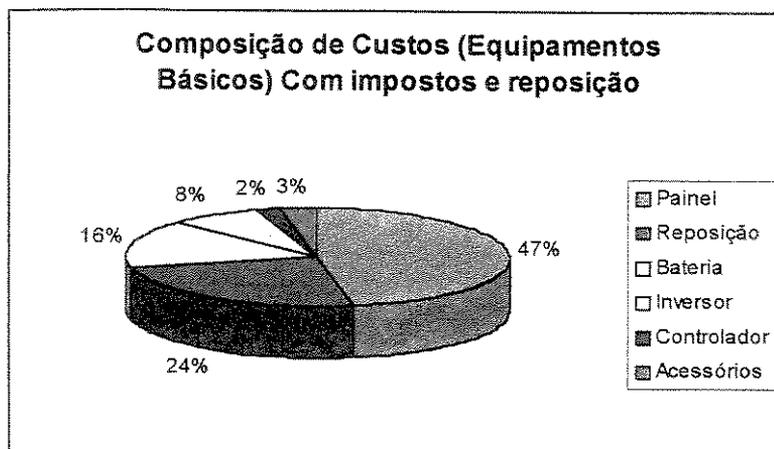
Figura 2.1 – Esquema básico de um sistema fotovoltaico autônomo para acionamento de cargas em corrente alternada (C.A.).

Tabela 1 - Parâmetros de Cálculo do Custo Total da Energia

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Radiação Solar	5	kWh.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>
Taxa de Juros	12	%
Vida Útil do Módulos	30	Anos
Vida Útil das Baterias	5	Anos
Vida Útil de Componentes Eletrônicos (Inversor, Controlador)	10	Anos
Eficiência Global do Sistema (Exceto Conversão Fotovoltaica)	75	%
Custo Total do Sistema Fotovoltaico Instalado	19,89	R\$/Wp
<b>Energia Produzida</b>	<b>0,48</b>	<b>R\$/kWh</b>

Fonte: Ribeiro et al. 1999

Figura 2.2 - Composição percentual de custos em um sistema fotovoltaico



Fonte: Fonte: Ribeiro et al. 1999

Tabela 2 - Sistemas de bombeamento Fotovoltaico instalados pelo PRODEEM - São Paulo

Assentamento	Município	Nº de famílias	Altura man. (m)	Data de instalação
Estância Palú	Pres. Bernardes	10	74	20/10/97
Santa Rita	Tupi Paulista	12	50	23/06/98
Yapinary	Ribeirão Índios	20	68	25/06/98
Yapinary	Ribeirão Índios	20	85	27/06/98
Santa Maria	Presidente Venceslau	20	80	29/06/98
Primavera I	Presidente Venceslau	46	74	30/06/98
Maturi	Caiuá	50	74	03/07/98
Santana 1º	Mirante do Paranapanema	50	56	06/07/98
Santana 2º	Mirante do Paranapanema	21	68	07/07/98
Santa Cruz 1º	Mirante do Paranapanema	43	86	08/07/98
Santa Cruz 2º	Mirante do Paranapanema	12	92	09/07/98
Santa Rosa II	Mirante do Paranapanema	50	92	13/07/98
Santa Isabel	Mirante do Paranapanema	45	92	10/07/98

Fonte: FERREIRA, et al (1999)

A ação do PRODEEM também está direcionada para a implementação dos seguintes subprogramas:

- Desenvolvimento social : instalação de microssistemas de produção de energia em comunidades carentes e não servidas pela rede elétrica, apoiando de forma sistemática e permanente o atendimento de demandas sociais básicas: água potável, produção de alimentos, educação, saúde, saneamento, telefonia de emergência, informação, centro comunitário etc.
- Desenvolvimento econômico: aproveitamento das fontes de energia renováveis descentralizadas, para o atendimento de demandas ligadas à atividade produtiva e que favoreçam a elevação da renda, geração de empregos e a agregação de valor ao produto rural.
- Complementação da oferta de energia: produção complementar de energia via fontes renováveis descentralizadas, destinada a todos os consumidores, utilizando sistemas individuais ou coletivos e contemplando, inclusive, o reforço às redes existentes;
- Base tecnológica e industrial: promoção do desenvolvimento das tecnologias relacionadas com sistemas não convencionais de energia e capacitação de recursos humanos para sua instalação, operação e manutenção.

### *Programa Luz no Campo*

Outro programa recentemente anunciado pela Eletrobrás é o Programa Nacional de Eletrificação Rural “Luz no Campo”, o qual está prevendo a energização de um milhão de propriedades rurais no Brasil nos próximos quatro anos, principalmente aquelas com potencial de desenvolvimento econômico. Para alcançar este objetivo o programa poderá se valer da extensão da rede elétrica convencional ou geração descentralizada (baseados em queima de combustível fóssil e fontes alternativas de energia, tais como solar, eólica, biomassa, MCH's e PCH's) com critérios definidos pelo Ministério das Minas e Energia.

### *Sistemas fotovoltaicos conectados à rede de energia.*

Os sistemas fotovoltaicos podem ser conectados à rede de distribuição de energia elétrica da concessionária local, entregando a energia produzida pelos módulos através da conversão CC/CA feita por um inversor de frequência, dispensando o armazenamento por baterias. Existem basicamente dois tipos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. O primeiro é representado pelas grandes centrais fotovoltaicas que geram a energia de forma centralizada. O segundo gera a eletricidade de forma descentralizada, no local do consumo. São os sistemas denominados de Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede – EFCR.

Nos últimos anos, a importância dos sistemas conectados à rede de forma descentralizada vem, cada vez mais, se mostrando presente. Em 1990, apenas 7,5% da potência produzida em módulos fotovoltaicos foram utilizados em sistemas desse tipo. Em 1995, essa participação passou para cerca de 25% [Oliveira, 1998]. Projeta-se então que, para as primeiras décadas do século XXI, os sistemas conectados à rede de forma distribuída utilizem cerca de 60% de toda a potência produzida em módulos fotovoltaicos. Na Tabela 3 mostra os projetos que existem no mundo de sistemas conectados à rede.

Tabela 3- Sistemas de geração complementar fotovoltaica conectados à rede

Nome	País	Ano	Propriedade	Potência (kWp)
Delphos	Itália	1986/92	ENEA	600
Vasto	Itália	1993	COASIV	1000
Carloforte	Itália	1994	Carloforte Munic.	600
Serre	Itália	1994	ENEL	3300
Pellworm	Alemanha	1983/91	Schleswag	600
Koborn Gondorf	Alemanha	1988	RWE	340
Neurather	Alemanha	1991	RWE	360
Mont Soleil	Suíça	1992	BKW	500
Toledo	Espanha	1994	RWE/UEF/ENDESA	1000

Fonte: Oliveira et al. (1998)

No Brasil, essa tendência ainda não se faz presente de forma significativa mas já existem iniciativas que sinalizam um aumento da importância desse tipo de sistema. Até hoje, existem três experiências de conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica convencional. A primeira faz parte do projeto Fernando de Noronha, uma cooperação entre Brasil e Alemanha para a instalação de um sistema híbrido de geração (gerador a Diesel, bateria, eólica e fotovoltaica) para o abastecimento energético da ilha. A segunda foi realizada em 1997 pelo LabSolar em Florianópolis. Esse laboratório pertence à faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Este projeto tem por objetivos (a) disseminar o uso da energia solar fotovoltaica no Brasil demonstrando as suas potencialidades e enfocando principalmente as novas tecnologias fotovoltaicas de filmes finos e (b) investigar a sazonalidade na performance de painéis solares de filmes finos de a-Si num clima relativamente quente [Rüther, 1998].

O terceiro sistema conectado à rede de distribuição foi instalado, em 1998, no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo; IEE/USP [Oliveira, 1998].

No segmento de eletrificação rural, o Banco Mundial fez um longo estudo [Gouvello, 1997] para o mercado fotovoltaico no nordeste, considerando a ajuda ao governo brasileiro para um programa de expansão da utilização de sistemas de energia renováveis. O objetivo geral do estudo era providenciar um panorama geral da viabilidade de introduzir o mercado fotovoltaico para eletrificação de áreas remotas dispersas em três estados cobertos pelo estudo: Bahia, Minas Gerais e Ceará.

As análises foram baseadas no mercado de sistemas solares para residências (*solar home systems* - SHS) em três levantamentos executados por organizações não governamentais (ONGs) locais, familiarizadas com a difusão da tecnologia fotovoltaica, micro crédito e serviços rurais em geral. Os levantamentos foram baseados em amostras representativas totalizando mais de 600 domicílios nos três estados, em locais com e sem conexão à rede elétrica.

Dessa forma foi quantificado e caracterizado o mercado de sistemas solares para residências baseando a abordagem na capacidade de pagar da população local e as necessidades de serviço de energia, quantificados os futuros fluxos de investimentos dentro dos programas públicos em andamento para usos coletivos ou iniciativas particulares espontâneas para o setor produtivo e avaliou, para os três setores, o custo efetivo das soluções com energia fotovoltaica comparadas com as convencionais. Na Tabela 4 está um dos resultados desse estudo no que tange o uso coletivo da energia solar fotovoltaica.

Tabela 4 - Avaliação do mercado potencial fotovoltaico para uso coletivo nos estados da Bahia, Ceará e Minas Gerais - 1997 - 2005

Uso coletivo	número de sistemas fotovoltaicos				MWp	MUSS*
	Bahia	Ceará	Minas Gerais	Total		
Bombeamento d'água	1.600	600	800	3.000	6,0	42,0
Escolas	1.600	1.120	320	3.040	1,4	21,0
Posto de saúde	480	480	480	1,440	0,6	9,0
Iluminação pública	8.000	8.000	4.000	20.000	2,0	40,0
Prédios comunitários	1.600	1.600	800	4.000	0,2	2,5
<b>Total</b>	<b>13.280</b>	<b>11.880</b>	<b>6.400</b>	<b>31.480</b>	<b>10,2</b>	<b>114,5</b>

Fonte: Gouvello, 1997. (\*) milhões dólares

### *Pesquisa em células solares*

No Brasil a pesquisa em energia solar fotovoltaica, em quase sua totalidade, esteve restrita às universidades e centros de pesquisa, que fundamentalmente vem dedicando esforços à pesquisa básica em células solares e novos materiais. Laboratório de Microeletrônica da USP, ligado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Laboratório de sensores do INPE, Instituto de Pesquisas Espaciais de São José dos Campos, Laboratório de Conversão

Fotovoltaica, da UNICAMP, Laboratório de Microeletrônica e Células Solares, do IME, e o Laboratório de Materiais e Interfaces, da COPPE, grupo ligado ao Departamento de Metalurgia e Ciências dos Materiais da Universidade do Rio de Janeiro

### *Pesquisas em Sistemas Solares Fotovoltaicos*

Vários grupos estão dedicando esforços em pesquisa aplicada e na formação de recursos humanos em sistemas fotovoltaicos, através da instalação de sistemas de demonstração e da monitoração dos mesmos. Esta monitoração inclui a pesquisa sócio-econômica, aspectos operacionais e desempenho técnico. E de acordo com as "Perspectivas Tecnológicas de Sistemas Fotovoltaicos no Brasil", documento apresentado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) no II Encontro para o Desenvolvimento das Energias Renováveis Solar, Eólica e de Biomassa, são citados os seguintes grupos: Universidade Federal de Pernambuco, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal da Paraíba, Universidade de São Paulo, CEPEL, CHESF, CEMIG, COPEL, CELPE, COELCE e COELBA. Existem vários outros grupos dedicados ao estudo e implementações de sistemas, muitos deles, em cooperação com entidades internacionais. Alguns Estados já criaram um comitê ou secretaria para tratar das Energias Renováveis.

### *Industrialização*

A industrialização de células solares iniciou no Brasil em 1979, pela Fone-Mat, a partir de células importadas. Sua produção durou poucos anos. Em 1980 instalou-se no Brasil a única empresa de capital e tecnologia nacional, a qual iniciou suas atividades no desenvolvimento de sistemas solares térmicos. Entre 1983 e 1984, a Heliodinâmica S.A. começou a produzir substratos de silício, células solares e sistemas fotovoltaicos, beneficiando-se da "Lei de Informática" que visou preservar o mercado interno aos fornecedores nacionais. Com o fim da lei houve a abertura do mercado para grandes companhias estrangeiras, houve um declínio de produção dessa empresa.

A Tabela 5 apresenta a evolução da produção de módulos fotovoltaicos entre 1989 e 1995, em MWp por países. Pode-se observar o crescimento da produção ocorrido em todos os países com exceção do Brasil (Heliodinâmica). De acordo com a tabela a participação nacional na produção mundial de módulos passou de 1,6% em 1989 para 0,13 % em 1995.

Tabela 5 - Produção anual de módulos em MWp

País	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
EUA	14,1	14,8	17,1	18,1	22,4	25,6	34,7
Japão	14,2	16,8	19,9	18,8	16,7	16,5	19,9
União Européia	7,9	10,2	13,4	16,4	16,5	16,7	21,1
Resto do Mundo	4,0	4,7	5,0	4,6	4,4	5,6	6,3
Heliodinâmica	0,6	0,6	1,0	0,5	0,5	0,1	0,1

Fonte: Oliveira et al. (1998)

## 2.2. Perspectivas da fotoeletricidade

Devido à evolução das diferentes técnicas de fabricação das células fotovoltaicas e do aumento de produção dos módulos, os custos das mesmas têm caído muito nas últimas décadas, situando-se hoje em torno de US\$ 4/Wp e com projeção de queda para US\$ 1,5/Wp para 2002 (Figura 2.3).

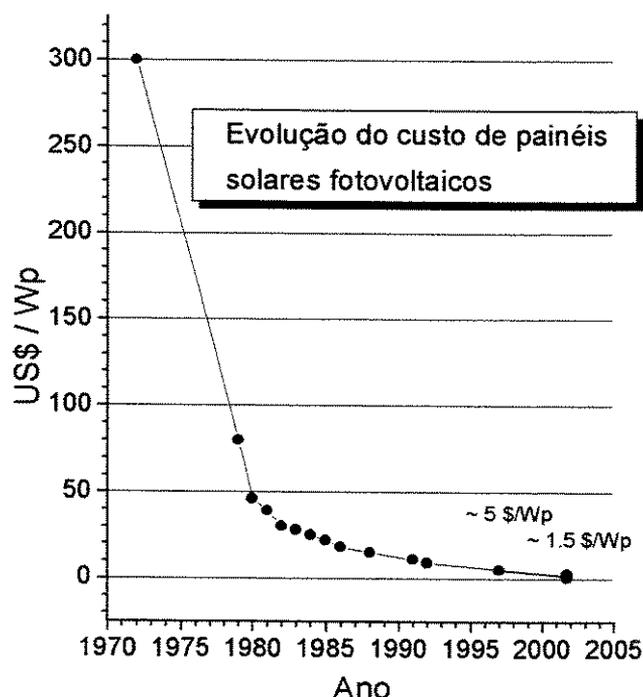


Figura 2.3 – Evolução dos custos de módulos solares fotovoltaicos no mercado internacional e projeção de custo para o ano de 2002, assumindo o cenário de crescimento de 1997. Fonte: Rüther, 1998.

A indústria fotovoltaica tem apresentado um crescimento significativo em termos percentuais, em média em torno de 15% ao ano nos últimos anos, como mostra a Figura 2.4. No

ano de 1997, no entanto, o crescimento atingiu um recorde histórico de 43%, devido principalmente aos programas de sistemas fotovoltaicos integrados ao entorno construído que vêm sendo implementados em países como o Japão, Alemanha, EUA e Holanda entre outros. Em termos absolutos, no entanto, a produção anual de módulos solares fotovoltaicos ainda é insignificante, tanto no contexto energético mundial como em relação aos níveis de produção necessários para que o seu potencial de redução de custos seja realizado [Rüther, 1998].

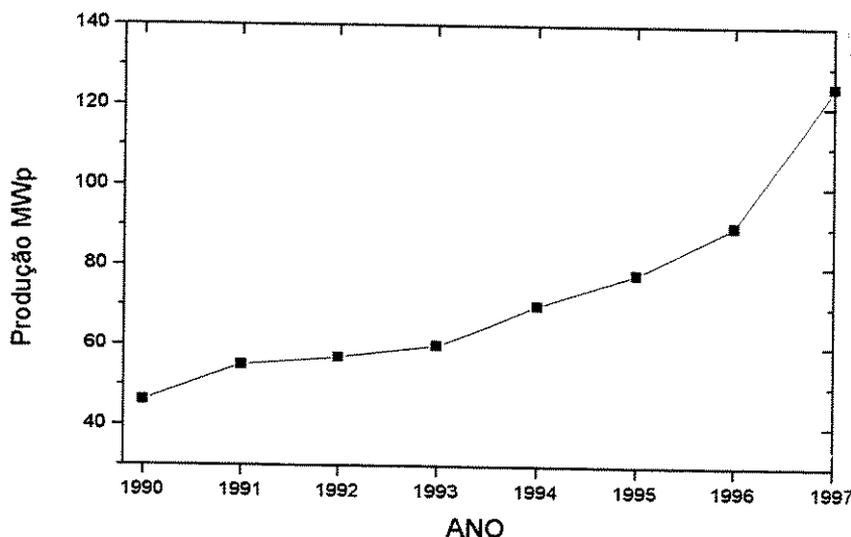


Figura 2.4 – Crescimento da produção mundial de células solares fotovoltaicas, incluindo todas as tecnologias atualmente comercializadas. Fonte: Rüther, 1998.

Para sistemas conectados diretamente à rede de energia, ou seja, produzindo energia e entregando-a na rede sem armazená-la, os custos tendem a cair mais rapidamente pois o sistema não utiliza armazenamento e grandes instalações com módulos fotovoltaicos tendem a reduzir o custo pela economia de escala. A Figura 2.5 mostra a evolução do custo de um sistema fotovoltaico conectado diretamente à rede nos EUA.

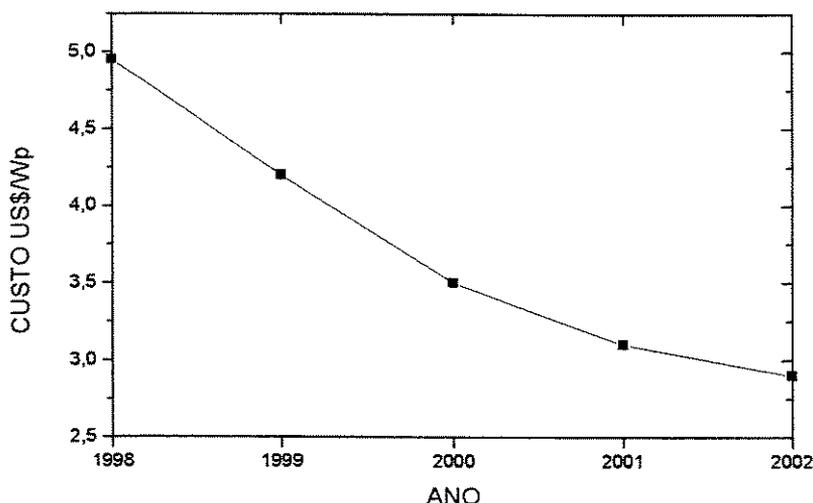


Figura 2.5 - Projeção de custo instalado (US\$/Wp) para sistema solar fotovoltaico completo (inclui sistema inversor CC/CA e fiação, estrutura de suporte e montagem) no projeto da Sacramento Municipal Utility District (SMUD, nos EUA), interligado à rede elétrica pública e integrado à residências ou prédios urbanos. Fonte: Rüter, 1998

Muitas organizações, governos e empresas vêm desenvolvendo pesquisa com energia solar fotovoltaica. Até mesmo as empresas petrolíferas como Mobil, Shell, Amoco entre outras constituíram subsidiárias para atuar no campo das energias renováveis, especialmente a energia solar fotovoltaica (Tabela 6).

Tabela 6 - Empresas ou organismos envolvidos em pesquisa, desenvolvimento, demonstração e comercialização de tecnologias fotovoltaicas.

British Petroleum	AMOCO/ENRON
Mobil Petroleum	Sharp
AGIP (Eurosolare)	SHOWA/ SHELL
TOTAL Petroleum	Siemens
Daimler-Benz/Deutsche Aerospace	Texas Instruments
Xerox	AT&T Bell Laboratories
Canon	Fuji
Sanyo	Mitsubishi
Panasonic	Honda
Toyota	Boeing
D.O.E.-U.S.A. (Department of Energy - USA)	Bayer
Kyocera	Matsushita
Kodak	RWE AG – Nukem
NOVEM (Netherlands Agency for Energy and the Environment)	

No Brasil a Shell Brasil está montando uma equipe que vai cuidar do desenvolvimento de energias renováveis. Ela pretende investir cerca de 500 milhões de dólares no Mundo através de sua subsidiária a Shell Solar e uma parte desse investimento será no país. O foco estará centrado na energia solar fotovoltaica. Isso segue uma tendência no setor energético onde todas as grandes companhias de petróleo já constituíram subsidiárias para atuar no campo de energias renováveis, principalmente explorando o potencial fotovoltaico [ Brasil Energia, 2000].

Disso conclui-se que as empresas petrolíferas, que seriam as mais resistentes à introdução de novas tecnologias de energia para substituir o petróleo, partem agora para a diversificação prevendo um futuro cada vez mais difícil para o seu principal produto. As duas maiores empresas petrolíferas inglesas, por exemplo, a British Petroleum e a Shell têm investido mais em energia solar que o Banco Mundial e o governo americano ou qualquer outro fundo de investimento privado [Abt, 1999]. O enfoque dessas empresas tem mudado, de uma companhia de petróleo para uma empresa de energia. Assim elas se preparam para a transição energética que mais cedo ou mais tarde virá.

É indiscutível que novas formas de geração de energia elétrica, que sejam menos agressivas ao meio ambiente e que utilizem fontes renováveis de energia, terão doravante um emprego cada vez maior. Tecnologias como a solar fotovoltaica e as células de combustível, que geram energia elétrica a partir do hidrogênio, são exemplos disso.

O Banco Mundial no seu relatório anual mostra preocupação com os efeitos climáticos do uso de energia e destaca como prioridade acelerar a substituição dos combustíveis tradicionais por energia moderna e promover tecnologias energéticas novas (incluindo renováveis), removendo barreiras para o desenvolvimento de mercados para elas [World Bank, 1999].

Um dos maiores empecilhos técnicos para um maior espraiamento da tecnologia fotovoltaica é o armazenamento da energia. Armazenar energia elétrica tem sido um grande problema técnico ainda por ser resolvido. As baterias do tipo chumbo-ácido são o recurso mais utilizado atualmente para esse fim nos sistemas fotovoltaicos. Elas possuem vida útil de 3 a 4 vezes inferior aos módulos fotovoltaicos e são de longe os dispositivos que mais requerem manutenção no sistema fotovoltaico. Há também os problemas relativos à seu descarte ao final de

sua vida útil pois possuem elementos químicos danosos ao meio ambiente como o chumbo e outros. O armazenamento de energia via produção de hidrogênio, e sua posterior conversão em eletricidade por uma célula de combustível, por exemplo, parece ser a alternativa mais promissora. A grande evolução que as células de combustível estão tendo no presente será um importante fator na disseminação de uma cadeia energética *luz solar-energia elétrica-hidrogênio-energia elétrica* de caráter totalmente renovável.

A evolução dos dispositivos eletrônicos, especialmente os microprocessadores, fizeram com que equipamentos como os inversores de frequência que transformam um sinal contínuo em alternado, tivessem seus custos bastante reduzidos. As unidades inversoras tornaram-se extremamente compactas e eficientes, capacitando-as a integrar ambientes domésticos sem maiores problemas. Isso foi de extrema importância para a difusão da tecnologia fotovoltaica pois os módulos produzem energia em corrente contínua (C.C) e praticamente todos os equipamentos a serem acionados em uma residência são em corrente alternada (C.A.).

### 2.3. A fotoeletricidade

O detalhamento do funcionamento de uma célula fotovoltaica ao nível de estrutura eletrônica foge do escopo deste trabalho. De interesse para este trabalho é que uma célula fotovoltaica produz eletricidade a partir de sua exposição a uma fonte luminosa. Os fótons (pacotes de energia da luz) incidem em um material formado basicamente de silício dopado com outros elementos químicos para formar uma junção *p-n*,

Estes fótons deslocam elétrons, nessa junção, para produzir uma corrente elétrica de natureza contínua (C.C.), que é proporcional à intensidade da luz incidente, e uma tensão que depende basicamente da natureza dos materiais que compõe a célula e da temperatura ambiente a qual a junção *p-n* está submetida.

A junção de várias células fotovoltaicas ligadas em série formam o módulo fotovoltaico. O módulo ou painel, consiste de células fotossensíveis e materiais de encapsulamento que protegem as células do meio externo. Alguns módulos podem também incluir espelhos ou lentes que focalizam a luz sobre as células fotovoltaicas.

Já que os equipamentos fotovoltaicos diferem de maneira fundamental das formas tradicionais usadas atualmente para suprir a maioria da eletricidade mundial, não é surpresa que os sistemas fotovoltaicos ofereçam uma coleção única de benefícios e problemas.

A energia fotovoltaica é intermitente pois a eletricidade pode ser gerada somente enquanto há luz incidindo sobre o módulo fotovoltaico, seja pela radiação direta ou pela radiação difusa. Por isso depende, em muitos casos, de um sistema de armazenamento - para os sistemas não conectados diretamente à rede - geralmente feito através de baterias que são normalmente a parte dos sistemas fotovoltaicos que mais requerem manutenção sendo o “tendão de Aquiles” do sistema.

Os sistemas fotovoltaicos são inerentemente modulares e podem ser colocados junto aos locais onde a eletricidade é consumida. Sistemas de geração próximos ao consumidor final reduzem os custos de transmissão e distribuição e aumentam a confiabilidade da energia elétrica entregue. A natureza modular dos sistemas fotovoltaicos significa também que não há escassez de locais apropriados para os módulos fotovoltaicos; a única condição a ser preenchida é o acesso à luz solar. Até mesmo em áreas urbanas, onde grandes áreas abertas são um luxo, telhados e espaços para estacionamentos são excelentes locais para painéis fotovoltaicos. Além disso o baixo perfil das unidades minimiza seu impacto visual. E sua natureza modular significa que as concessionárias podem instalar ou remover unidades, reduzindo assim os riscos inerentes às previsões de aumento de carga de longo prazo [Kelly, 1993].

Não há razão para acreditar que o uso muito difundido de equipamento fotovoltaico conduzirá para riscos ambientais e de segurança se cuidados forem tomados para antecipar futuros problemas. Alguns métodos de fabricação dos módulos usam materiais que implicam riscos como o telureto de cádmio (CdTe), e solventes similares àqueles usados na produção de outros dispositivos semicondutores. Os riscos podem ser reduzidos a níveis baixos se técnicas modernas de reciclagem e minimização dos resíduos forem empregadas durante a fabricação. Embora a deposição dos módulos contendo cádmio ou outros metais pesados poderiam criar problemas ambientais, os módulos descartados podem ser reciclados economicamente, minimizando os problemas de deposição [Johansson, 1993]

Se os sistemas fotovoltaicos possuem impacto desprezível em sua utilização, pois não emitem qualquer tipo de poluição atmosférica, a fabricação dos componentes implicam em

alguns impactos como emissão de gases de efeito estufa, dependendo do tipo de energia que for utilizada para esse fim.

A Tabela 7 reflete os resultados obtidos de estudos de cadeia de energia (Full Energy Chain - FENCH) de fatores de emissão de gases de efeito estufa. Para isso, são considerados como parâmetros: vida útil da instalação (no caso, considerada como sendo 30 anos), o mix de eletricidade usado para sistemas energéticos sensíveis à eletricidade, o fator de carga ou de disponibilidade e o GWP (*global warming potential*) de outros gases de efeito estufa que não o CO<sub>2</sub>. Verifica-se grande discrepância entre os valores apresentados pelos diversos autores, com um intervalo, no caso da solar fotovoltaica, variando de 30 a 279 g de CO<sub>2</sub> equiv./kWh<sub>e</sub>. De acordo com esse resultado, pode-se observar que a energia solar (FV), apesar de ser considerada uma energia limpa, emite quantidades significativas de CO<sub>2</sub> na cadeia de produção.[Rocha et al, 1999].

Tabela 7 - Emissões de Gases de Efeito Estufa das Cadeias Energéticas de Diferentes Fontes de Energia (gCO<sub>2</sub> - equiv./kWh<sub>e</sub>)

Autores	Linhito	Carvão	Petróleo	Gás Natural	GNL	Nuclear	Eólica	FV	Biomassa
Uchiyama	-	990	686	-	653	27	74	57-123	-
Yasukawa	-	962	-	-	-	33	-	-	-
Friedrich	1175	940-1290	-	-	-	19	16	279	-
Dones	1340	973-1020	890	772	-	8-24	-	72-240	-
Science Conc.	-	960	770	538	-	25	-	-	-
Van de Vate	-	990	711	1220	-	-	10,8	30	-
Fritche	1171	1018	-	460	-	58,8	15	32	-
Sullivan	-	860	809	1234	-	-	-	-	-
Born	-	-	-	-	-	-	-	-	37
Turhollow	-	-	-	-	-	-	-	-	116
Lewin	1220	1244	-	453	-	28	11	228	-
Deluchi	-	1123	949	634	-	69	-	-	107
Chamberland	-	1033	828	475	-	-	-	-	-
Mínimos e máximos	1171-1340	860-1290	686-949	460-1234	-	8-59	11-75	30-279*	37-116

Fonte: Rocha et al. 1999. (\*) O menor valor do intervalo se refere à fabricação de silício cristalino (de produção mais limpa) e o maior à fabricação da tecnologia menos limpa, incluindo bateria.

### 2.3.1 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são submetidos à testes de laboratório por seus fabricantes. Deles se aúfere as características elétricas mais importantes de um módulo e suas condições de operação. Para cada condição de operação, as características elétricas do módulos são apresentadas nos catálogos. As condições de operação padronizadas de um módulo fotovoltaico são (Diniz, 1999):

- STC (*Standard Test Condition*) - Condição padrão de teste:

- incidência de radiação de  $1000\text{Wm}^{-2}$ ;
- células fotovoltaicas a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- distribuição do espectro de radiação de acordo com a ASTM E892 ou “Air mass (AM) 1,5”:  
Sol de meio-dia em dia claro, a aproximadamente  $60^{\circ}$  acima do horizonte, atravessando assim o equivalente a 1,5 vezes a espessura da atmosfera e temperatura do ar a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Obviamente estas condições são difíceis de se controlar na natureza, então os testes ocorrem em câmara de teste, em um simulador, com um flash de luz especial que simula o espectro solar como descrito, pelo tempo de 50 ms.

- NOCT - Temperatura de operação nominal da célula solar:

- incidência de radiação de  $1\text{kWm}^{-2}$ ;
- temperatura ambiente  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- velocidade do vento  $1\text{m.s}^{-1}$  máximo;
- módulo fotovoltaico a circuito aberto.

- SOC - Condição padrão de operação:

- incidência de radiação de  $1\text{kWm}^{-2}$

- temperatura das células solares NOCT.

- NOC - Condição nominal de operação:

- incidência de radiação de  $800 \text{ Wm}^{-2}$ ;
- temperatura das células solares NOCT.

A corrente produzida por uma célula fotovoltaica depende da radiação solar, a qual varia significativamente com a variação da intensidade da luz. Quanto menor intensidade da luz incidente no módulo, menor será a corrente produzida pelo mesmo. A tensão, por sua vez, é influenciada fortemente pela temperatura ambiente. Quanto mais quente estiver o módulo, menor será a tensão do mesmo. Portanto, a tensão diminui significativamente com o aumento da temperatura enquanto que a corrente sofre uma redução muito pequena, como pode ser visto na Figura 2.6.

Quando um módulo fotovoltaico está exposto à luz, ele gera energia elétrica em corrente contínua, dependendo da intensidade da radiação solar e da temperatura ambiente. A potência do módulo fotovoltaico é dada pela potência de pico, em Watt pico (Wp) que é a máxima potência extraída do módulo na condição padrão de teste – STC – em laboratório. A potência elétrica é o produto tensão x corrente. As medidas de tensão e corrente de um módulo podem ser plotadas em um gráfico, que é chamado curva IxV (corrente versus tensão) do módulo (Figura 2.6).

A capacidade de um conjunto de módulos carregar as baterias ( para suprimento de cargas tais como lâmpadas, TV/vídeo etc. a noite ou em períodos chuvosos) ou encher um reservatório d'água (no caso de bombeamento d'água ) o mais rápido possível é dada principalmente por sua potência elétrica. As características elétricas mais importantes de um módulo fotovoltaico são:

*Tensão de operação - (volts)*

É a tensão para qual o sistema foi especificado.

*Potência máxima -  $P_{max}$  - (watts)*

É a máxima potência que um módulo fornece quando submetido às condições padrão de teste. Para atingir-se esta potência o módulo precisa estar conectado a uma carga de impedância específica, fazendo o módulo operar na região de máxima potência da curva (Figura 2.6).

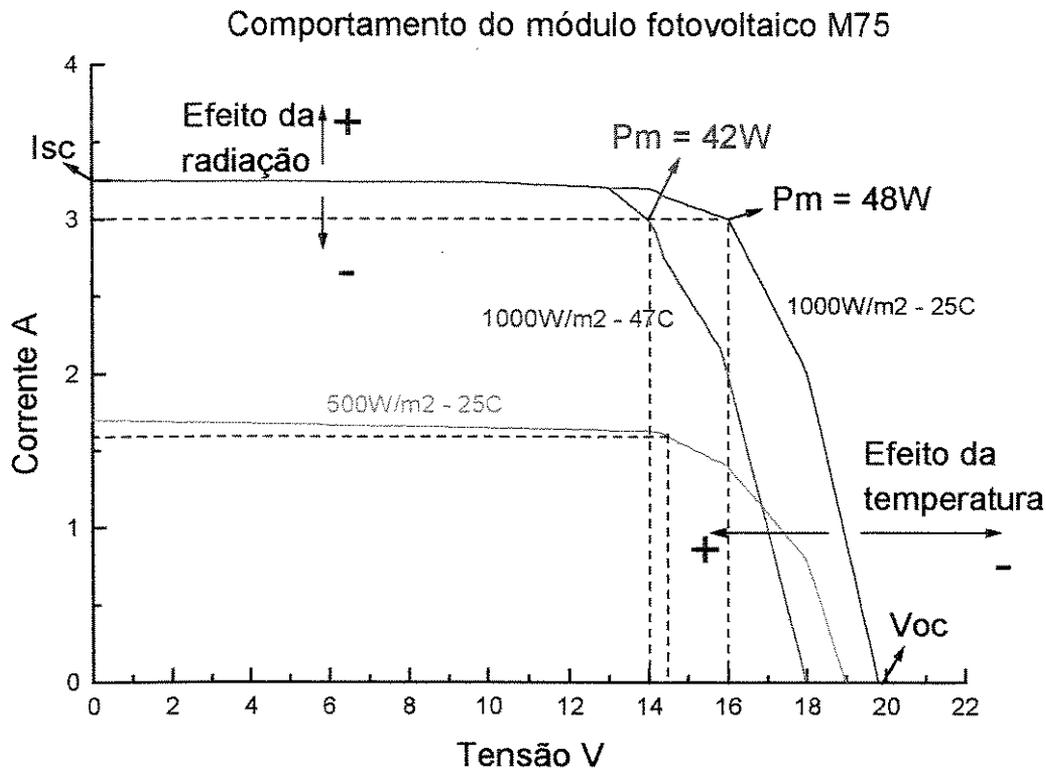


Figura 2.6 - Curva IxV do módulo M75. A linha tracejada mostra o ponto de máxima potência para algumas curvas de corrente que variam diretamente com a incidência de luz na célula fotovoltaica. Pode-se notar que o efeito da radiação interfere na quantidade de corrente, enquanto que a tensão é afetada pela temperatura ambiente. Fonte: catálogo do módulo fotovoltaico M75 da Siemens.

*Potência mínima -  $P_{min}$  - (watts)*

É a mínima potência garantida que o módulo pode fornecer, dadas as condições padrão.

*Corrente de curto-circuito -  $I_{cc}$  - (ampères)*

Máxima corrente que o módulo é capaz de produzir nas condições padrão. É a corrente fornecida pelo módulo com seus terminais em curto-circuito.

*Tensão em circuito aberto -  $V_{oc}$  - (volts)*

Máxima tensão que o módulo é capaz de produzir nas condições de teste. É a tensão fornecida pelo módulo com seus terminais em aberto (sem carga).

Pelo comportamento da curva  $I \times V$ , em cada curva, existe apenas um ponto de máxima potência. Este ponto corresponde ao produto da tensão de potência máxima ( $V_{mp}$ ) e corrente de potência máxima ( $I_{mp}$ ), dado por:

$$P_m = I_m \times V_{mp} \quad (2.1)$$

Outro parâmetro muito importante é a eficiência do módulo ou célula solar, a qual mede a qualidade do mesmo. Em geral, a eficiência é definida como a relação entre a potência elétrica de saída ( $P_m$ ) e a potência da luz incidente, no módulo inteiro, nas condições padrão de teste (1000  $W.m^{-2}$ , 25 °C, 1,5 AM).

Existem várias maneiras de definir eficiência, uma delas é a que expressa o desempenho dos módulos quando instalados é dado por:

$$\text{Eficiência do módulo} = \text{Energia produzida (Wh/m}^2\text{)} / \text{Energia recebida no local (Wh/m}^2\text{)} \quad (2.2)$$

### **2.3.2 Fatores que influenciam o desempenho dos módulos fotovoltaicos**

A eficiência do sistema depende da fração da potência solar alcançando a célula, que é convertida em potência elétrica (corrente x tensão). A eficiência máxima é obtida quando este produto é o máximo - obviamente algum lugar entre os pontos de curto-circuito e circuito aberto (Figura 2.6- linhas tracejadas).

A corrente só consegue ser criada se os fótons tiverem energia suficiente para desalojar um elétron de sua posição (para conseguir vencer o intervalo de banda – “band gap” – da rede cristalina). Mas a energia que excede a quantidade necessária para desalojá-los, causa um

movimento aleatório e é eventualmente perdida como calor. Já que o excesso de energia fotônica é perdida, a eficiência das células é maior para materiais com “band gaps” que são mais próximas à energia média dos fótons da luz solar.

Algumas perdas são inevitáveis já que os fótons alcançam a célula com quantidades de energia variável (cada cor no espectro corresponde a uma diferente energia). Os picos de energia solar na região do amarelo-verde (energia do fóton da ordem de 1,5 eV), a qual está próxima a “band gap” do telureto de cádmio. O “band gap” do silício cristalino é cerca de 1,1 eV (Fig. 2.7)

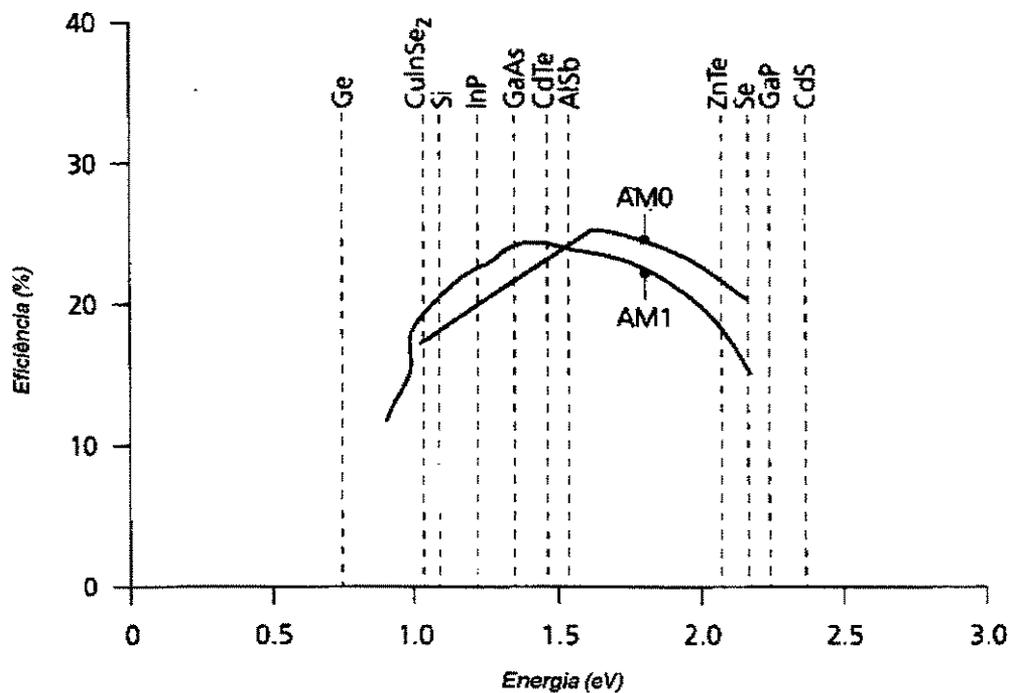


Figura 2.7 – Máxima eficiência calculada como uma função da energia necessária para liberar um elétron, supondo o espectro solar mais externo do espaço (AM0) e o espectro terrestre (AM1); muitos semicondutores de interesse são indicados. Fonte: Kelly, 1993.

A quantidade de energia produzida por um módulo fotovoltaico é tipicamente 80% daquela medida nas condições de teste em laboratórios (STC). A maioria dos módulos diminuem sua eficiência quando sua temperatura aumenta. O efeito da temperatura sobre sua eficiência depende do tipo de célula usada. Módulos cristalinos perdem cerca de 0,5 ponto percentual de eficiência para cada grau °C de aumento de temperatura da qual o módulo foi especificado (25°C

normalmente). Nas condições reais de utilização, os módulos estão geralmente cerca de 20°C mais quentes que a temperatura do ar. A eficiência de operação dos módulos é portanto reduzida cerca de 10% devido aos efeitos da temperatura. Diminuição adicional de desempenho dos módulos resulta da ligeira diferença de tensão entre os módulos, quando eles estão conectados para formar um arranjo fotovoltaico. Perdas ôhmicas nos condutores de conexão dos módulos, sujeira sobre os módulos e outros efeitos podem também reduzir o desempenho. A natureza dessas perdas depende dos detalhes de projeto do sistema e localização da instalação, mas perdas de 10% são típicas [Kelly, 1993].

### **2.3.3 Materiais utilizados na fabricação dos módulos fotovoltaicos**

Em termos de aplicações terrestres, dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se por ordem decrescente de maturidade e utilização o silício cristalino c-Si; o silício amorfo hidrogenado a-Si:H ou simplesmente a-Si; o telureto de cádmio CdTe e os compostos relacionados ao dissulfeto de cobre e índio CuInSe<sub>2</sub> ou CIS. Neste último grupo aparecem elementos que são ou altamente tóxicos (Cd, Se, Te), ou muito raros (Te, Se, In, Cd), ou ambos, o que inicialmente se mostrou um obstáculo considerável ao uso mais intensivo destas tecnologias. Com relação à toxicidade, convém mencionar que lâmpadas fluorescentes (contêm mercúrio) e telas de computador (contêm chumbo), são classificados da mesma maneira, devendo ser descartados de forma apropriada, o que também deverá ocorrer com painéis solares de CdTe e CIS. O silício, por outro lado, é o segundo elemento mais abundante na superfície de nosso planeta (mais de 25 % da crosta terrestre é silício) e é 100 vezes menos tóxico que qualquer um dos outros elementos citados acima [Rüther,1998].

O silício cristalino (c-Si) é a mais tradicional das tecnologias fotovoltaicas e a que ainda hoje apresenta maior escala de produção comercial. O c-Si se consolidou no mercado fotovoltaico internacional por sua extrema robustez e confiabilidade. O custo de produção destes módulos solares é, no entanto, bastante elevado e as possibilidades de reduzi-los já foram praticamente esgotadas, razão pela qual esta tecnologia é desconsiderada por muitos analistas como séria competidora com formas convencionais de geração de potência em larga escala. O c-Si segue sendo, no entanto, o líder dentre as tecnologias fotovoltaicas para aplicações terrestres

em qualquer escala [Rüther, 1998]. A Tabela 8 mostra as diversas tecnologias fotovoltaicas disponíveis, os principais fabricantes, as eficiências máximas obtidas para as células individualmente e conectadas formar um módulo e a potência suprida ao mercado mundial de cada tecnologia.

Tabela 8 – Estágio atual de desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica.

Tecnologia	Fabricantes	Eficiências (%)		Potência suprida ao mercado mundial em 1998 (MWp)
		Célula	Módulo	
Silício cristalino	SIEMENS ASTROPOWER SOLEC BP SOLAREX SHARP	27	10 - 17	60
Silício policristalino	KYOCERA BP SOLAREX PHOTOWATT ASE AMERICAS EVERGREEN	18	9 - 12	70
Filme fino silício policristalino	ASTROPOWER	17	8	1
Filme fino dissulfeto de cobre e índio	USSC BP SOLAREX CANON SANYO IOWA THIN FILM ENERGY PV	19	12	-
Filme fino telureto de cádmio	MATSUSHITA FIRST SOLAR BP SOLAREX	16	9	-
Material nanocristalino	SUNRISE	10	-	-

Fonte: Diniz, 1999

#### 2.3.4 Os Componentes do sistema fotovoltaico

O componente principal de um sistema fotovoltaico é o módulo fotovoltaico onde estão conectadas as células fotovoltaicas, responsáveis pela conversão da luz em eletricidade. Dependendo do uso que será feito dessa energia, os sistemas fotovoltaicos utilizam outros equipamentos responsáveis por etapas como armazenamento, regulação e controle. Essa energia é

em corrente contínua e pode ser utilizada de maneira distinta dependendo da finalidade da instalação. Na Figura 2.8 são mostrados os tipos mais comumente encontrados em instalações fotovoltaicas.

Na situação 1, os módulos entregam energia elétrica diretamente à rede de distribuição de energia (*grid connected*), através de um inversor que converte a corrente contínua (C.C.) dos módulos em corrente alternada (C.A.) na tensão e frequência da rede local. Neste caso não há sistema de armazenamento.

A situação 2 é o sistema fotovoltaico para sistemas isolados (*stand alone systems*) da rede de energia, principalmente residências (*solar home system - SHS*). A energia provinda dos módulos pode ser armazenada em um banco de baterias ou utilizada imediatamente em cargas de corrente alternada (televisores, lâmpadas, refrigeradores, etc.). O controlador de carga monitora o funcionamento das baterias, evitando que elas sobrecarreguem ou descarreguem excessivamente.

Na situação 3, o sistema fotovoltaico é utilizado principalmente para o bombeamento de água. Os módulos fotovoltaicos são conectados diretamente a um motor de corrente contínua (C.C.).

A situação 4 é similar a 2 e é utilizada para o acionamentos de cargas em corrente contínua que devam funcionar nos períodos que não haja insolação.

De acordo com a Figura 2.8, os sistemas fotovoltaicos são compostos pelos seguintes elementos principais:

- i) Módulos fotovoltaicos;
- ii) Baterias;
- iii) Controlador de carga;
- iv) Inversor de frequência

A seguir são descritas as principais características das baterias, controladores de carga e inversores sendo que as especificações técnicas (marca, modelo, etc.) dos equipamentos utilizados no arranjo experimental aparecem no Capítulo 5.

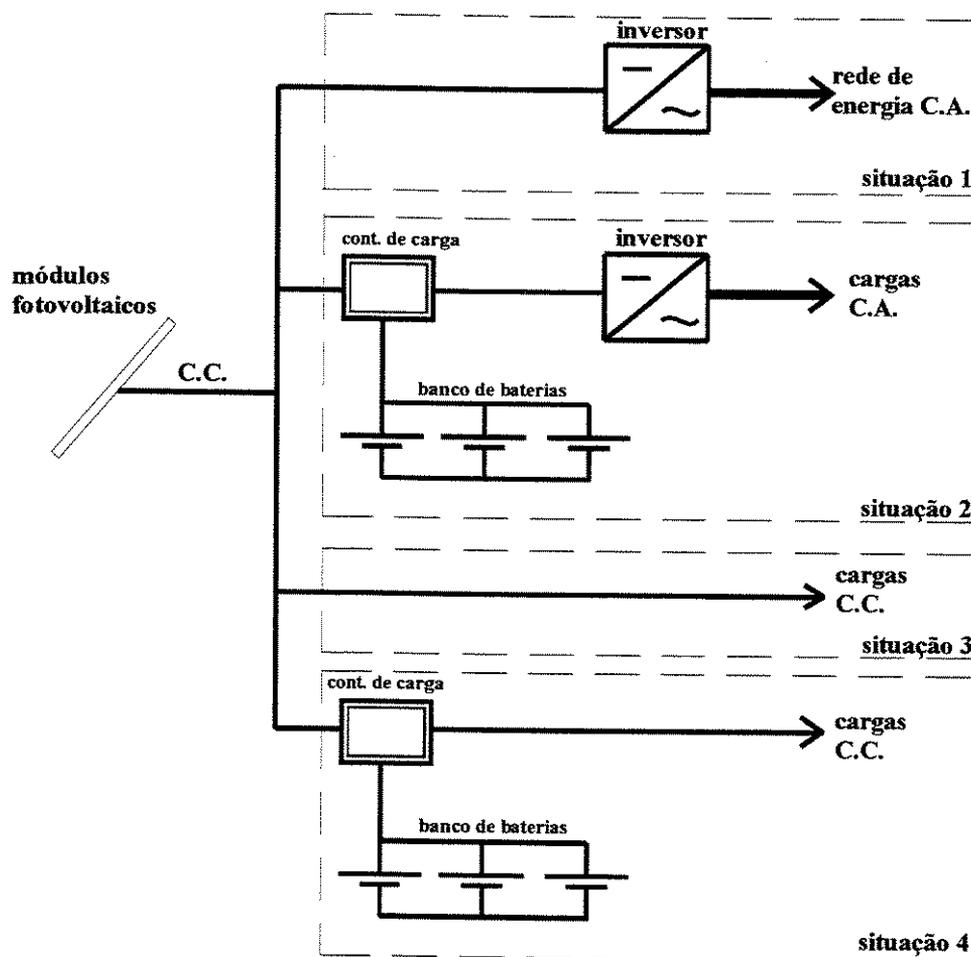


Figura 2.8. Diferentes esquemas de aproveitamento fotovoltaico

### *Sistema de armazenamento – Baterias*

A energia gerada pelos módulos nem sempre pode ser utilizada quando produzida ou gerada quando requerida sendo, por isso, necessário o armazenamento. As baterias são o meio mais utilizado para o armazenamento de energia elétrica. Quando uma bateria está conectada a um circuito elétrico, há conversão de energia química em energia elétrica no seu interior. Elas também garantem a estabilidade da tensão para as cargas, pois os painéis fotovoltaicos geram energia de forma intermitente com oscilações de tensão e corrente.

Em sistemas fotovoltaicos, a operação das baterias deve atender a ciclos rasos a cada dia (descarregam em torno de 20%, de sua capacidade em ampère-hora) e esporádicos ciclos

profundos por vários dias (em períodos chuvosos, descarregam até 80% de sua capacidade em Ampère-hora). As baterias automotivas não são apropriadas para uso em sistemas fotovoltaicos, porque as mesmas são projetadas para curtos períodos de rápida descarga, com elevadas taxas de corrente e com reduzidas profundidades de descarga, sem danificá-las [Diniz, 1999].

### Princípio de funcionamento das Baterias

A bateria é um dispositivo eletroquímico que transforma a energia química em energia elétrica e vice-versa. É basicamente formada quando duas placas, uma positiva e outra negativa e um separador são imersos em uma solução chamada eletrólito, constituída por ácido sulfúrico e água. Durante a reação química, que ocorre com eletrólito e as placas, elétrons se acumulam na placa negativa e é gerada uma tensão nominal de 2V entre as duas placas (bateria chumbo-ácida).

### Funções das baterias em sistemas fotovoltaicos

As baterias são usadas para armazenar a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos. Elas possuem três funções principais que são autonomia, estabilização de tensão e fornecimentos de correntes elevadas.

#### i) autonomia

A função mais importante das baterias é suprir energia para as cargas, quando os módulos não são capazes de produzir energia suficiente (todas as noites e em dias nublados)

#### ii) estabilização da tensão

A bateria também podem estabilizar a grande flutuação de tensão produzida pelos módulos fotovoltaicos. A conexão direta do módulo a uma carga pode expor a carga a tensões muito altas ou muito baixas para seu funcionamento adequado. As baterias podem garantir uma faixa de operação mais aceitável para o sistema porque operam em uma faixa de tensão mais estreitas que os módulos fotovoltaicos.

#### iii) fornecimento de correntes elevadas

A bateria pode fornecer correntes elevadas para as cargas por um curto período de tempo, e ser lentamente carregada pelo módulo durante todo o dia.

### Capacidade da bateria

É a quantidade de corrente que a bateria fornece durante um determinado tempo. Esse tempo é padronizado para 10, 20 e 100 horas. A unidade de capacidade é dada em ampére-hora.

### Tipos de baterias

As baterias para sistemas fotovoltaicos podem ser do tipo chumbo-ácida ou níquel-cádmio. As últimas aceitam descargas profundas e têm uma vida mais longa, mas o seu custo e disponibilidade as tornam viáveis somente em aplicações muito específicas. Já as baterias chumbo-ácida são as mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos. Podem ser classificadas quanto à aplicação em duas categorias: descarga rasa (*shallow*) e descarga profunda (*deep cycle*) e serem dos seguintes tipos:

- Convencional : é uma bateria chumbo-ácida com eletrólito líquido que requer água periodicamente. As placas são fabricadas em liga de chumbo-antimônio.
- Livre de manutenção: É uma bateria chumbo-ácida com eletrólito líquido que nunca requer água. As placas são fabricadas em ligas de chumbo.
- Selada: As baterias seladas, também do tipo chumbo-ácido, possuem um eletrólito em forma de gel ou absorvido e são verdadeiramente seladas, podendo funcionar em qualquer posição pois não correm o risco de vazamento do eletrólito

### Profundidade de descarga

A energia armazenada durante o dia é utilizada durante a noite. Este processo de carga e descarga caracteriza um ciclo, o qual é normalmente diário para os sistemas de energia solar.

A autonomia é o número de dias de reserva que o sistema funciona sem receber carga dos módulos solares devido à dias encobertos ou chuvosos (dias em que não há insolação direta e a radiação difusa contribui muito pouco para a produção de energia). A autonomia normalmente utilizada para aplicações não críticas de 3 a 5 dias e aplicações críticas de 7 a 10 dias.

## Medição do estado de carga das baterias

Para baterias seladas a única indicação da carga disponível é a tensão em seus terminais. A medição da tensão dá uma idéia aproximada do estado de carga. A Tabela 9, dá os valores aproximados da tensão e a respectiva carga para uma bateria chumbo-ácida. Nas baterias não seladas seu nível de carga pode ser medido através do nível do eletrólito.

Tabela 9. Estado de carga e valor respectivo da tensão de uma bateria chumbo-ácida

<b>Estado de carga (%)</b>	<b>Tensão (V)</b>
100	12,70
75	12,45
50	12,20
25	11,95
0	11,70

Fonte: Diniz,1999

Os componentes químicos encontrados nas baterias particularmente o mercúrio e o cádmio apresentam um maior risco para a saúde. O mercúrio prejudica os rins e o sistema nervoso central enquanto o cádmio é um provável cancerígeno humano e pode afetar também os rins e as funções pulmonares.

A solução para as baterias em geral é a reciclagem. Tanto o plástico do invólucro da bateria como o chumbo podem ser recuperados evitando a deposição na terra ou a incineração.

### Controlador de carga

É utilizado em um sistema fotovoltaico quando da necessidade de monitorar o funcionamento de carga e descarga das baterias. Ele evita que as baterias sejam sobrecarregadas ou descarregadas excessivamente. É um elemento importante pois a bateria é um elemento crítico da instalação e responsável pela maior parte das reservas com a manutenção que se tem em um sistema fotovoltaico, após sua instalação.

O controlador de carga recebe a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos e está conectado ao banco de baterias e aos equipamentos que irão utilizar essa energia.

Através do monitoramento da tensão dos banco de baterias ele conecta ou desconecta os módulos fotovoltaicos do sistema. Em um dia claro e sem nuvens, os módulos produzem energia

próximo de seus valores máximos. Se o consumo é pequeno, as baterias vão armazenar essa energia até que alcancem a plena carga. Se o processo continua, a bateria fica submetida a tensões cada vez mais elevadas e começa a reduzir sua eficiência, gerando correntes internas que aquecem a bateria elevando a temperatura do eletrólito. O controlador evita esta situação, desconectando os módulos fotovoltaicos das baterias quando estas atingem determinado valor de tensão.

Quando ocorre uma sucessão de dias nublados, as baterias vão descarregando-se, pois o consumo continua o mesmo, até atingirem o mínimo valor de carga. O controlador impede que as baterias atinjam esse ponto, desconectando as cargas do sistema. Assim que as baterias retornam ao valor de tensão normal, o controlador reconecta as cargas ao sistema.

#### Ajuste dos pontos de operação

Para controladores que possuem ajuste de mínima e máxima tensão das baterias, são recomendados os seguintes valores para sistemas fotovoltaicos isolados operando com baterias chumbo-ácida:

- tensão máxima de carregamento das baterias:  $14,2 \pm 0,2V$
- tensão de reinício de carregamento das baterias:  $13,2 \pm 0,2V$
- tensão de desconexão das cargas:  $11,3 \pm 0,2V$
- tensão de reconexão das cargas:  $12,5 \pm 0,2V$

#### *Inversor de frequência*

É um dispositivo eletrônico responsável pela transformação de uma tensão contínua em alternada. Normalmente trabalham com tensões contínuas de 12, 24, 48 ou 120VCC e convertem para 120/127 ou 220 V, na frequência de 50 ou 60Hz.

Há inversores que apresentam na saída uma forma de onda praticamente senoidal, outros trabalham com onda retangular e com onda quadrada. A escolha do inversor apropriado depende das características das cargas a serem acionadas, sendo que os inversores de onda quadrada são os que possuem o menor rendimento e grande distorção harmônica ( da ordem de 40%). Os

inversores com saída senoidal modificada possuem distorção menor (da ordem de 20%) e eficiência também maior (90%). Já os inversores de saída senoidal, são aqueles que mais se aproximam da forma de onda fornecida pela concessionária de energia com eficiências superiores a 95% e distorção inferiores a 5%. Obviamente os custos destes equipamentos variam diretamente com a qualidade dos mesmos.

## Capítulo 3

### As Relações Terra – Sol

#### 3.1. Ângulos solares

Quando a Terra gira em torno do Sol, ela gira sobre um eixo imaginário que aponta para a Estrela Polar e está inclinado a  $23^{\circ}27'8,2''$  (aproximadamente  $23,45^{\circ}$ ) do plano orbital, como ilustrado na Fig. 3.1. Portanto, o ângulo entre o plano equatorial terrestre e a linha Terra-Sol varia entre  $\pm 23,45^{\circ}$  ao longo do ano. Este ângulo é chamado declinação,  $\delta$ . Declinação ao norte do equador são positivas, no sul, negativas. Ela pode ser aproximada por:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[ 360^{\circ} \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (3.1)$$

onde  $n$  é o dia do ano (de 1 a 365). O valor de  $\delta$  calculado da Eq. (3.1) será correto dentro  $\pm 0,37^{\circ}$  (com desvio máximo positivo em 1° de Maio) e  $-1,70^{\circ}$  (com desvio máximo negativo em 9 de Outubro) [Coffari,1977].

A localização do Sol no céu relativa a um ponto na superfície da Terra pode ser definida com dois ângulos, a altitude solar  $\alpha_s$  e o azimute solar  $\gamma_s$ , como ilustrado na Fig. (3.1). A altitude solar em um ponto na Terra é o ângulo entre a linha passando pelo ponto e o Sol e a linha passando pelo ponto tangente à Terra e passando abaixo do Sol. O azimute solar é o ângulo entre

a linha abaixo do Sol e o meridiano local apontando para o equador. É positivo medido para o leste e negativo para oeste em ambos os hemisférios. O ângulo zenital solar  $\zeta_s$  definido como o ângulo entre um raio solar e a direção vertical local, é o complemento de  $\alpha_s$ .

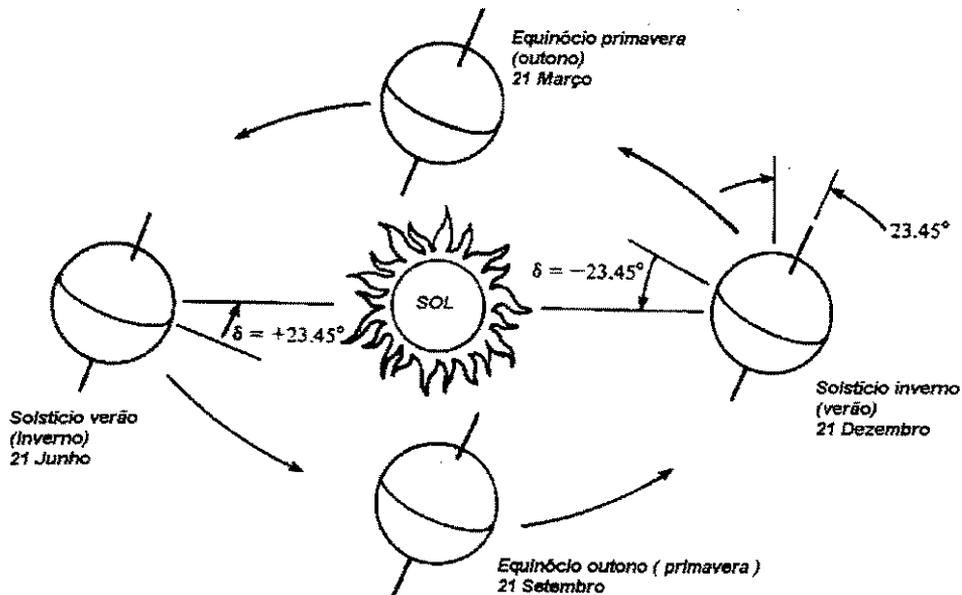


Figura 3.1 – Relação Terra-Sol no Hemisfério Norte e Sul

A localização do Sol no céu é uma função do local sobre a Terra, o período do ano e a hora do dia. O local na Terra é especificada pela latitude  $\phi$ . No equador,  $\phi = 0$ . Ao norte do equador, as latitudes são positivas; ao sul, negativas. O período do ano é especificado pela declinação solar  $\delta$ , previamente definida. A hora do dia é especificada pelo ângulo horário  $\omega$ . O ângulo horário é definido como zero no meio-dia local ( $\gamma_s = 0$ ), e aumenta de  $15^\circ$  para cada hora antes do meio-dia local [i.e., para 8h (hora solar),  $\omega = 60^\circ$ ] e diminui de  $15^\circ$  para cada hora após o meio-dia [i.e., às 15h (hora solar),  $\omega = -45^\circ$  em ambos hemisférios].

Com a ajuda da geometria esférica, expressões para a altitude solar e o azimute solar pode ser desenvolvida em termos de  $\phi$ ,  $\delta$ , e  $\omega$ . Assim,

$$\sin \alpha_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (3.2)$$

e

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s} \quad (3.3)$$

A hora do nascer e do ocaso do Sol e o comprimento do dia pode ser determinado usando a Eq. (3.2). No nascer e no ocaso,

$$\sin \alpha_s = 0 = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega_{ss} \quad (3.4)$$

onde  $\omega_{ss}$  é o ângulo horário do ocaso (ou nascer) do Sol, o qual pode ser expresso como:

$$\omega_{ss} = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3.5)$$

O comprimento do dia é duas vezes o ângulo horário do ocaso. Da equação (3.5) o comprimento do dia pode ser expresso em horas como

$$t_d = \frac{2}{15} \omega_{ss} = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3.6)$$

quando  $\omega_{ss}$  é expresso em graus.

### 3.2 Ângulos solares relativos à superfícies inclinadas

Provavelmente o mais comum cálculo feito em qualquer problema de projeto de sistemas solares é determinar o ângulo de incidência do raio do Sol para uma superfície orientada arbitrariamente como um painel fotovoltaico ou um coletor plano. A posição do Sol é estabelecida pela altitude solar e o azimute solar. A orientação da superfície irradiada é definida pelo seu azimute  $\gamma_c$ , medida a partir do meridiano local em direção ao equador (positivo para o leste e negativo para o oeste em ambos os hemisférios), e um ângulo de inclinação  $\beta$ , medido em relação à horizontal. Estes ângulos são ilustrados na Figura 3.2.

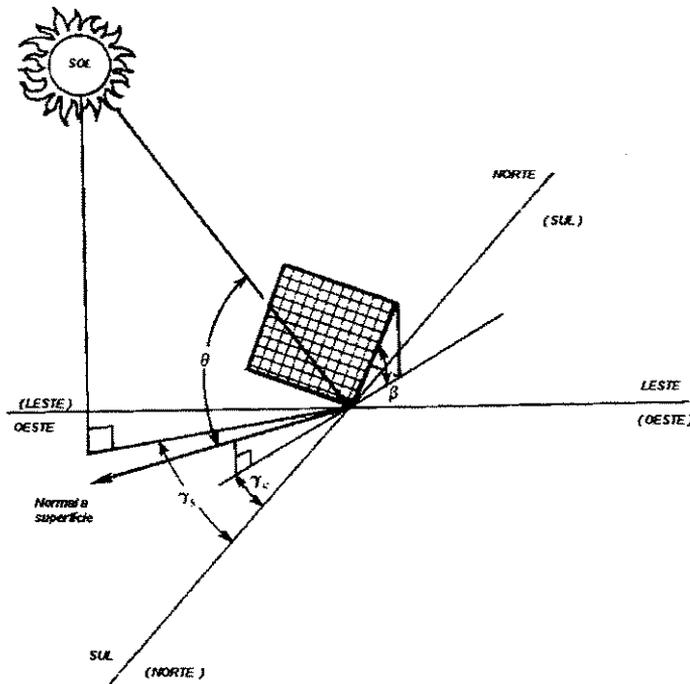


Figura 3.2 – Altitude solar, zênite e azimute para os hemisférios norte e sul

O ângulo incidente solar relativo a uma superfície é designado  $\theta$ . A quantidade  $\cos \theta$  é a fração da superfície iluminada que é projetada na direção do raio solar. Assim, a quantidade de fluxo de raio solar atingindo uma unidade de área de uma superfície é

$$q_b = I_b \cos \theta \quad (3.7)$$

onde  $I_b$  é a intensidade do raio solar.

Isto pode ser mostrado que

$$\cos \theta = \cos(\gamma_s - \gamma_c) \cos \alpha_s \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta \quad (3.8)$$

ou em termos da latitude, ângulo horário e declinação [com Eqs.(3.2) e (3.3)]

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma_c) \\ & + \cos \delta \cos \alpha (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma_c) \end{aligned}$$

$$+ \cos\delta \operatorname{sen}\beta \operatorname{sen}\gamma_c \operatorname{sen}\alpha \quad (3.9)$$

Para casos de especial interesse estas expressões podem ser simplificadas:

Para uma superfície virada para o equador, para o qual  $\gamma_c = 0$ ,

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \cos\gamma_s \cos\alpha_s \operatorname{sen}\beta + \operatorname{sen}\delta \cos\beta \\ &= \operatorname{sen}(\phi - \beta) \operatorname{sen}\delta + \cos(\phi - \beta) \cos\delta \cos\alpha \end{aligned} \quad (3.10)$$

Para uma superfície vertical virada para o equador, para o qual  $\gamma_c = 0$  e  $\beta = 90^\circ$ ,

$$\cos\theta = \cos\gamma_s \cos\alpha_s = -\operatorname{sen}\delta \cos\phi + \cos\delta \operatorname{sen}\phi \cos\alpha \quad (3.11)$$

Para uma superfície horizontal, para o qual  $\beta = 0$ ,

$$\cos\theta = \operatorname{sen}\alpha_s = \operatorname{sen}\phi \operatorname{sen}\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\alpha \quad (3.12)$$

### 3.3 Radiação solar extraterrestre

A Terra gira em torno do Sol em uma ligeira órbita elíptica a uma distância média de  $1,50 \times 10^8$  km, com uma variação de  $\pm 1,7$  por cento. O disco visível do Sol (a fotosfera) subentende um ângulo na Terra de  $0,545^\circ$  (32,7 minutos) de arco na distância média Terra-Sol. Dos  $3,7 \times 10^{23}$  kW de potência gerada pelo Sol, somente cerca de  $1,7 \times 10^{14}$  kW alcança a Terra.

A constante solar  $I_{sc}$  é o total ( em todos os comprimentos de onda) da energia solar radiativa que alcança uma unidade de área exposta perpendicularmente aos raios do Sol na distância média Terra-Sol. O valor corrente aceito da constante solar é de  $1377 \text{ Wm}^{-2}$  [Howell, 1982]. A radiação extraterrestre  $I_o$  alcançando a Terra varia ao longo do ano, principalmente por causa da mudança da distância Terra-Sol, e também devido às manchas solares, erupções e outras atividades na superfície do Sol. A variação devido à distância pode ser expressa como

$$I_o(n) = I_{sc} \left[ 1 + 0,034 \cos\left(\frac{360^\circ n}{365}\right) \right] \quad (3.13)$$

onde  $n$  é o número do dia do ano (1 a 365).

### 3.4. Radiação Solar Terrestre

Para as aplicações terrestres da energia solar é essencial levar em conta a interação da energia solar ao passar pela atmosfera. Os dois mecanismos primários de interação são a absorção e difusão. Ambos os efeitos desses processos são a redução da radiação solar que alcança a superfície da Terra e a introdução de um componente difuso no fluxo solar.

Na superfície da Terra, a soma da radiação solar incidente de todas as direções é chamada de *radiação global*. A porção que vem diretamente do Sol sem mudança na direção (não difusa) é chamada *radiação direta*. Seu valor varia de cerca de 90 por cento da radiação global em um dia extremamente claro à praticamente zero em um dia nublado. A difusa ou radiação não direta de todas as direções exceto diretamente do Sol, compõem o resto da radiação global.

A análise detalhada da interação da energia radiativa com um meio parcialmente absorvente e difusor, como a atmosfera, está entre os mais complexos em toda a ciência física. Na teoria, os processos são bem entendidos. A complexidade, especialmente no caso da atmosfera, resulta do número extremamente grande de interações, a dependência do comprimento de onda da luz solar nas interações, a falta de dados físicos detalhados, e a falta de conhecimento da composição local da atmosfera em qualquer momento dado. Ao entrar na atmosfera, os raios solares são difundidos pelas moléculas de ar, gotas d'água, pó, e outras partículas, e absorvidas pelos gases atmosféricos e vapor d'água.

Na atmosfera a intensidade espectral do raio incidente é diminuída quando

$$I_{\lambda} = I_{\lambda}(0)e^{-\tau_{\lambda}m} \quad (3.15)$$

onde  $I_{\lambda}$  = intensidade espectral transmitida do raio solar

$I_{\lambda}(0)$  = intensidade espectral extraterrestre do raio solar

$\tau_{\lambda}$  = espessura ótica do espectro (adimensional) da atmosfera medida do topo da atmosfera verticalmente para baixo.

$m$  = número de massas de ar (AM) que é a relação da atual declinação do caminho percorrido pelo raio solar através da atmosfera para o comprimento do caminho vertical para a mesma profundidade.

O número de massas de ar (AM) pode ser aproximado por

$$m = AM \cong \frac{1}{\cos \zeta_s} = \frac{1}{\sin \alpha_s} \quad (3.16)$$

onde  $\zeta_s$  é o ângulo solar zenital, ou seu complemento  $\alpha_s$ .

A maioria da porção ultravioleta ( $\lambda < 0,4 \mu\text{m}$ ) do espectro solar é absorvida na atmosfera superior (ionosfera) pelo ozônio. Por toda a atmosfera os constituintes primários absorventes são o  $\text{H}_2\text{O}$  e o  $\text{CO}_2$ , ao quais exibem algumas bandas absorventes no infravermelho ( $\lambda > 0,7 \mu\text{m}$ ) comprimentos de onda maiores que  $0,7 \mu\text{m}$ . A magnitude desta absorção é fortemente dependente da quantidade de  $\text{CO}_2$  e vapor d'água assim como o ângulo do zênite solar (número de massas de ar). Em áreas úmidas e em áreas industriais com altos níveis de  $\text{CO}_2$  e hidrocarbonetos na atmosfera, a absorção será maior. Para todas as propostas práticas, entretanto, pode ser considerado que a radiação solar terrestre é restrita à faixa entre  $0,3 < \lambda < 1,8 \mu\text{m}$ , ao redor da região visível do espectro solar (Figura 3.3).

### 3.5. Radiação Extraterrestre Total em uma Superfície Horizontal

A quantidade de raios solares que alcança o topo da atmosfera terrestre é dada pela Eq. (3.13). Esta é a energia radiativa por unidade de tempo por unidade de área perpendicular ao raio solar. Também é de interesse a quantidade de energia que alcança uma superfície extraterrestre horizontal

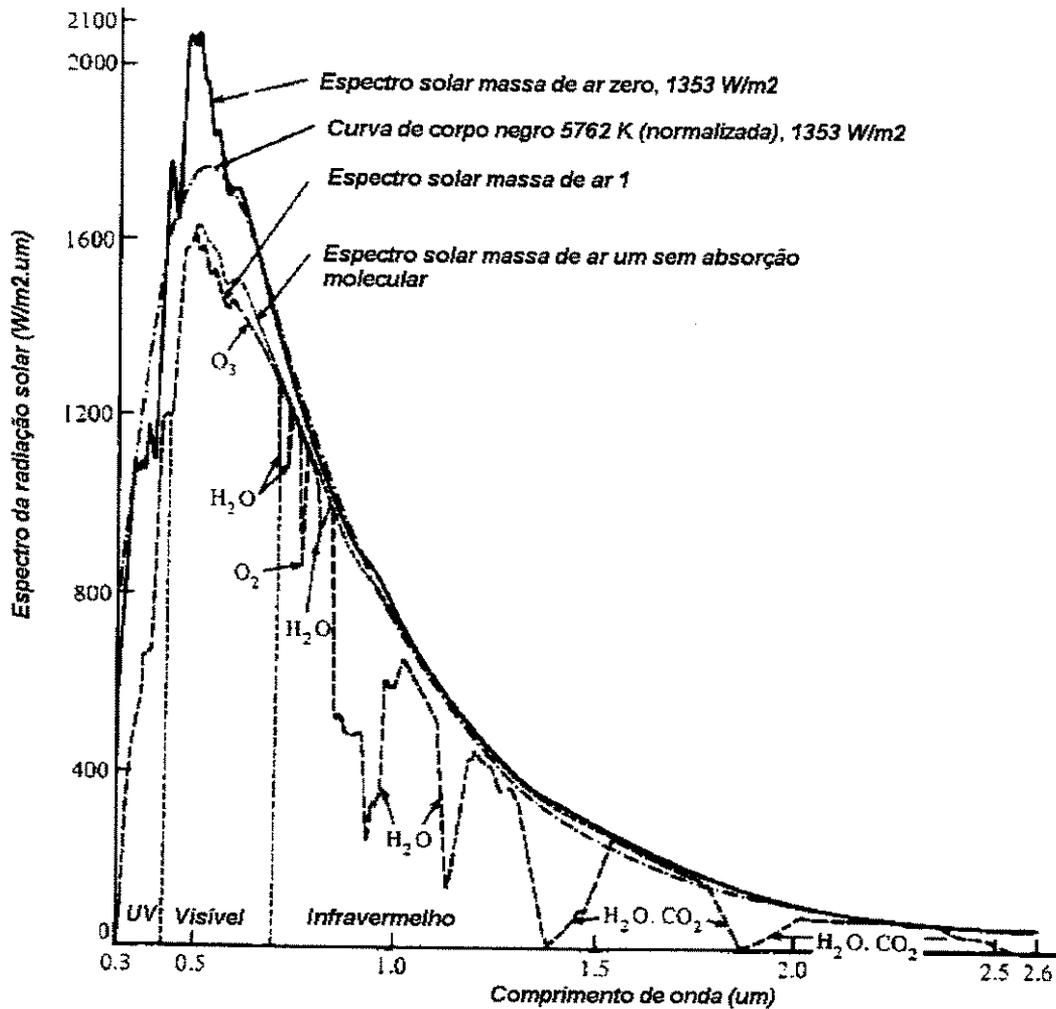


Figura 3.3 – Espectro da radiação solar. Fonte: Howell, 1982

$$H_o = I_o(n) \sin \alpha_s = I_{sc} \left( 1 + 0,034 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right) \sin \alpha_s \quad (3.17)$$

onde  $\alpha_s$  é a altitude solar na Eq. (3.3). O símbolo  $H$  indica insolação em uma superfície horizontal. O subscrito “0” é usado para indicar “extraterrestre”. A insolação extraterrestre média diária em uma superfície horizontal pode ser obtida integrando a Eq. (3.17) do nascer ao ocaso do Sol. O resultado é

$$\overline{H}_o = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left( 1 + 0,034 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right) \left( \cos \phi \cos \delta \sin \omega_{ss} + \frac{\pi \omega_{ss}}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (3.18)$$

A barra é usada para indicar o valor médio diário em  $\text{kWhm}^{-2}\text{dia}^{-1}$  se  $I_{sc}$  está em  $\text{kWm}^{-2}$ . Note que  $\omega_{ss}$  está em graus.

Em muitas das correlações usadas para prever a radiação, a radiação extraterrestre média diária mensal sobre uma superfície horizontal para cada mês é usado como uma referência. Klein [Klein, 1977] sugere que este valor de referência pode ser estimado a partir da Equação (3.18), selecionando para cada mês, o dia para o qual a insolação extraterrestre diária é aproximadamente a mesma do valor médio mensal. Neste caso,  $H_o$  indica a radiação extraterrestre média diária mensal. Os dias característicos recomendados para cada mês são dados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dia característico recomendado para cada mês

<i>Mês</i>	<i>Dia do ano, n</i>	<i>Data</i>
Janeiro	17	17 de Janeiro
Fevereiro	47	16 de Fevereiro
Março	75	16 de Março
Abril	105	15 de Abril
Mai	135	15 de Maio
Junho	162	11 de Junho
Julho	198	17 de Julho
Agosto	228	16 de Agosto
Setembro	258	15 de Setembro
Outubro	288	15 de Outubro
Novembro	318	14 de Novembro
Dezembro	344	10 de Dezembro

Fonte: Klein, 1977.

### 3.6 Medida da Radiação Solar Terrestre

Em um dia claro, a sombra formada por um objeto é bem definida, enquanto que em um dia nublado, ela é tênue ou indefinida. As sombras bem definidas em um dia claro devem-se à predominância da radiação direta (até 90 por cento da radiação global). A iluminação uniforme do dia nublado é devido ao baixo nível da radiação direta e a dominância da radiação difusa.

Muitos tipos de aparelhos foram desenvolvidos para medir a intensidade da radiação. Os instrumentos utilizados hoje, em sua maioria, baseiam-se ou no efeito termoeletrico (usando um termopar) ou o efeito fotoeletrico (célula fotovoltaica).

Há três medidas padrão de radiação que são feitas essencialmente com dois instrumentos básicos. São elas, a radiação direta, a não direta (difusa), e a radiação global. A medida da radiação direta é feita com um pireliômetro [ou como chamado oficialmente, um pireliômetro de incidência normal (NIP)]. A medida global é feita com um piranômetro (ou, como foi chamado até 1965, um pireliômetro de 180°). A diferença entre os dois instrumentos é o seu campo de visão; o pireliômetro é restrito a um estreito campo de visão (captando apenas a radiação direta) enquanto o piranômetro cobre todo o espaço do hemisfério. As medidas da radiação difusa são feitas com um piranômetro sobre qual uma sombra é projetada para evitar a incidência da radiação direta.

### **3.7 Radiação Terrestre em Superfícies Inclinadas**

Uma importante questão ao se projetar um sistema fotovoltaico é conhecer a quantidade de radiação solar que atinge uma determinada superfície inclinada. Como foi dito anteriormente, o valor dessa radiação envolve muitos fatores que são difíceis de precisar. Muitos artigos têm sido escrito nas últimas décadas, propondo várias fórmulas para estimar a radiação terrestre horizontal global baseados em dados meteorológicos, incluindo dias de sol, cobertura de nuvens, temperatura ambiente, e umidade. Entretanto, as interações entre estes fatores são potencialmente tão complexas, que nenhuma formulação geral com razoável precisão foi desenvolvida.

Normalmente, a informação disponível de radiação é (1) horizontal local global (piranômetro) e a radiação direta (pireliômetro) ou (2) radiação horizontal somente. Sem ao menos a radiação horizontal global, é extremamente difícil prever precisamente a radiação sobre superfícies inclinadas.

Uma aproximação grosseira do valor da radiação a fim de se fazer uma primeira tentativa de dimensionamento pode ser conseguida através de mapas de insolação para determinada região.

Fatores de correção da radiação para superfícies inclinadas podem ser conseguidos em tabelas [Roberts, 1991].

Quando os valores de radiação estão disponíveis para o local, como direta e global é possível determinar com precisão os valores de radiação para uma superfície inclinada.

Nas formulações a seguir, assume-se que os ângulos de orientação da superfície ( $\beta, \gamma_c$ ) (ver Fig. 3.2), o tempo ( $\delta, \omega$ ), e o local ( $\phi$ ) sejam todos conhecidos. Os procedimentos básicos são os seguintes:

1. Determinar a radiação global horizontal.
2. Determinar a radiação direta.
3. Determinar a radiação difusa. (A ordem de 2 e 3 dependerá do tipo de correlação usada.)
4. Assume-se que a radiação difusa é realmente difusa (i.e., isotrópica).
5. Determinar o ângulo entre a radiação direta e a superfície inclinada.
6. Determinar as contribuições separadas da radiação direta, difusa e refletida (também assumida isotrópica) sobre a superfície inclinada.

Tendo em vista que o Cepagri da Unicamp fornece os dados locais de radiação direta e difusa com leituras no intervalo de 10 minutos e que este presente trabalho é baseado nesses dados, a formulação a seguir para o cálculo de radiação utilizando a radiação direta e difusa, segundo Howel [Howel, 1982] é

$$I_b = \frac{H - H_d}{\text{sen } \alpha_s} \quad (3.19)$$

onde  $H$  = radiação horizontal total em uma superfície em  $\text{Wm}^{-2}$

$H_d$  = radiação difusa em uma superfície horizontal em  $\text{Wm}^{-2}$

$\alpha_s$  = altitude solar [Eq.(3.2)]

A radiação em uma superfície inclinada [Page, 1961] é portanto

$$q_s = I_b \cos\theta + H_d \cos^2 \frac{\beta}{2} + H\rho_r \operatorname{sen}^2 \frac{\beta}{2} \quad (3.20)$$

onde  $\theta =$  o ângulo entre o raio solar e a normal a superfície inclinada.

$\cos^2\beta/2 =$  o fator de configuração radiativa de uma superfície para o céu ( é a fração do céu “vista” pela superfície e representa a fração da radiação difusa que alcança a superfície)

$\operatorname{sen}^2\beta/2 =$  o fator de configuração radiativa de uma superfície inclinada para o solo e arredores ( é um menos o fator de configuração superfície-para-o-céu)

$\rho_r =$  refletância efetiva difusa do solo da radiação direta mais difusa em uma superfície horizontal .

A Equação (3.20) é comumente escrita como:

$$q_s = H_b R_b + H_d R_d + H\rho_r R_r \quad (3.21)$$

ou simplesmente

$$q_s = HR \quad (3.22)$$

onde

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\operatorname{sen}\alpha_s} \quad (3.23)$$

$$R_d = \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (3.24)$$

$$R_r = \operatorname{sen}^2 \frac{\beta}{2} \quad (3.25)$$

$$R = \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) R_b + \frac{H_d}{H} R_d + \rho_r R_r \quad (3.26)$$

### 3.8. Radiação Média Diária Mensal em Superfícies Inclinadas

Os cálculos instantâneos ou horários são usados para estudos de desempenho detalhados. Se um desempenho a longo prazo é necessário, uma simulação por computador pode ser usada. Entretanto, esses cálculos detalhados são freqüentemente desnecessários. Uma alternativa é usar os cálculos de desempenho baseados em um modelo de radiação *média* diária mensal.

Há vários modelos que trabalham sobre os valores médios mensais. Um dos modelos baseia-se no conhecimento em um índice  $\overline{K_T}$  (valor médio), quando apenas é conhecido a radiação global horizontal total do local é conhecido. Este índice é conhecido por vários nomes, como “índice de nebulosidade”, “índice de clareza”, “percentual horário de sol”, etc. Este valor varia de 0,8, sob condições de dia muito claro, a próximo a zero para um dia muito nublado. O índice médio  $\overline{K_T}$  é definido como

$$\overline{K_T} = \frac{\overline{H}}{\overline{H_0}} \quad (3.27)$$

onde  $\overline{H}$  é a média mensal da radiação diária global terrestre sobre uma superfície horizontal e  $\overline{H_0}$  é a média mensal da radiação diária extraterrestre sobre uma superfície horizontal. O  $\overline{H_0}$  é determinado pelo cálculo da média diária da radiação extraterrestre em um determinado dia do mês [Tab. 10] através da Eq. 3.18.

Dispondo do valor de  $\overline{K_T}$ , é possível encontrar o valor de  $\overline{H_d}$ , a média mensal da radiação difusa através da seguinte relação desenvolvida por Page:

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 1,00 - 1,13\overline{K_T} \quad (3.28)$$

Assim, a média mensal da radiação direta diária  $\overline{H_b}$  sobre uma superfície horizontal pode ser expressa como

$$\overline{H_b} = \overline{H} - \overline{H_d} \quad (3.29)$$

A média mensal da radiação diária sobre uma superfície inclinada é

$$\overline{q_s} = \overline{H_b} \overline{R_b} + \overline{H_d} R_d + \overline{H_r} \rho_r R_r \quad (3.30)$$

ou

$$\overline{q_s} = \overline{H} \overline{R} \quad (3.31)$$

onde  $\overline{R_b}$  = valor médio mensal de  $R_b$

$R_d, R_r$  = as mesmas quantidades definidas nas Eqs. (3.24) e (3.25), respectivamente

e

$$\overline{R} = \left(1 - \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}\right) \overline{R_b} + \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} R_d + \rho_r R_r \quad (3.32)$$

De fato a contribuição da radiação direta  $\overline{H_b} \overline{R_b}$  deveria ser calculada pela integração ou pela soma do produto  $H_b R_b$  no mês. Entretanto, sem os valores horários de  $H_b$ , isto não é possível. É uma prática aceita fazer a seguinte aproximação [da Eq. (3.23)]

$$\overline{R_b} \cong \frac{\overline{\cos \theta}}{\overline{\sin \alpha_s}} \quad (3.33)$$

isto é, a média mensal do valor diário do  $\cos \theta$  dividido pelo valor médio mensal do valor diário do  $\sin \alpha_s$ . Na teoria este cálculo poderia ser feito somente para o dia representativo do mês (Tabela 10). Entretanto, mesmo com esta simplificação o cálculo é geralmente longo e tedioso. Entretanto, para superfícies direcionadas para o equador situadas no hemisfério sul

$$\overline{R_b} (\gamma_c = 0) = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \overline{\omega'_{ss}} + (\overline{\omega'_{ss}} \pi / 180) \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \overline{\omega_{ss}} + (\overline{\omega_{ss}} \pi / 180) \sin \phi \sin \delta} \quad (3.34)$$

(calculado no dia representativo) onde  $\omega_{ss}$  é o ângulo horário do ocaso em graus e  $\omega'_{ss}$  é o ângulo horário efetivo do ocaso em graus para a superfície, que é o valor mínimo de

$$\omega'_{ss} = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$$

ou

$$\omega'_{ss} = \cos^{-1}(-\tan(\phi + \beta) \tan \delta) \quad (3.35)$$

Liu [Liu, 1960] assumiu e demonstrou com dados de radiação de muitos locais, que a relação entre radiação global, difusa e direta é

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}_0} \cong \frac{H_d}{H_0} \quad (3.36)$$

Na Tabela 11 estão os valores calculados de  $\overline{R}_b$  para a cidade de Campinas.

Tabela 11 - Valores calculados para as principais variáveis

Dia	$\delta$ (graus)	$\phi$ (graus)	$\beta$ (graus)	$\omega_{ss}$ (graus)	$\overline{R}_b$	$\overline{H}_0$ (kWhm <sup>-2</sup> )
17/1 (17)	-20,9	-23	25	89,23	0,85	11,69
16/2 (47)	-12,95	-23	25	89,53	0,93	11,13
16/3 (75)	-2,42	-23	25	89,91	1,05	10,04
15/4 (105)	9,41	-23	25	85,97	1,12	8,45
15/5 (135)	18,8	-23	25	81,69	1,28	7,01
11/6 (162)	23,1	-23	25	79,57	1,35	6,31
17/7 (198)	21,2	-23	25	80,52	1,32	6,59
16/8 (228)	13,4	-23	25	84,19	1,22	7,78
15/9 (258)	2,2	-23	25	89,06	1,12	9,34
15/10 (288)	-9,6	-23	25	89,66	0,97	10,71
14/11 (318)	-18,9	-23	25	89,31	0,9	11,50
10/12 (344)	-23	-23	25	89,15	0,86	11,72

Fonte: Elaboração própria

## Capítulo 4

### Dimensionamento de um sistema fotovoltaico

O dimensionamento de uma instalação fotovoltaica parte dos dados de radiação do local correspondente e dos dados de consumo que se deve garantir. O dimensionamento consiste em estabelecer o balanço entre a energia disponível e a energia de consumo, tendo em conta os rendimentos dos diferentes passos de transformação e aplicando os coeficientes de segurança que se julguem pertinentes [Castañer, 1985].

Tratando-se de um fornecimento intermitente, a energia solar fotovoltaica, como a eólica, estão sujeitas a incertezas como:

- i) incerteza atmosférica;
- ii) rendimento da adaptação painel-bateria;
- iii) rendimento da conversão CC-CA;
- iv) rendimento de acumulação de energia em baterias, e,
- vi) autodescarga das baterias.

O primeiro passo é conhecer os dados da radiação média do lugar escolhido para a instalação. Geralmente esses dados se referem à superfícies horizontais e devem ser corrigidos para se obter os valores correspondentes ao ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos.

#### 4.1. Dados de radiação

O dimensionamento do sistema fotovoltaico deste trabalho baseou-se nos dados de radiação direta e difusa disponibilizados pelo Centro de Pesquisas Agropecuárias (Cepagri) da UNICAMP. Os dados completos referem-se aos anos de 1997 e 1998. Esses dados são o registro diário a cada dez minutos da radiação instantânea direta e difusa em um plano horizontal em  $\text{kWm}^{-2}$ , da estação localizada na Faculdade de Engenharia Agrícola na cidade universitária da UNICAMP. Os dados instantâneos diários foram integrados de forma a obter a energia total diária, somando a radiação direta e difusa em  $\text{kWhm}^{-2}$ . Isso foi feito para todos os dias do ano e em seguida foi feita a média diária mensal que se encontra na Tabela 12. Nesta tabela estão os valores médios dos anos de 1997 e 1998. Eles foram tabulados de forma a obter a média dos dois anos. A Figura 4.1 exemplifica a forma como foram trabalhados os dados tomando-se um dia qualquer.

Tabela 12 - Radiação média diária  $\text{kWhm}^{-2}\text{dia}^{-1}$  [Cepagri - média 1997/1998]

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
5,96	5,84	5,78	5,08	3,96	3,42	4,23	4,78	4,94	5,4	5,41	6,06
Média:	5,07	Máx:	6,06	Min:	3,42						

O Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) dá os valores de radiação apresentados na Tabela 13 para a cidade de Campinas baseados no CENSOLAR 1993 contendo os valores de radiação média diária mensal no plano horizontal para cerca de 350 pontos no Brasil e países limítrofes (CRESESB, 1999).

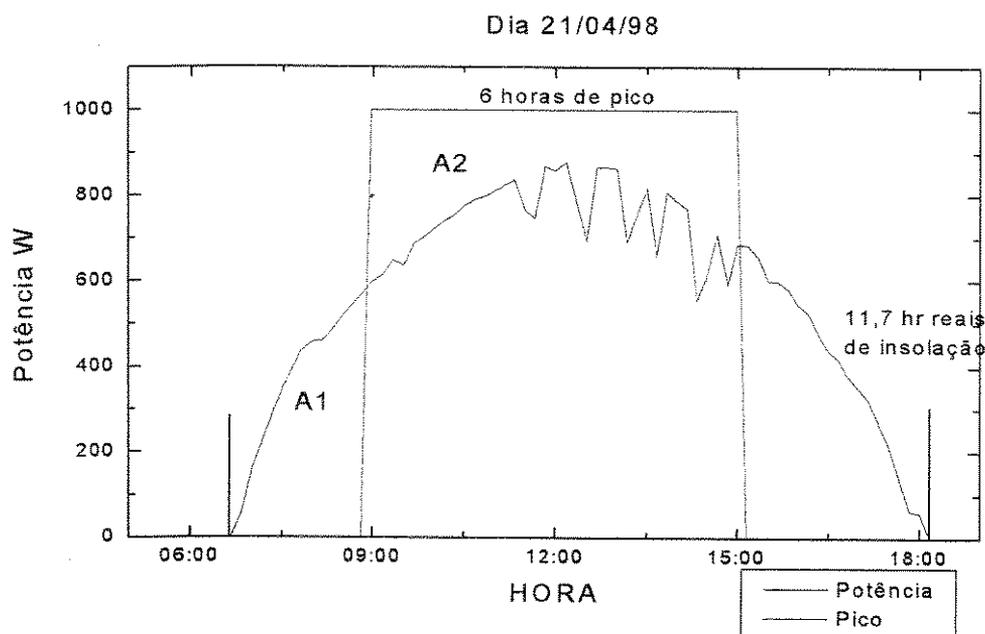


Figura 4.1 – Radiação instantânea total recebida no dia 21/04/98 registrada pelo Cepagri com pico de potência às 12h (em preto). A área A1 subentendida pela curva, corresponde a integração da potência instantânea entre 6h00 min. e 18h00 min. A linha vermelha delimita a área A2 que corresponde ao valor de pico,  $1000 \text{ W/m}^2$ , multiplicado pelas horas correspondentes para que  $A1 = A2$ .

Tabela 13 - Radiação média diária  $\text{kWhm}^{-2}\text{dia}^{-1}$  para o ano de 1993 [CRESESB]

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
5,33	5,56	5,22	4,53	4,06	3,56	4,19	4,58	4,75	5,58	5,86	5,53
Média: 5,18		Máx: 5,47		Min: 3,56							

A CESP, Centrais Elétricas de São Paulo, possui também uma série histórica de radiação abrangendo o período de 1956 a 1965 [Macedo, 1981] para a cidade de Campinas. Os valores estão na Tabela 14.

Tabela 14 - Radiação média diária  $\text{kWhm}^{-2}\text{dia}^{-1}$  série histórica 1956-1965 [CESP]

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
5,14	5,00	4,93	4,52	3,86	3,38	3,62	4,09	4,27	4,66	5,29	5,06
Média: 4,48		Máx: 5,29		Min: 3,38							

A Figura 4.2. compara os valores dos dados de radiação coletados pelo Cepagri os dados do CRESESB e da CESP. Nota-se que nas curvas, o mês de Junho apresenta o menor valor de radiação, com valores próximos nas três fontes.

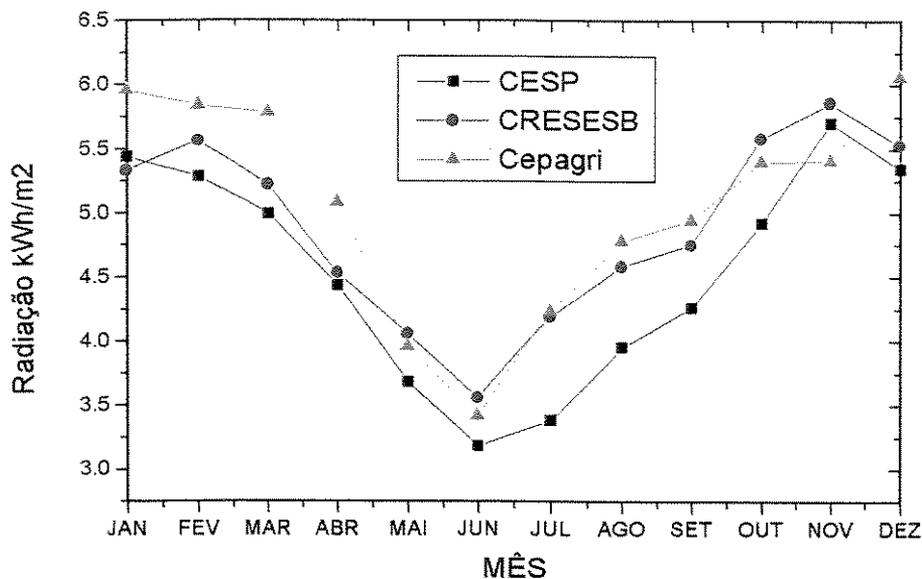


Figura 4.2 - Comparação entre os dados de radiação do Cepagri/UNICAMP em 1997/1998, dados do CRESESB e CESP(1956-1965).

#### 4.2. Consumo da Instalação

Outro aspecto determinante do projeto é o perfil de consumo da instalação. No caso mais geral, o consumo diário é uma função descontínua do tempo.

Se supomos fixa a tensão de alimentação da instalação, o consumo de energia em ampere-hora (Ah) é dada pela soma da corrente diária total da instalação

$$Ah = \int_0^{24} i_L(t) dt \quad (\text{ampéres.hora/dia}) \quad (4.1)$$

onde  $i_L(t)$  é a função que corresponde a corrente de consumo em função do tempo.

Dispondo da corrente de pico (ou corrente máxima do módulo) nas condições padrão de teste (STC), calcula-se a energia média diária fornecida pelo módulo de acordo com os dados de insolação:

$$E_d = H_p \cdot I_p \cdot V_b \quad (4.2)$$

onde  $E_d$  é a energia média diária produzida pelo módulo em Wh.

$I_p$  é a corrente de pico do módulo em ampéres (STC)

$V_b$  é a tensão do banco de baterias (12 ou 24V)

$H_p$  horas de pico: tempo equivalente diário em que o módulo estará drenando sua máxima corrente a uma irradiação de  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ , sendo 1 hora-pico =  $1 \text{ kWhm}^{-2}$ .

Com a produção média de energia diária de cada módulo conhecida, determina-se o número de módulos necessários. Para isso é necessário conhecer a eficiência de carga das baterias que no caso de baterias chumbo-ácida está em torno de 80%.

Assim o número de módulos necessários para cobrir o consumo será:

$$N_p = \frac{Ah}{E_d \cdot \eta} \quad (4.3)$$

onde  $E_d$  é a energia média diária produzida pelo módulo (Equação 4.2)

$Ah$  é o consumo diário da instalação e  $\eta$  o rendimento de carga das baterias.

A partir da corrente média diária pode-se calcular a quantidade necessária de baterias, expressa em ampéres/hora. Geralmente elas devem ser capazes de garantir o consumo da instalação durante um determinado número de dias (5 a 10) [Castañer, 1985]

## **Capítulo 5**

### **Descrição do Projeto**

Para concretizar o objetivo deste estudo que é o de verificar o potencial fotovoltaico na RBPC, sendo potencial aquele definido no Capítulo 1, foi necessário escolher um perfil de consumo para as cargas a serem ligadas no sistema fotovoltaico. Dado que o objetivo não é o de caracterizar um possível mercado potencial para a energia solar fotovoltaica e sim o de aferir as condições reais de funcionamento de um sistema fotovoltaico autônomo, a escolha do perfil de consumo da instalação poderia ser uma residência, um posto de saúde, uma escola, uma estação de transmissão, etc.

Como a maioria dos sistemas fotovoltaicos autônomos empregados atualmente no Brasil são para o abastecimento de energia de residências em locais onde a extensão da rede de energia apresenta inconvenientes de ordem técnica e/ou econômica, optou-se então pelo perfil de consumo de uma residência de tal característica que servisse de base para um sistema que simulasse o comportamento diário de cargas típicas como iluminação, refrigerador e televisor.

O passo seguinte foi definir o tamanho da residência (número de cômodos). Partindo do consumo dessa residência e as cargas descritas anteriormente, foi feita uma redução de escala dessa instalação com o intuito de simular o consumo de energia elétrica

Segundo o IBGE, em um universo de mais de 12 milhões de domicílios pesquisados no Brasil em 1997, a maioria, 26,15%, constituem-se de domicílios com 5 cômodos [IBGE, 1997]. Supôs-se então uma residência de 5 cômodos: dois quartos, uma sala, uma cozinha e um banheiro, sendo instalado uma lâmpada fluorescente compacta de 15W em cada quarto e uma na sala, uma de 8W na cozinha e uma no banheiro. Além disso, que possua um refrigerador e um televisor.

Com o perfil de consumo dessas cargas a energia diária solicitada está na Tabela 15. O valor mensal de consumo é de aproximadamente 65 kWh. Ressalta-se que esta residência com este consumo não é característica da RBPC e foi tomada aqui apenas como carga para o sistema fotovoltaico a ser estudado.

Tabela 15 – Cargas da residência.

Equipamento	Potência (W)	Quantidade	Consumo horas/dia	Wh/dia
Lâmpada	15	3	5	225
Lâmpada	8	2	2	32
Televisor	60 <sup>1</sup>	1	4	240
Geladeira	119 <sup>2</sup>	1	24	1736
<b>TOTAL</b>				<b>2237</b>

Fonte: Especificações dos fabricantes. (1) potência televisor marca CCE 14" colorido. (2) Potência de um refrigerador R280 Electrolux.

Para suprir de energia essa residência através de um sistema fotovoltaico seria necessário um número elevado de módulos fotovoltaicos. Como mencionado anteriormente, adotou-se um fator de escala para reduzir a quantidade de módulos necessários, reduzindo-se a potência das cargas por 4 e obtendo-se os valores da Tabela 16.

Tabela 16 - Valores obtidos para os equipamentos da Tabela 15, após a aplicação do fator de redução.

Equipamento	Quantidade	Potência W	Funcionamento Horas/dia	Wh/dia
Lâmpada	01	15,1 (15)	6 (18h-24h)	90
"Televisor"	01	15 (15)	4 (19h-23h)	60
"Refrigerador"	01	17,5 (19)	24	240
<b>TOTAL</b>				<b>390</b>

Dessa forma, para efeito de simulação, as lâmpadas da residência foram concentradas em apenas uma lâmpada de 15 W/120V. Para simular o consumo do televisor, também foi utilizada uma lâmpada fluorescente compacta de 15 W/120V e o refrigerador, um ventilador de 19 W/120V (valores entre parênteses na Tabela 16).

### Iluminação

As lâmpadas normalmente usadas na iluminação residencial são incandescentes. Baseiam seu funcionamento na passagem de corrente através de um filamento de tungstênio levando-o à incandescência, produzindo uma luz similar à luz natural. Elas são de baixo custo, possuem um pobre rendimento lúmen por watt e pequena vida útil. Em um sistema fotovoltaico, onde se prima pelo uso racional dos equipamentos, evitando aqueles que tenham baixo rendimento, esse tipo de lâmpada não é aconselhável. Dessa forma, opta-se geralmente pela lâmpada fluorescente compacta. Funcionam pela passagem de corrente por um gás, produzindo luz invisível, que é transformada em visível ao passar pelo pó fluorescente que cobre o tubo da lâmpada. Seu rendimento é maior que as incandescentes (da ordem de 4 vezes) e também uma vida útil maior (cerca de 8 a 10 vezes) (Tabela 17). Seu investimento inicial, no entanto, é maior, o que provavelmente seja o maior entrave para sua ampla utilização. As lâmpadas utilizadas neste projeto foram do tipo fluorescente compacta.

Tabela 17 – Comparação entre lâmpadas fluorescentes compactas e incandescentes

Lâmpada	Vida útil* (horas)	Rendimento* (lumen/watt)	Preço** (R\$)
Incandescente	1.000	10 a 15	1,50
Fluorescente compacta	8.000	40 a 90	15,00-30,00

Fonte: (\*) Pompermayer, 2000. (\*\*) Preço médio de uma lâmpada de 15W fluorescente compacta e uma incandescente de 60W, equivalentes em luminosidade, em Campinas - Março/2000.

### Refrigeração

Os sistemas fotovoltaicos também destinam-se em parte à refrigeração. Em postos de saúde, por exemplo, localizados em pontos remotos, para estocagem de vacinas, os refrigeradores são necessários. Geralmente, quando destinam-se a esse fim, ou seja, para serem utilizados em sistemas fotovoltaicos, os refrigeradores são especialmente construídos, com uma isolamento térmica melhorada e são adaptados para funcionarem diretamente a tensão contínua de 12 ou 24V, evitando dessa forma o uso de inversores de frequência, diminuindo as perdas e os custos de instalação.

Os sistemas de refrigeração funcionam de maneira intermitente durante o dia e dependem de fatores como a temperatura ambiente onde está o aparelho, o número de vezes em que o refrigerador é aberto, a porcentagem de carregamento do mesmo, etc.

Em Lasnier [Lasnier, 1990] há uma caracterização de procedimento para simular as condições de funcionamento de um refrigerador. Neste trabalho, optou-se por uma carga com funcionamento intermitente durante o dia, aproximando-a da característica de um refrigerador no que tange ao consumo de energia.

Para simular o consumo do refrigerador, foi usado um ventilador-exaustor (usado normalmente na refrigeração de equipamentos acondicionados em painéis fechados). O ventilador possui um motor monofásico de indução com rotor em gaiola e estator com espira em curto, típico de aparelhos que necessitem um baixo torque de partida, pois estes partem sem carga.

No refrigerador comum, no entanto, o compressor parte com carga desenvolvendo um alto torque de partida que repercute na corrente de partida, e por conseguinte no sistema de armazenamento por baterias, caso o refrigerador seja do tipo C.C., conectado diretamente às baterias. As considerações da repercussão da corrente de partida sobre o comportamento dos acumuladores não foram levadas em conta neste trabalho, também porque o motor utilizado neste projeto é A.C. e está conectado ao inversor de frequência que suporta surtos de corrente de até 8 vezes sua corrente nominal (165A).

Para estimar-se o tempo médio que a carga “refrigerador” deve permanecer ligada durante cada hora, foi feita uma consulta em dados de consumo de alguns modelos de refrigeradores de duas marcas conhecidas no mercado. Os dados obtidos estão na Tabela 18.

Tabela 18– Tempos médios de funcionamento por hora de alguns modelos de refrigeradores.

Marca	Modelo	Volume interno (l)	Consumo energia (kWh/mês) <sup>1</sup>	Potência (W) <sup>2</sup>	Tempo médio de funcionamento por hora (min.) <sup>3</sup>
Consul	CRC23	229	35,7	74,6	39,9
	CRA30	293	28,5	74,6	31,8
	CRA34	344	35,5	125	23,7
Electrolux	R270Smile	270	26,9	100	22,4
	R280	281,5	52,1	119	36,5
	R310	319,9	39,9	118	28,2
	R340	340	52,3	125	34,8
				<b>Média</b>	<b>31</b>

Fonte: (1) Cepel, 1998. (2) Valores obtidos dos fabricantes. (3) Elaboração própria.

De acordo com a Tabela 18, o tempo médio de funcionamento dos refrigeradores é em média de meia hora por hora; assim a carga “refrigerador” foi modelada com o seguinte funcionamento a cada hora:

*“Refrigerador” ligado = 30 min.*

*“Refrigerador” desligado = 30 min.*

Desta forma a cada 24 horas o ventilador (“refrigerador”) funcionará 12 horas. Para acionar automaticamente essas três cargas foram utilizados 3 temporizadores motorizados. No Anexo 1 está o esquema multifilar do circuito de comando do sistema.

#### Curva de Carga

Finalmente o comportamento das cargas a serem acionadas deveriam ser caracterizadas pela sua curva de carga. O conhecimento da potência de cada carga e o comportamento das mesmas durante o dia são importantes para o dimensionamento do sistema fotovoltaico.

Em uma residência típica, a curva de carga tem pico de consumo após as seis horas da tarde devido ao aumento do uso de iluminação e o acionamento de chuveiros elétricos e outras cargas elétricas como televisores, aparelhos de som, etc.

Como exemplo ilustrativo, na vila rural de Campinas, situada no município de Manacapuru no Estado do Amazonas [Cartaxo, 1998], há um sistema de geração e distribuição de energia elétrica híbrido solar fotovoltaico/diesel operando das 6h às 24h do dia. A vila é composta essencialmente por residências, as quais apresentam uma curva de carga composta basicamente de iluminação e geração de frio (refrigeração). A Figura 5.1 mostra a curva de carga característica para as residências desta localidade.

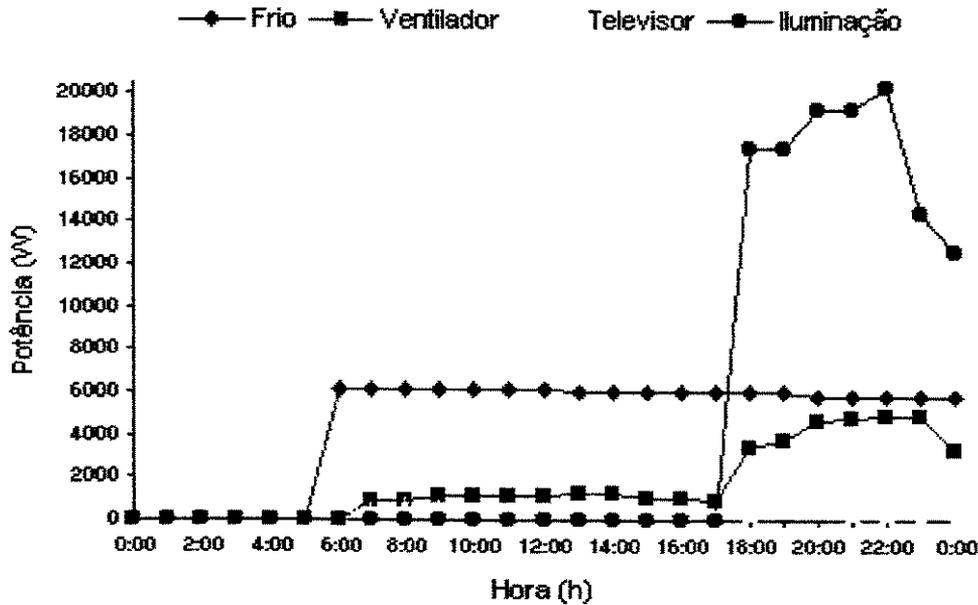


Figura 5.1 – Curva de carga característica das residências da vila rural de Campinas – AM. Fonte: Cartaxo, 1998.

De acordo com a Figura 5.1, nota-se que há um aumento de carga a partir das 18 horas, quando a claridade natural começa a desaparecer. Durante o dia há praticamente um consumo constante do sistema de refrigeração (geladeiras, freezers). Assim tomando por base o comportamento das cargas da Figura 5.1, a curva de carga do sistema aqui proposto fica de acordo com a Figura 5.2.

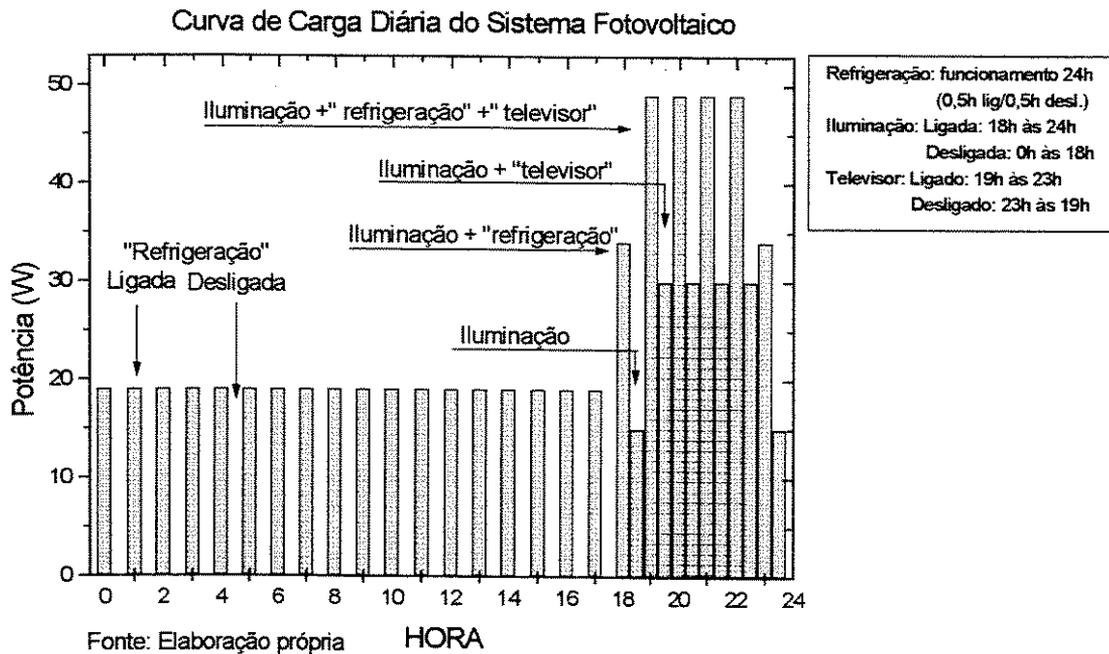


Figura 5.2. - Curva de carga diária do sistema fotovoltaico. As barras cheias representam carga ligada

Procurando-se facilitar a penetração da tecnologia fotovoltaica, optou-se pelo uso de um inversor de frequência, de forma que todas as cargas a serem acionadas sejam C.A. Para controlar a carga e descarga das baterias foi utilizado um controlador de carga. Também foi necessário conhecer o rendimento e o consumo dos diversos equipamentos que seriam utilizados na instalação, principalmente o inversor e as baterias. Tendo por base os rendimentos padrões de cada equipamento obtidos através de suas especificações técnicas, elaborou-se um esquema geral unifilar da instalação fotovoltaica, conforme a Fig. 5.3

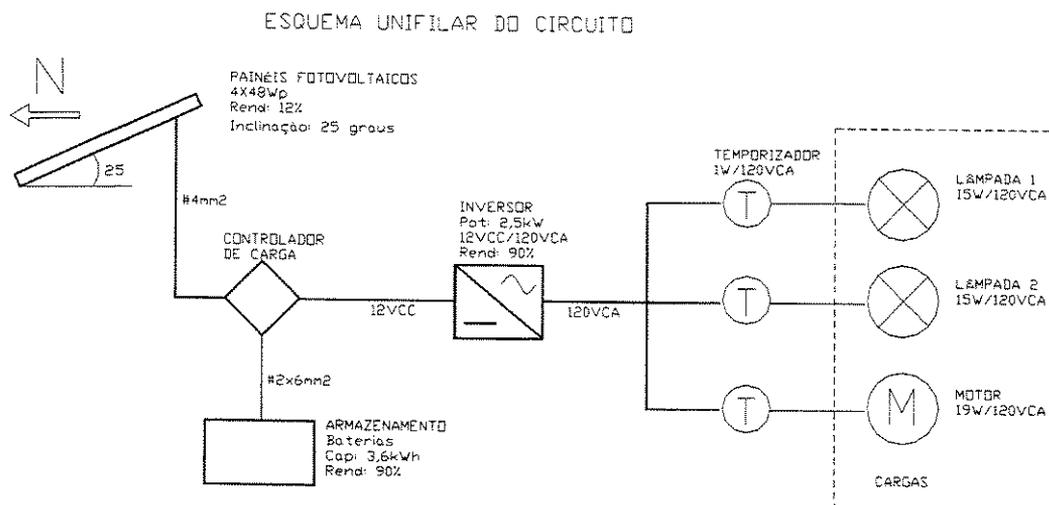


Figura 5.3- Esquema geral do sistema fotovoltaico mostrando o desempenho teórico de cada componente. Fonte: Catálogo dos respectivos fabricantes.

### 5.1. Dimensionamento do sistema fotovoltaico

De acordo com a Tabela 16, o consumo diário das cargas é de 390Wh. O consumo dos temporizadores perfaz  $72 \text{ Wh.dia}^{-1}$  ( $3 \times 1 \text{ W} \times 24 \text{ h} = 72 \text{ Wh}$ ). Assim:

Consumo das cargas:	390 Wh (77% do total)
Consumo dos temporizadores:	72 Wh (13% do total)
Consumo do inversor:	46 Wh (10% do total)
<b>TOTAL</b>	<b>510Wh.dia<sup>-1</sup></b>

Segundo a Tabela 12 a insolação média mensal em uma superfície horizontal em Campinas para o mês de menor insolação - Junho - é de  $3,42 \text{ kWh.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ .

Um dos critérios de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos fixos, ou seja, que não seguem o movimento do Sol nem durante o dia nem durante o ano, é otimizá-lo, ou seja, fazer

com que ele produza uma maior quantidade de energia durante o período de menor insolação no local. No hemisfério sul, isto acontece nos meses de Julho a Setembro (inverno).

Seguindo este critério, segundo os dados fornecidos pelo CRESESB (CRESESB, 1999), o valor de 25° de inclinação em relação à horizontal dos painéis fotovoltaicos para a cidade de Campinas, dá o maior ganho de energia para o mês de menor insolação, Junho. Aplicando o fator de correção para superfícies inclinadas a 25°,  $\overline{R_b}$ , de acordo com a Tabela 11, para o mês de Junho, tem-se:  $3,42 \times 1,35 = 4,62 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ .

O valor  $4,62 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  é tomado como 4,62 hora-pico, ou seja, o tempo médio diário em que o módulo fotovoltaico drena para o circuito sua corrente de carga. Para o painel M 75 da Siemens, o valor da corrente de carga é 3,02 A (STC). Assim a energia média diária fornecida pelo módulo será:

$$E_d = 4,62 \times 3,02 A \times 12V = 167Wh. \quad (5.1)$$

onde  $E_d$  é a energia diária produzida em Wh.

O número de módulos necessários, tomando uma eficiência de carga das baterias de 80% [Roberts, 1991], será

$$N_p = \frac{510Whdia^{-1}}{167Whdia \times 0,8} \cong 3,8 \quad (5.2)$$

Assim foram utilizados 4 módulos M 75, inclinados 25° para o Norte geográfico conectados em paralelo.

As baterias devem garantir o funcionamento do sistema fotovoltaico durante à noite e os dias de pouca insolação (dias nublados). O valor típico de dias sem insolação para regiões entre as latitudes 0° e 30° é de 5 dias [Roberts, 1991]

As baterias utilizadas são do tipo chumbo-ácida selada com capacidade de 100 Ah tensão de 12V e profundidade de descarga de 100%. Adotando-se uma descarga máxima de 70% para os cinco dias sem produção de energia pelos painéis, o número de baterias será:

$$N_b = \frac{42 \text{ Ah.dia}^{-1} \times 5 \text{ dias}}{100 \text{ Ah} \times 0,7} = 3 \quad (5.3)$$

O valor 42 Ah.dia<sup>-1</sup> é o consumo diário total das cargas. Assim foram instaladas 3 baterias chumbo-ácida selada de 12V/100Ah conectadas em paralelo.

O inversor utilizado deve ser capaz de fornecer a potência requerida pelo circuito que é de 58 W. Foi utilizado um inversor disponível de 2,5 kW, 12VCC/120VCA. Pode-se notar que o inversor está superdimensionado para o circuito pois o mesmo corresponde a 2,32% da potência nominal do inversor.

O controlador de carga utilizado também deve ser capaz de manejar as correntes de carga e descarga das baterias. De acordo com as especificações do fabricante do módulo fotovoltaico, devido a incertezas atmosféricas, deve-se usar um fator de 1,25 vezes a corrente de curto circuito do painel a fim de dimensionar componentes do sistema que utilizem essa especificação de corrente, como por exemplo, o controlador de carga. A corrente máxima que as baterias drenarão dos painéis fotovoltaicos é a corrente de curto circuito dos mesmos. Assim o controlador deverá ter uma corrente nominal igual ou superior a:

$$I_c \geq I_{sc} \times 1,25 \times 3,25 \times 4 = 16,25 \text{ A} \quad (5.4)$$

Onde  $I_c$  é a corrente nominal do controlador de carga e  $I_{sc}$  a corrente de curto circuito do painel: 3,25 A para o painel M75. Foi utilizado um controlador de carga com corrente de carga de 30 A.

Para monitorar o funcionamento do sistema foi instalado um aparelho de aquisição de dados (Logger) o qual registra os dados coletados diariamente em intervalos de 15 minutos da energia produzida pelos painéis e a tensão do banco de baterias.

## 5.2. Montagem do sistema

Com exceção dos módulos fotovoltaicos e o conjunto de baterias, todos os demais equipamentos foram acondicionados em um painel metálico com 1000 x 500 x 500 mm de altura, largura e profundidade respectivamente (Figura 5.6). Possui uma porta frontal com dois fechos

simples. Instalado na porta do painel estão um voltímetro e um amperímetro analógicos com função de monitorar a tensão do banco de baterias e a corrente de carga do mesmo respectivamente. Esse painel foi fixado em uma parede interna de alvenaria do terraço do prédio H da Faculdade de Engenharia Mecânica com chumbadores  $\varnothing 10\text{mm}^2$ . Os módulos fotovoltaicos foram colocados a uma distância de 8 m do conjunto painel + baterias, conectados por dois cabos  $2 \times 4 \text{ mm}^2$  em paralelo.

A Figura 5.5 apresenta *layout* interno do painel, mostrando a disposição geral dos componentes e as ligações elétricas. Os módulos fotovoltaicos, instalados também no terraço do prédio H, podem ser observados nas Figuras 5.7 e 5.8.

# ESQUEMA GERAL

Painéis Fotovoltaicos

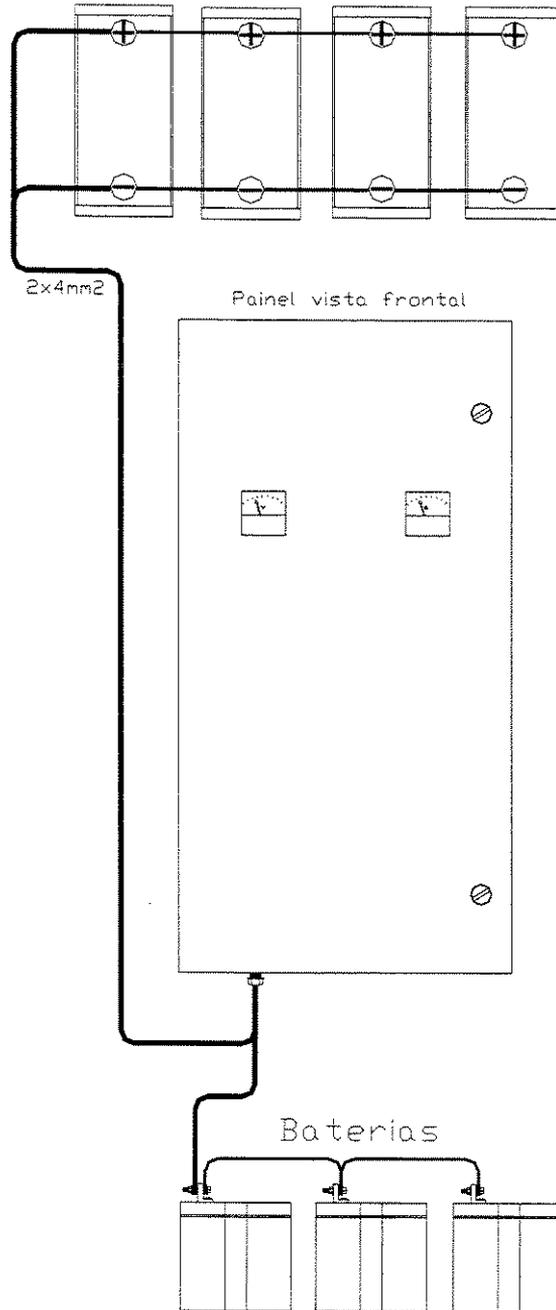


Figura 6.1 Esquema geral  
Escala: s/e

Figura 5.4 – Esquema geral da instalação fotovoltaica

# Painel Vista interna

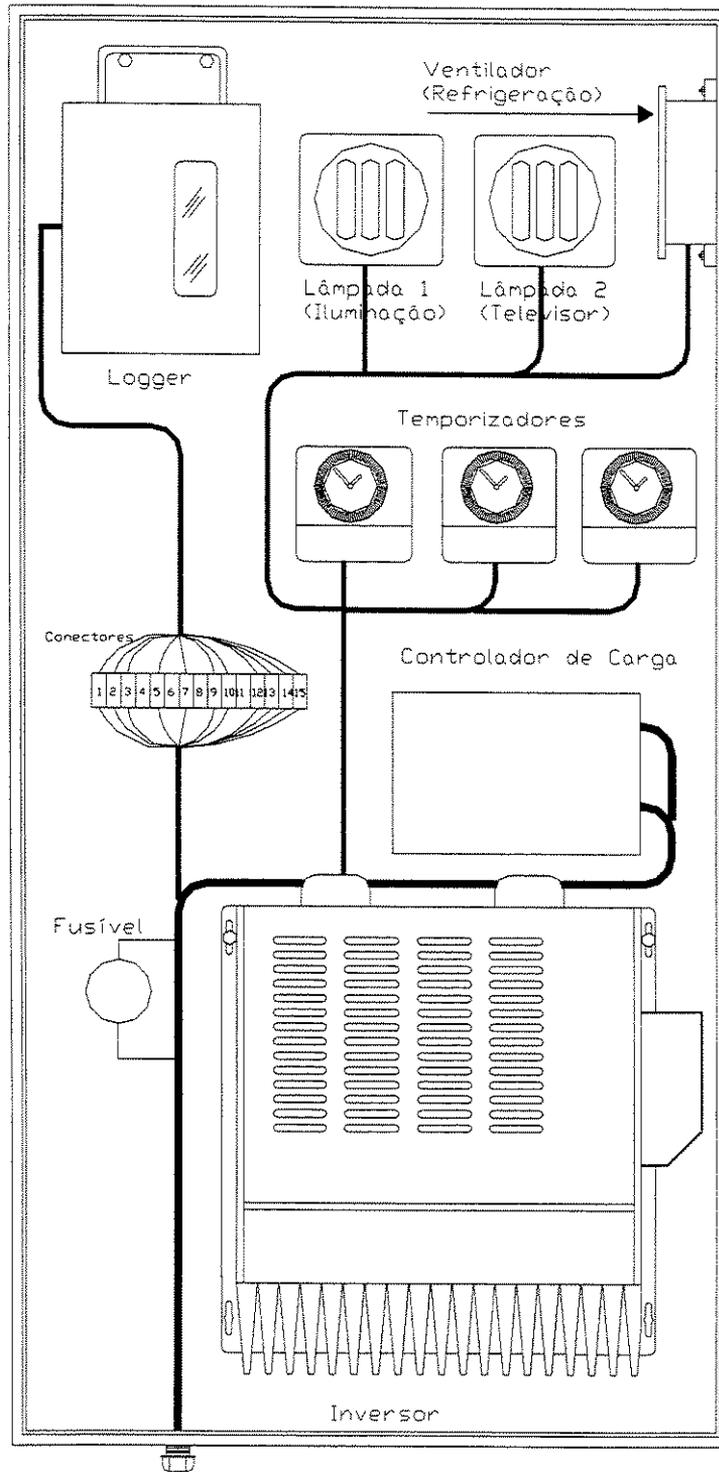


Figura 5.5 – *Layout* interno do painel, mostrando a disposição geral dos componentes

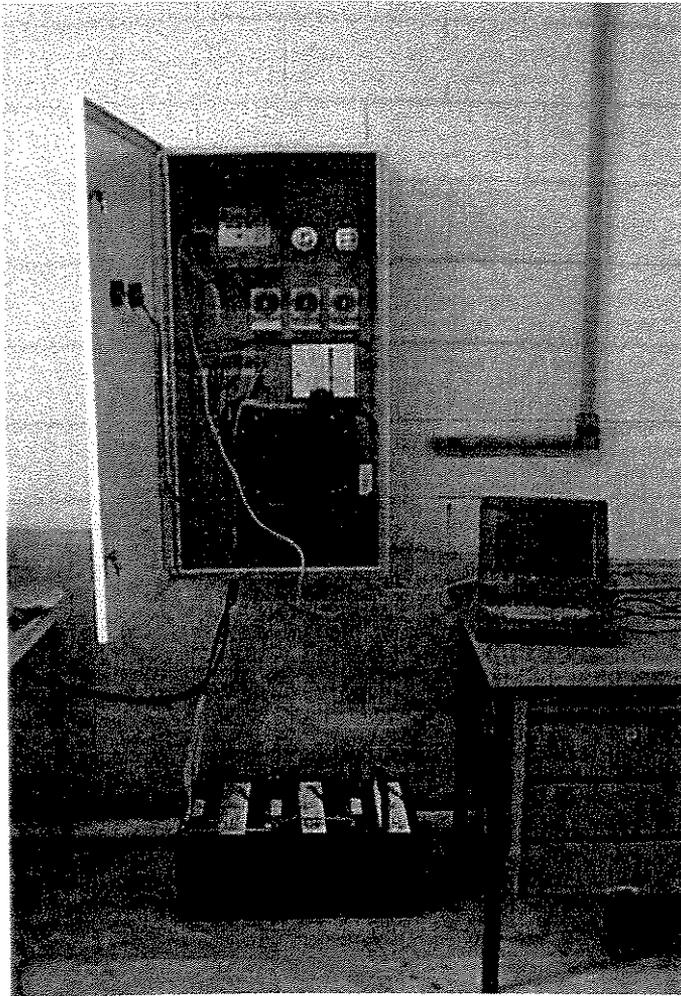


Figura 5.6 – Foto mostra o painel e os componentes internos, o conjunto de baterias, computador portátil (notebook) utilizado para coleta dos dados do Logger.

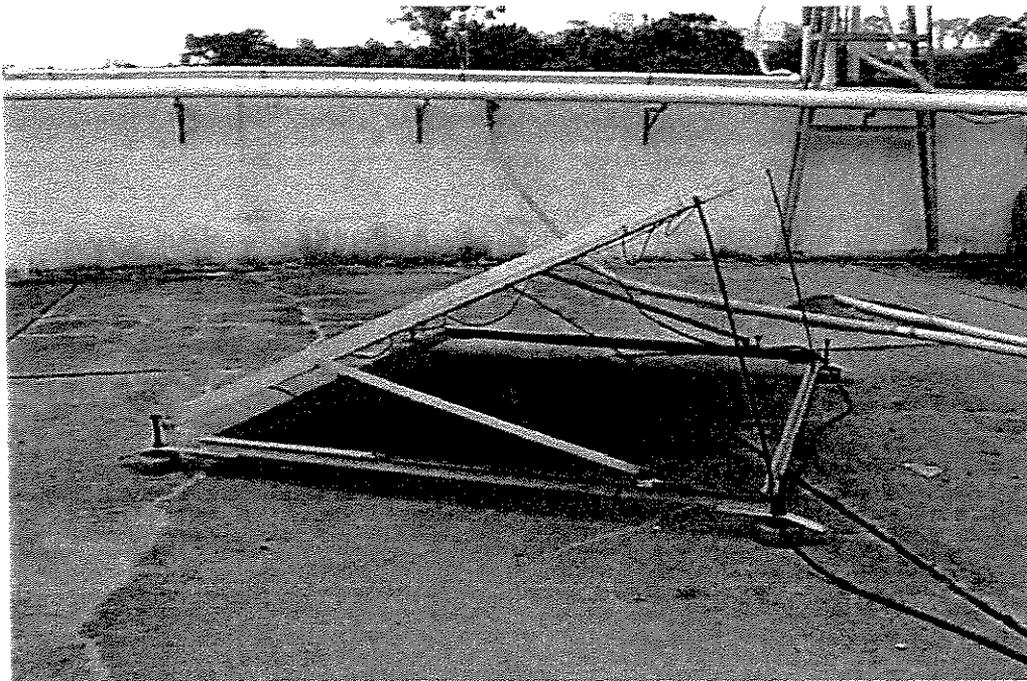


Figura 5.7 – Foto do suporte dos módulos fotovoltaicos inclinado de  $25^\circ$  em relação a horizontal e com a face dos mesmos voltada para o norte geográfico.

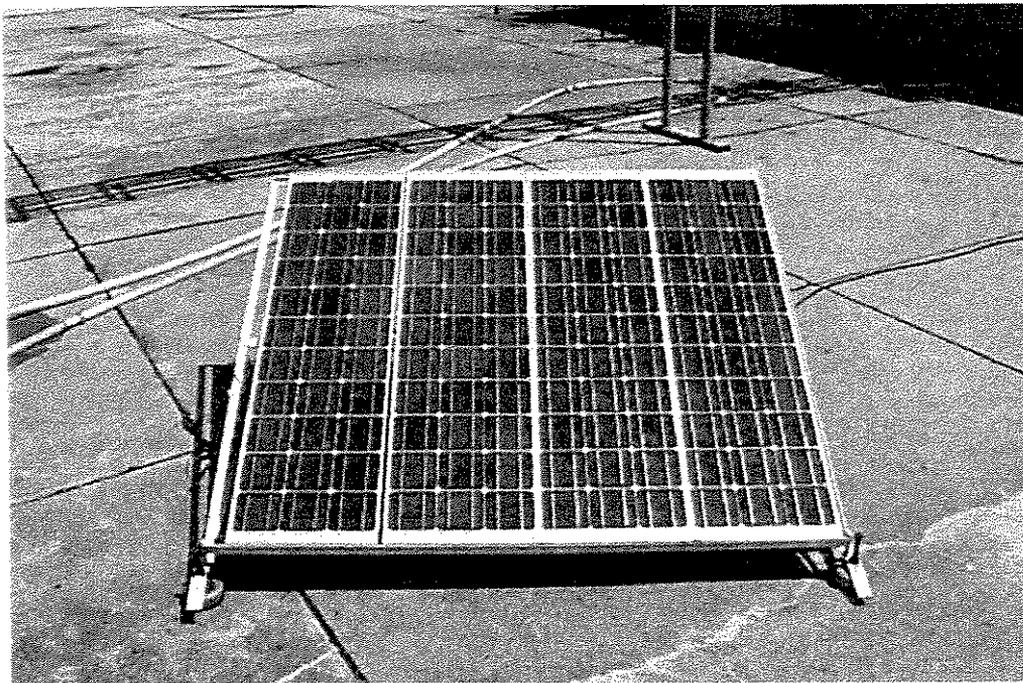


Figura 5.8 – Vista frontal dos 4 módulos fotovoltaicos.

### 5.3 Equipamentos Utilizados no Projeto

- 1) *Módulos Fotovoltaicos*: 4 módulos fotovoltaicos, da marca Siemens modelo SM75 de 48Wp a 1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C, AM 1,5. Foram montados em um suporte regulável para diversos ângulos de inclinação  $\beta$  (Figura 5.7).
- 2) *Inversor de Freqüência*: da marca Trace Engineering com potência de 2,5 kW, tensão de entrada 12 VCC e saída de 120VCA e rendimento de 90%.
- 3) *Acumuladores (Baterias)*: 3 do tipo chumbo-ácida seladas da marca Dynasty de 100Ah/12V cada.
- 4) *Sistema de aquisição de dados*: 1 aparelho Energy Logger da marca Pacific Science and Technology.
- 5) *Controlador de Carga*: 1 controlador de carga da marca TRACE Engineering 12V/30A.
- 6) *Temporizadores*: 3 da marca COEL tipo RTM eletromecânico 24 horas.
- 7) *Lâmpadas*: 2 tipo fluorescente compacta marca GE de 15W/120VCA cada.
- 8) *Ventilador*: 1 tipo exaustor monofásico de 19W/120VCA.
- 9) Suporte regulável para os painéis fotovoltaicos.
- 10) Painel metálico 1000 x 500 x 500 mm. Fios e cabos elétricos.

## **Capítulo 6**

### **Apresentação e Análise dos Resultados Obtidos**

Os dados apresentados a seguir são os valores de energia obtidos para o meses compreendidos entre Julho de 1999 e Maio de 2000. A energia produzida é aquela obtida na saída dos módulos fotovoltaicos e energia consumida aquela utilizada pelas cargas. Os próximos gráficos (Figura 6.1 a 6.11) mostram a energia diária produzida pelo sistema e o consumo das cargas. A Figura 6.12 mostra o gráfico da energia média diária produzida em cada mês por um módulo fotovoltaico. Os valores diários foram obtidos a partir da integração da potência instantânea medida a intervalos de 15 minutos pelo aparelho de aquisição de dados (Logger).

Os dados numéricos estão apresentados no Anexo 2.

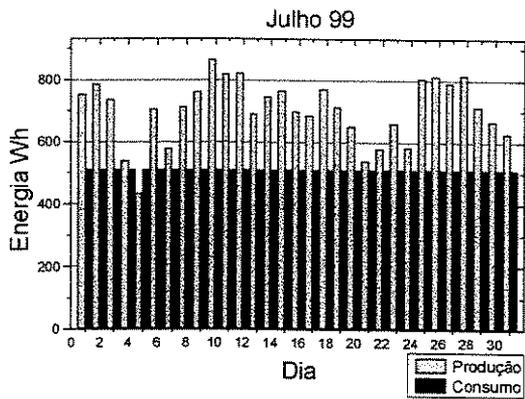


Figura 6.1 – Produção e consumo do sistema para o mês de Julho de 1999.

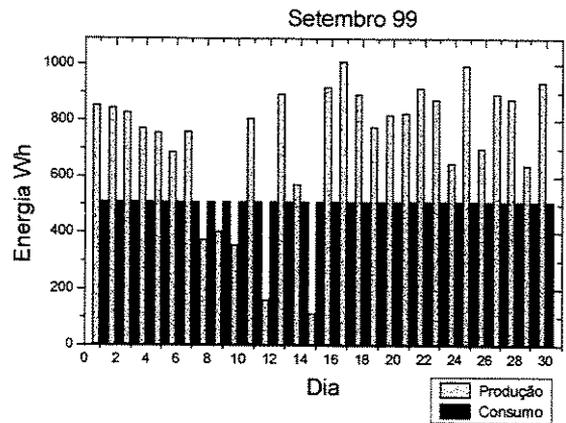


Figura 6.3 – Produção e consumo do sistema para o mês de Setembro de 1999.

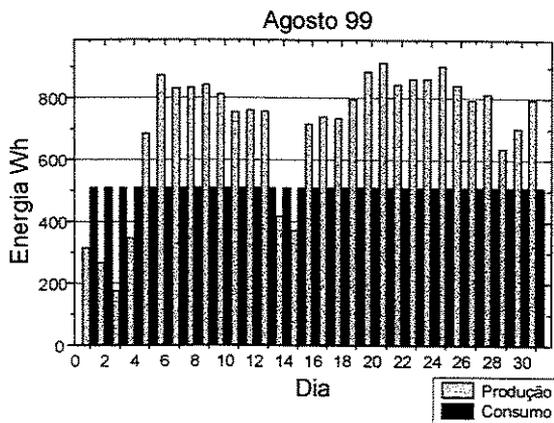


Figura 6.2 – Produção e consumo do sistema para o mês de Agosto de 1999.

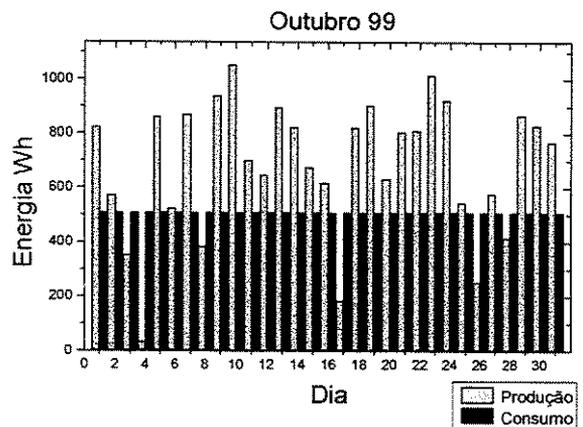


Figura 6.4 – Produção e consumo do sistema para o mês de Outubro de 1999.

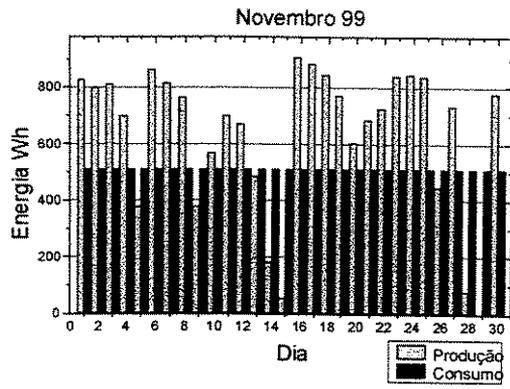


Figura 6.5 – Produção e consumo do sistema para o mês de Novembro de 1999.

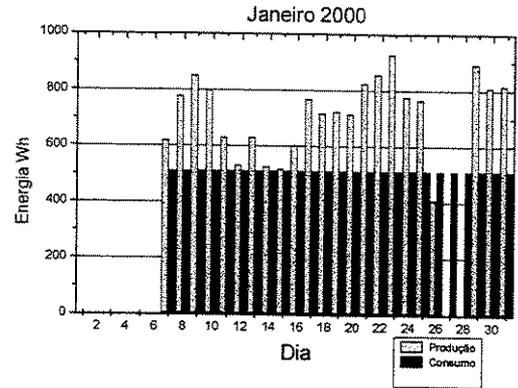


Figura 6.7 – Produção e consumo do sistema para o mês de Janeiro de 2000.

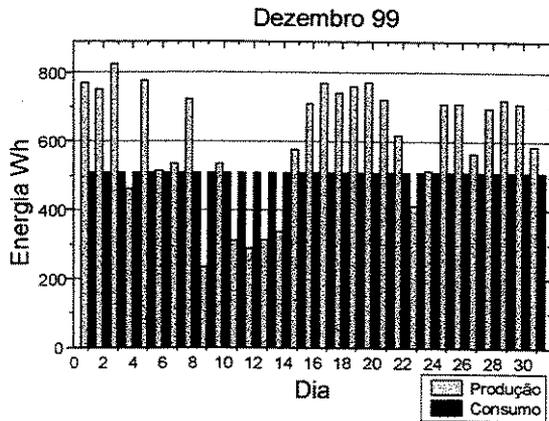


Figura 6.6 – Produção e consumo do sistema para o mês de Dezembro de 1999.

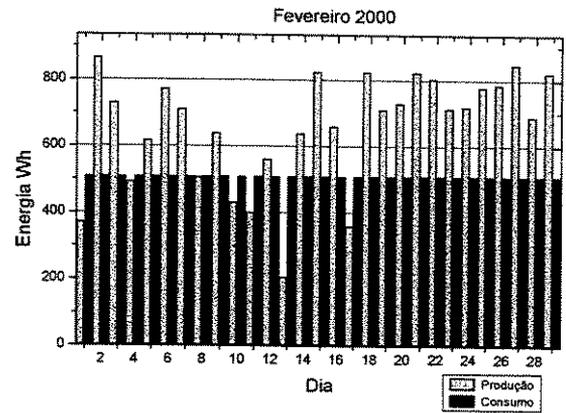


Figura 6.8 – Produção e consumo do sistema para o mês de Fevereiro de 2000.

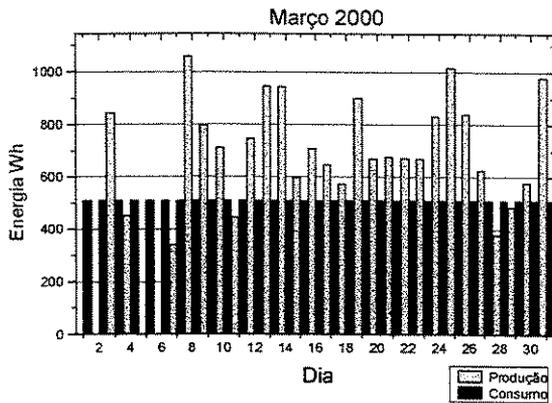


Figura 6.9 – Produção e consumo do sistema para o mês de Março de 2000.

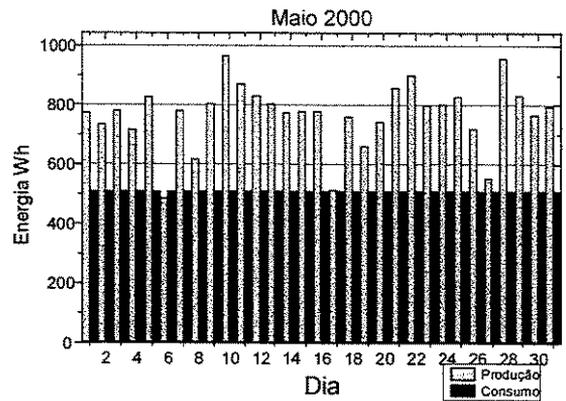


Figura 6.11– Produção e consumo do sistema para o mês de Maio de 2000.

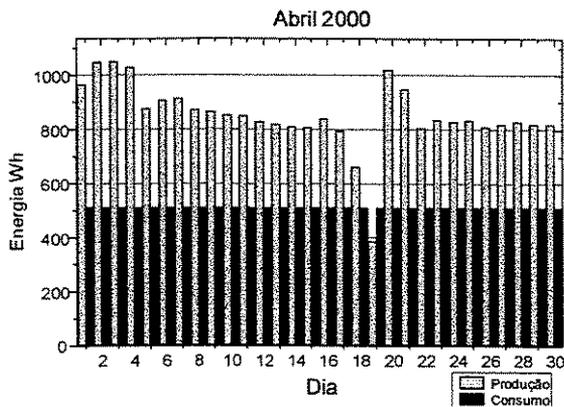


Figura 6.10 – Produção e consumo do sistema para o mês de Abril de 2000.

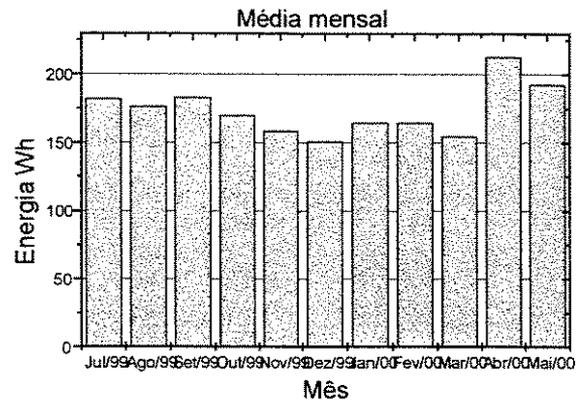


Figura 6.12 – Energia média diária produzida por um módulo fotovoltaico M75 de 48 Wp para a cidade de Campinas.

Nos gráficos 6.1 a 6.11, que mostram a produção e o consumo do sistema fotovoltaico, nota-se que houve uma produção em média de 25% superior ao consumo. Isso deve-se à eficiência de carga de 80% das baterias adotada no dimensionamento (fórmula 5.3), pois o sistema foi dimensionado considerando uma perda de 20% no carregamento das mesmas. A faixa sobre a qual a eficiência energética da bateria varia nas condições de funcionamento do sistema é

extremamente ampla. Por essa razão as eficiências de carga das baterias tomadas por curto período de tempo não são significativas, e num período de um ano podem variar entre 62% e 94% [Munro, 1995] . Outro fator que contribuiu para uma maior produção de energia do sistema fotovoltaico foi valor obtido no dimensionamento da quantidade de módulos necessários (fórmula 5.2) que foi de 3,8 módulos, e foram instalados 4, que corresponde a um acréscimo de 5% na energia produzida.

O rendimento médio diário de conversão fotovoltaica dos módulos foi calculado de acordo com a fórmula 2.2. Este valor ficou em 10,2%. A eficiência teórica dos módulos segundo o fabricante é de 12%, que significa um rendimento nas condições práticas de 85% do rendimento teórico. Este valor pode ter uma pequena variação pois a medida da radiação incidente é feita por um aparelho localizado na estação de medição da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp, distante aproximadamente 1000 m do local da montagem do experimento.

Os quatro módulos fotovoltaicos de 48 Wp cada, produziram nestes 11 meses, o total de 229,1 kWh, ou 57,27 kWh por módulo e média diária de 173,5 Wh (Figura 6.12). A energia produzida total por metro quadrado foi de 146,8 kWh. Tomando a média mensal desses 11 meses de 21 kWh (Tabela 19), a produção anual ficaria em 252 kWhm<sup>-2</sup>, significando 2470 kWhm<sup>-2</sup> de radiação total no ano com a eficiência média de conversão fotovoltaica de 10,2 %. O valor de 2500 kWhm<sup>-2</sup> é superior àquele previsto pela CESP para a região da RBPC de 1.830 kWhm<sup>-2</sup> [CESP, 1985].

De uma maneira geral, os meses de inverno na RBPC são caracterizados por baixa precipitação pluviométrica (período seco). Isso explica a produção de energia do sistema fotovoltaico com poucos dias de baixa insolação nos meses de Julho e Agosto de 1999 (Fig. 6.1 e 6.2), contribuindo para que o mês de Julho fosse um dos de maior produção no período analisado (Tabela 19). Nesse mesmo período não foram registrados cinco dias consecutivos nublados. Houve apenas um período de quatro dias consecutivos de baixa insolação em Dezembro de 1999, que coincide com o início do período de chuvas na RBPC.

Os valores médios de rendimento da conversão fotovoltaica obtidos na Tabela 19 não tiveram variação significativa. Esse rendimento está muito associado à temperatura ambiente onde estão situados os módulos fotovoltaicos. A temperatura média da cidade de Campinas, situada na RBPC, não varia significativamente entre o verão e o inverno (Anexo 3), o que explica

a pouca variação observada. Para a determinação precisa do rendimento dos módulos fotovoltaicos seria necessário a localização mais próxima possível do aparelho de medição (piranômetro) e inclinado do mesmo valor que os módulos fotovoltaicos ( ângulo  $\beta$ ) bem como a instalação de um sensor de temperatura para medir a temperatura do módulo.

Tabela 19 – Valores obtidos do sistema fotovoltaico ente Julho 1999 – Maio 2000

<b>MÊS</b>	<b>Produção total (kWh)</b>	<b>Consumo Total (kWh)</b>	<b>Produção média diária/ módulo (Wh)</b>	<b>Horas de pico</b>	<b>Rendimento médio (%)</b>
JUL 99	22,5	15,8	181,2	3,77	10,4
AGO 99	21,9	15,8	176,7	3,68	9,9
SET 99	21,9	15,3	182,7	3,81	10,2
OUT 99	21,1	15,8	170,5	3,55	10,4
NOV 99	19,0	15,3	158,1	3,29	11,6
DEZ 99	18,8	15,8	150,7	3,14	10,5
JAN 00	16,5	12,7	164,7	3,42	9,5
FEV 00	19,7	14,8	164,2	3,42	10,1
MAR 00	19,1	15,8	154,4	3,21	8,8
ABR 00	25,5	15,3	213	4,44	10,4
MAI 00	23,8	15,8	192,3	4,00	10,2
<b>Média</b>	<b>21 ±3</b>	<b>15,3 ±0,9</b>	<b>173 ± 18</b>	<b>3,6 ± 0,4</b>	<b>10,2 ±0,7</b>

Fonte: Elaboração própria.

A potência nominal do módulo fotovoltaico fornecida pelo fabricante é aquela obtida em condições de teste (STC) e corresponde à máxima potência do módulo sob uma radiação de  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ . Uma relação útil para fins de dimensionamento de um sistema fotovoltaico para a região seria a relação watt pico do módulo pela energia produzida efetivamente em cada mês para uma residência situada na RBPC . Ela pode ser calculada tomando-se a energia média mensal produzida pelo módulo em Wh pela sua potência de pico, de modo a obter as horas equivalentes de acordo com a Figura 4.1. Assim para o módulo M75 de 48 Wp de potência utilizado neste projeto a relação para cada mês é o da Tabela 19.

Este valor em horas de pico pode ser tomado para dimensionar a quantidade de módulos necessários para a produção de determinada quantidade de energia para uma residência na RBPC, conhecendo-se a potência do módulo.

Os dados de radiação total fornecidos pelo Cepagri para o período de Julho de 1999 a Maio de 2000 foram comparados com os dados trabalhados para os anos de 1997/1998 fornecidos pelo mesmo centro e os dados da série histórica da CESP. O gráfico da Figura 6.13 mostra esta comparação. Nela pode-se notar que a diferença entre o valor recebido para o período da realização do experimento e o valor da CESP é menor do que para os dados trabalhados para 1997/1998, que serviram de base para o dimensionamento fotovoltaico. Disso depreende-se que os valores medidos para o período de realização do experimento é mais próximo da série histórica de radiação da CESP.

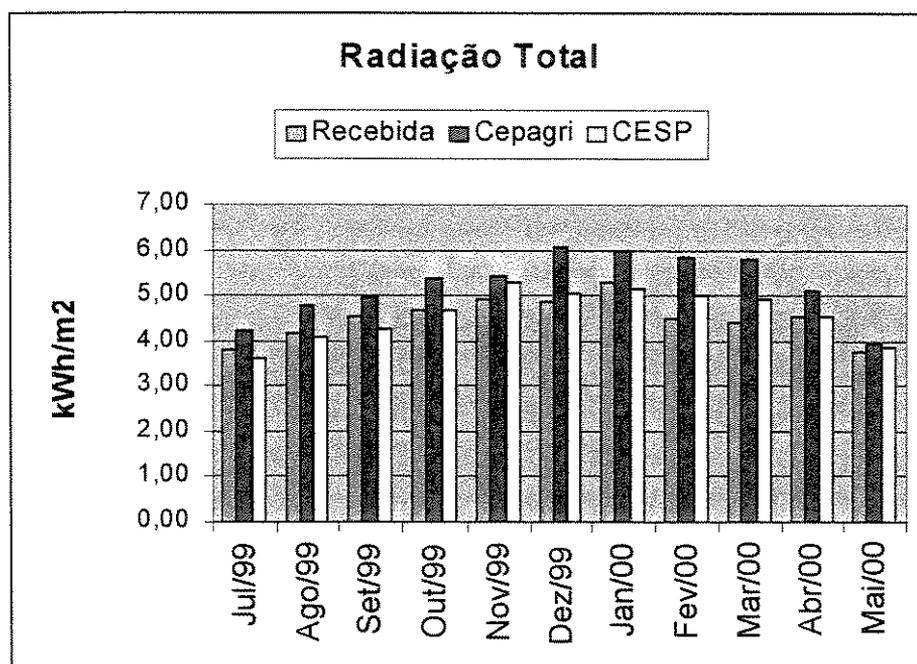


Figura 6.13 – Comparação da radiação recebida durante o tempo de funcionamento do experimento e a radiação do Cepagri e CESP.

### 6.1 Comportamento dos componentes do sistema fotovoltaico

*Módulos fotovoltaicos:* Os módulos fotovoltaicos não apresentaram problemas de funcionamento e também exigiram muito pouca manutenção. Nenhuma ocorrência de precipitação de granizo foi verificada no período e a RBPC não registra precipitação de neve o

que poderiam ser fatores para interferir no funcionamento dos mesmos. O local de instalação dos mesmos propiciou pequena acumulação de pó que era removido periodicamente (a cada 3 meses aproximadamente).

*Acumuladores:* Os acumuladores utilizados foram baterias seladas, ou seja, livre de manutenção. Uma das baterias do banco apresentou defeito no período de Janeiro a Fevereiro de 2000. Ela não absorvia carga suficiente durante o período diurno e no período noturno drenava corrente das outras duas baterias, fazendo todo o banco de baterias atingir um baixo nível de carga, e atuar os dispositivos de proteção do inversor de frequência. Foi feita a troca desta bateria e o problema foi solucionado. Esse problema no sistema acarretou a falta de dados para os primeiros dias de Janeiro de 2000, conforme constata-se na Figura 6.7.

*Inversor de frequência:* O desempenho do inversor não apresentou problemas durante a realização do experimento. O rendimento de conversão do inversor situou-se em 92%, dentro do valor teórico fornecido pelo fabricante que é de 90%.

Os demais componentes eletrônicos também não apresentaram problemas, inclusive as cargas e o aparelho de aquisição de dados (Logger).

## Capítulo 7

### Conclusões

O rendimento da conversão fotovoltaica do sistema ficou em 85% do valor nominal dos módulos fornecido pelo fabricante. A média diária de produção do módulo fotovoltaico M75 de 48 Wp no período foi de 173 Wh. O valor médio de horas de pico da radiação recebida neste período foi de 3,5. Assim a potência média de pico obtida do painel foi de 38,5 Wp ou 80% de sua potência máxima

Para a escolha do valor da radiação para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico localizado no hemisfério sul do planeta é utilizado os dados de radiação dos meses de inverno nesta parte do globo. Isso é o que foi feito, utilizando os dados de radiação para o mês de Junho, o mês de menor insolação. No entanto, especificamente para a RBPC, verificou-se que apesar da incidência de radiação ser maior nos meses de verão – Janeiro, Fevereiro e Março – a produção de energia pelo sistema fotovoltaico foi menor, devido ao período de chuvas na RBPC.

O número de cinco dias nublados é um valor mínimo típico da literatura de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para prever a quantidade de acumuladores que será necessária para o sistema suprir a carga no caso de ausência de radiação solar. Na RBPC, no entanto, este valor foi além do necessário, durante o período de duração do experimento, pois não

houve um período consecutivo nublado superior a 4 dias. Assim o valor de 5 dias se adequou à situação encontrada na RBPC. Um número maior de anos de funcionamento do experimento daria uma idéia melhor desse valor.

De uma maneira geral a RBPC possui muito boas condições para utilização da energia solar fotovoltaica, principalmente pela quantidade de radiação solar que atinge a região, pelo menos é o que foi verificado no período de realização do experimento. A incidência de radiação menor no inverno devido à inclinação do planeta em relação ao Sol é compensada pelo número muito baixo de dias com chuva e conseqüentemente nublados (Anexo 3). O número de dias nublados consecutivos também constatado foi baixo, permitindo que o sistema fotovoltaico prescindia de um elevado número de acumuladores.

### **7.1 Recomendações para estudos futuros**

Considerando que esta dissertação poderá evoluir para futuros estudos, são tecidas aqui algumas recomendações que melhorarão as condições para o levantamento do potencial fotovoltaico da RBPC.

Quanto mais tempo um sistema estiver em funcionamento, melhores as condições para se auferir suas características de funcionamento. Isto é especialmente válido para um sistema fotovoltaico, pois trabalha diretamente com variáveis climáticas. Assim um número maior de anos de funcionamento da instalação daria melhor visão do comportamento meteorológico da RBPC e sua influência direta sobre o sistema fotovoltaico.

As condições reais de variação de carga em uma residência poderiam ser simuladas, tentando aproximar o comportamento das cargas ao caso real. Uma carga modelada para simular o funcionamento de um refrigerador, ou até mesmo um aparelho real, daria uma melhor noção do desempenho dele e sua atuação sobre o sistema fotovoltaico, principalmente no sistema de armazenamento de energia.

O valor da energia convertida pelos módulos também é influenciado pelo ângulo de inclinação dos painéis. Promover a variação do ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos, de modo a encontrar um valor ótimo de inclinação para a RBPC seria interessante. Também a

possibilidade de um arranjo fotovoltaico onde os módulos pudessem seguir a orientação do Sol, traria ganho para a produção de energia do sistema fotovoltaico.

O desempenho efetivo do módulo durante o experimento poderia também ser melhor avaliado colocando-se junto aos painéis fotovoltaicos um piranômetro e um sensor de temperatura para medir efetivamente e com precisão o valor do rendimento do módulo fotovoltaico.

## Referências Bibliográficas

- ABT, C. C. **The future of energy, from the perspective of the social sciences.** Cambridge Massachussets, EUA, 1999 Referência disponível na internet: <http://wire.ises.org/entry.nsf/E?Open&persp&242CC43B048647A8C12567F2005173E2>
- BRASIL ENERGIA Foco da Shell em energia renovável. Revista Brasil Energia nº 233, Abril 2000. p. 86.
- BRÜSEKE, F. J., O problema do desenvolvimento sustentável. In: CAVALCANTI, C. **Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável.** São Paulo: Cortez, 1995. p. 29-40.
- CARTAXO, E. F., JANNUZZI, G. M. Considerações sobre a utilização eficiente de um sistema solar de energia elétrica. In: ENCONTRO DO FÓRUM PERMANENTE DE ENERGIA RENOVÁVEIS, 4, 1998, Recife: **Anais...**
- CASTAÑER, L., MAS, A. **Consideraciones sobre el diseño de sistemas fotovoltaicos.** Energia Solar Fotovoltaica. Série Mundo Electrónico Barcelona: Marcombo Boixareu Editores. 1985. p. 158 – 162.

- CAVALIERO, C. K. N., **Redução das emissões de CO<sub>2</sub> do segmento siderúrgico nacional e do Estado de São Paulo através da injeção de combustível auxiliar em alto forno: estudos de caso na ACESITA e COSIPA.** Campinas: FEM, UNICAMP, 1998. Dissertação - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. p. 7-12.
- CEPEL Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. Valores de consumo em kWh/mês para refrigeradores de uma porta. 1998. Referência disponível na Internet: <http://www.eletronbras.gov.br/procel/Consumo/consumo1.htm>
- CESP Balanço Energético do Estado de São Paulo - 1982 e 1983. Conselho Estadual de Energia/CESP, São Paulo, SP, 1985.
- COFFARI, E. **The Sun and the Celestial Vault**, Cap.2 em A.A.M. Sayigh (ed.), Solar Engineering, Academy Press, New York, 1977.
- CRESESB (1999) Dados de radiação fornecido pelo programa SUNDATA V1.0. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB. Referência disponível na Internet: <http://www.cepel.br/cgi-bin/sundatn>
- DINIZ, A. S. C. **Manual de treinamento em energia solar fotovoltaica.** CEMIG, 1999.
- FERREIRA, M. J. G., CAMPOS U. S., Instalações fotovoltaicas do PRODEEM - São Paulo e uma proposta de organização regional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 8, 1999, Rio de Janeiro: **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, 1999. v. 1, p. 1372-1380.
- FOLHA DE SÃO PAULO (2000) **Mudanças climáticas e ética são o maior desafio.** São Paulo, 28 jan. 2000. Folha Dinheiro. p. 2-1.
- FOLHA DE SÃO PAULO (2000) **Limpeza leva 10 anos na baía da Guanabara.** São Paulo, 28/01/2000, p. 3-7.
- FOLHA DE SÃO PAULO (2000) **Gás pode aumentar no lugar da gasolina.** São Paulo, 11 mar. 2000. Folha Dinheiro, p 2-1.

- GOUVELLO, C., POPPE, M. Study of the Photovoltaic Market for Rural Electrification in Northeastern Brazil (States of Bahia, Ceará and Minas Gerais). Final Report for THE WORLD BANK. World Business, Inc. Washington, DC. Julho, 1997.
- GUTMAM, J. (1998) **Emissões de Gases de Efeito Estufa no Setor Siderúrgico no Período 1980-1995 e Cenários Futuros**. Rio de Janeiro: PPE, COPPE/UFRJ, 1998. Dissertação (Mestrado) – Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998. p. 1-9, 65-84.
- HOWELL, J. R., BANNEROT, R. B., VLIET, G. C., **Solar-Thermal Energy Systems - Analysis and Design**. New York: McGraw-Hill, 1982.
- IBGE. Domicílio por área pesquisada, segundo algumas características dos domicílios. Out. de 1995 – set. 1996. Anuário estatístico do Brasil 1997. vol. 57. p. 2-228.
- JANNUZZI, G. M. et al. Uso eficiente de energia e desenvolvimento regional. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Relatório final. 1995
- JOHANSSON, T. B., KELLY, H., REDDY, A. K. N., WILLIAMS, R. H., **Renewable Energy - Sources for Fuels and Electricity**. London: Earthscan Publications Ltd., 1991.
- KELLY, H., JOHANSSON, T.B., REDDY, A. K. N., WILLIAMS, R. H. **Renewable energy: sources for fuels and electricity**. USA, Island Press. 1993. Cap 6: Introduction to photovoltaic technology. P. 298-336.
- KLEIN, S.A. **Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces**, Solar Energy, v.19, n. 4, p. 325-329 - 1977.
- LASNIER, F., ANG, T.G. **Photovoltaic Engineering Handbook**. Inglaterra: Adam Hilger, 1990. 548 p.
- LIU B.Y.H., JORDAN, R. C., The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation. **Solar Energy**, v. 4, n. 3, pp. 1-19, 1960.
- MACEDO, I. C., MACIEL T. T., Radiação solar no Estado de São Paulo. Relatório de contrato CESP/UNICAMP n° 1030/09-8-78. São Paulo –SP 1981. 67 p.

- MUNRO, D. K., HACKER, R. J., BLAESSER, G., RIESCH, G. **The long term performance of PV systems and components.** In: Solar World Congress, 1995. Referência disponível na internet: <http://wire.ises.org/entry.nsf/E?Open&charare&984E10349FD980D6C12565990051BB04>
- NEW YORK TIMES (2000) **German to end nuclear power use.** Nova York, 15/06/2000. Referência disponível na internet: <http://www.nytimes.com>
- OLIVEIRA S. H. F., ZILLES R. Pequenos geradores fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de eletricidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 3, 1998, São Paulo: **Anais...**
- OSWALD, G. J. The PV Industry moving into the “Solar Century”. In: Second World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1998, Viena, Áustria. Referência disponível na Internet <http://www.siemenssolar.com/0001.htm>
- PAGE J.K., The Estimate of Monthly Mean Values of Daily Total Short Wave Radiation on Vertical and Inclined Surfaces from Sunshine Records for Latitudes 40°N to 40°S, paper n° 35/05/98, In: CONFERENCE ON NEW SOURCES OF ENERGY, Roma: **Anais...** 1962.
- POMPERMAYER, M. L. **Gerenciamento da demanda residencial de eletricidade: o caso de centros urbanos da Região Amazônica.** Campinas: FEM, UNICAMP, 2000. Tese - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. p. 199, 214.
- RIBEIRO, C. M., LIMA, J.H.G., PEREIRA, O. L. S., DINIZ, A. S. A. C., BERTO, L. C., Tecnologia fotovoltaica: uma alternativa real para eletrificação rural no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 8, 1999, Rio de Janeiro: **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, 1999. v. 1, p. 1501-1525.
- ROBERTS, S. **Solar Electricity.** Londres: Prentice Hall, 1991. 434 p.
- ROCHA, P. SZWARCFITER, L., FREITAS, M. A. V. Geração fotovoltaica de eletricidade no contexto de taxaço sobre emissões de carbono: um estudo de viabilidade. In: Encontro do Fórum de Energia Renováveis, 3, 1999. CD ANEEL

RÜTHER, R. Panorama atual da utilização da energia solar fotovoltaica e trabalho do Labsolar nesta área. Laboratório de Energia Solar. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1998. Referência disponível na Internet <http://www.labsolar.ufsc.br>

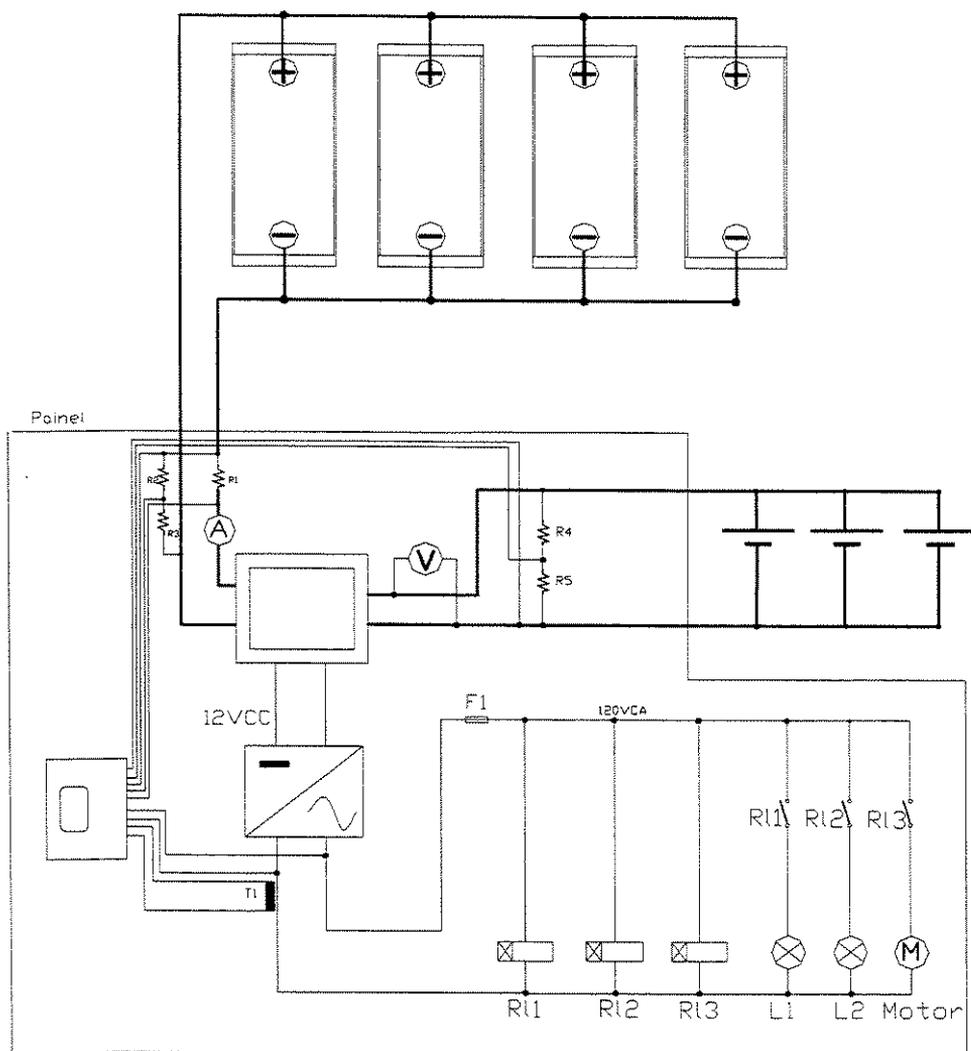
SEADE. Anuário estatístico do Estado de São Paulo, 1998.

U. S. DEPARTMENT OF STATE (1995) **Climate Action Report: Submission of the United States of America under the United Nations Framework Convention on Climate Change**. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, 1995. Cap1: Introduction and Overview. p. 4-17.

WORLD BANK (1999) Annual report Referência disponível na internet: <http://www.worldbank.org>

**Anexos**

Anexo 1 - Esquema multifilar de ligações do sistema fotovoltaico



## Simbologia utilizada no esquema multifilar

SIMBOLOGIA	
Símbolo	Descrição
	Painel Fotovoltaico Siemens SM 75 48wp
	Amperímetro analógico 0-10A
	Voltímetro analógico 0-15V
	Bateria chumbo-ácida 12V/100Ah
	Inversor de frequência TRACE 2,5 kW 12VCC/120VCA
	Controlador de carga 12V/30A
	Fusível tipo rosca Silized 2A
	Relé de tempo motorizado COEL
	Lâmpada fluorescente compacta 15W 120V
	Ventilador exaustor 19W 120V
	Contato NA relé de tempo R1
	Transformador de corrente
	Resistor de carvão
	Dispositivo de coleta de dados Logger

Anexo 2 – Tabelas dos valores diários das principais medições

D1 = Dia mês

D2 = Dia ano

D3 = Energia Produzida pelo sistema Wh

D4 = Energia Consumida pelo sistema Wh

D5 = Diferença entre Produção e Consumo

D6 = Energia Produzida Wh/m<sup>2</sup>

D7 = Insolação recebida segundo Cepagri Wh/m<sup>2</sup>

D8 = Insolação recebida corrigida para ângulo 25

D9 = Rendimento do sistema (D6/D8\*100)

D10 = Energia diária por painel Wh/m<sup>2</sup>

Jul/99									
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
1	182	774,89	510	242,32	557,47	3926,50	5182,98	10,76	193,72
2	183	810,62	510	277,01	583,18	3854,17	5087,50	11,46	202,66
3	184	757,84	510	225,77	545,21	3771,50	4978,38	10,95	189,46
4	185	554,97	510	28,81	399,26	3103,50	4096,62	9,75	138,74
5	186	447,61	510	-75,43	322,02	2523,83	3331,46	9,67	111,90
6	187	725,20	510	194,08	521,73	3927,00	5183,64	10,06	181,30
7	188	596,88	510	69,50	429,41	3285,17	4336,42	9,90	149,22
8	189	733,95	510	202,57	528,02	3447,67	4550,92	11,60	183,49
9	190	783,75	510	250,92	563,85	3735,83	4931,30	11,43	195,94
10	191	889,31	510	353,40	639,79	4087,50	5395,50	11,86	222,33
11	192	843,78	510	309,20	607,03	3995,33	5273,84	11,51	210,94
12	193	844,60	510	310,00	607,63	4158,33	5489,00	11,07	211,15
13	194	710,81	510	180,11	511,38	3649,83	4817,78	10,61	177,70
14	195	769,63	510	237,21	553,69	4108,00	5422,56	10,21	192,41
15	196	786,76	510	253,84	566,01	4004,00	5285,28	10,71	196,69
16	197	719,60	510	188,64	517,70	4040,33	5333,24	9,71	179,90
17	198	705,97	510	175,41	507,89	3673,50	4849,02	10,47	176,49
18	199	794,61	510	261,47	571,66	3965,33	5234,24	10,92	198,65
19	200	734,42	510	203,03	528,36	4030,83	5320,70	9,93	183,60
20	201	672,20	510	142,62	483,60	3828,67	5053,84	9,57	168,05
21	202	555,47	510	29,29	399,62	3610,33	4765,64	8,39	138,87
22	203	594,92	510	67,59	428,00	3677,50	4854,30	8,82	148,73
23	204	681,18	510	151,34	490,06	3554,00	4691,28	10,45	170,30
24	205	600,17	510	72,69	431,78	3270,67	4317,28	10,00	150,04
25	206	828,38	510	294,25	595,96	4119,33	5437,52	10,96	207,09
26	207	837,82	510	303,42	602,75	4099,33	5411,12	11,14	209,46
27	208	813,51	510	279,82	585,26	4004,33	5285,72	11,07	203,38
28	209	840,04	510	305,57	604,34	4069,50	5371,74	11,25	210,01
29	210	735,84	510	204,41	529,38	4095,83	5406,50	9,79	183,96
30	211	688,20	510	158,16	495,11	3979,83	5253,38	9,42	172,05
31	212	647,65	510	118,79	465,94	4066,33	5367,56	8,68	161,91
<b>TOTAL</b>		<b>22480,58</b>	<b>15810,00</b>	<b>6015,81</b>	<b>16173,08</b>				
<b>MÉDIA</b>		<b>729,13</b>	<b>510,00</b>	<b>197,89</b>	<b>524,55</b>	<b>3779,92</b>	<b>4989,49</b>	<b>10,48</b>	<b>182,28</b>

				Ago/99					
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
1	213	314,58	510	-195,42	226,31	4224,83	5154,30	4,39	78,64
2	214	267,63	510	-242,37	192,54	4087,17	4986,34	3,86	66,91
3	215	176,26	510	-333,74	126,80	4349,67	5306,59	2,39	44,06
4	216	345,38	510	-164,62	248,47	4329,17	5281,58	4,70	86,34
5	217	685,34	510	175,34	493,05	4301,17	5247,42	9,40	171,34
6	218	872,74	510	362,74	627,87	4378,67	5341,97	11,75	218,18
7	129	834,03	510	324,03	600,02	4270,17	5209,60	11,52	208,51
8	220	835,42	510	325,42	601,02	4252,17	5187,64	11,59	208,86
9	221	843,33	510	333,33	606,71	4108,50	5012,37	12,10	210,83
10	222	814,93	510	304,93	586,28	4116,83	5022,54	11,67	203,73
11	223	755,07	510	245,07	543,22	3963,83	4835,88	11,23	188,77
12	224	761,86	510	251,86	548,10	3980,67	4856,41	11,29	190,46
13	225	755,65	510	245,65	543,63	3910,67	4771,01	11,39	188,91
14	226	417,36	510	-92,64	300,26	2523,00	3078,06	9,75	104,34
15	227	370,26	510	-139,74	266,37	2519,50	3073,79	8,67	92,56
16	228	715,41	510	205,41	514,68	3640,33	4441,21	11,59	178,85
17	229	739,89	510	229,89	532,29	3658,67	4463,57	11,93	184,97
18	230	735,17	510	225,17	528,90	3624,17	4421,48	11,96	183,79
19	231	797,18	510	287,18	573,51	3914,00	4775,08	12,01	199,30
20	232	886,62	510	376,62	637,86	4713,67	5750,67	11,09	221,66
21	233	915,86	510	405,86	658,89	4832,17	5895,24	11,18	228,96
22	234	846,45	510	336,45	608,96	4814,17	5873,28	10,37	211,61
23	235	862,40	510	352,40	620,43	4677,67	5706,75	10,87	215,60
24	236	863,55	510	353,55	621,26	4789,50	5843,19	10,63	215,89
25	237	905,57	510	395,57	651,49	4856,83	5925,34	10,99	226,39
26	238	842,11	510	332,11	605,84	4761,83	5809,44	10,43	210,53
27	239	795,66	510	285,66	572,42	4634,00	5653,48	10,13	198,92
28	240	813,07	510	303,07	584,94	4700,00	5734,00	10,20	203,27
29	241	638,37	510	128,37	459,26	4011,50	4894,03	9,38	159,59
30	242	701,62	510	191,62	504,76	4322,67	5273,65	9,57	175,40
31	243	796,64	510	286,64	573,12	4683,00	5713,26	10,03	199,16
<b>TOTAL</b>		<b>21905,39</b>	<b>15810,00</b>	<b>6095,39</b>	<b>15759,27</b>				
<b>MÉDIA</b>		<b>706,63</b>	<b>510,00</b>	<b>196,63</b>	<b>508,36</b>	<b>4191,94</b>	<b>5114,17</b>	<b>9,94</b>	<b>176,66</b>

Set/99									
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
1	244	854,90	510,00	344,90	615,04	4893,83	5481,09	11,22	213,73
2	245	846,20	510,00	336,20	608,77	4966,33	5562,29	10,94	211,55
3	246	829,41	510,00	319,41	596,70	4905,83	5494,53	10,86	207,35
4	247	775,39	510,00	265,39	557,84	4710,33	5275,57	10,57	193,85
5	248	759,53	510,00	249,53	546,43	4615,50	5169,36	10,57	189,88
6	249	687,73	510,00	177,73	494,77	4228,83	4736,29	10,45	171,93
7	250	760,86	510,00	250,86	547,38	4488,67	5027,31	10,89	190,22
8	251	374,51	510,00	-135,49	269,43	2569,33	2877,65	9,36	93,63
9	252	404,89	510,00	-105,11	291,29	2693,83	3017,09	9,65	101,22
10	253	356,80	510,00	-153,20	256,69	2463,33	2758,93	9,30	89,20
11	254	808,89	510,00	298,89	581,94	4504,83	5045,41	11,53	202,22
12	255	162,71	510,00	-347,29	117,06	1343,50	1504,72	7,78	40,68
13	256	896,20	510,00	386,20	644,75	5030,67	5634,35	11,44	224,05
14	257	572,86	510,00	62,86	412,13	4656,50	5215,28	7,90	143,21
15	258	113,60	510,00	-396,40	81,73	929,00	1040,48	7,85	28,40
16	259	918,29	510,00	408,29	660,64	4879,50	5465,04	12,09	229,57
17	260	1010,98	510,00	500,98	727,32	5424,00	6074,88	11,97	252,74
18	261	894,85	510,00	384,85	643,78	5337,83	5978,37	10,77	223,71
19	262	779,93	510,00	269,93	561,10	4749,33	5319,25	10,55	194,98
20	263	821,01	510,00	311,01	590,66	4966,83	5562,85	10,62	205,25
21	264	826,86	510,00	316,86	594,87	5111,83	5725,25	10,39	206,72
22	265	916,70	510,00	406,70	659,50	5489,33	6148,05	10,73	229,18
23	266	875,50	510,00	365,50	629,86	5559,83	6227,01	10,11	218,88
24	267	647,39	510,00	137,39	465,75	5749,50	6439,44	7,23	161,85
25	268	996,85	510,00	486,85	717,16	5872,67	6577,39	10,90	249,21
26	269	699,89	510,00	189,89	503,51	5690,83	6373,73	7,90	174,97
27	270	895,07	510,00	385,07	643,94	5530,83	6194,53	10,40	223,77
28	271	876,28	510,00	366,28	630,42	5548,50	6214,32	10,14	219,07
29	272	642,43	510,00	132,43	462,18	4229,17	4736,67	9,76	160,61
30	273	937,59	510,00	427,59	674,52	5663,50	6343,12	10,63	234,40
<b>TOTAL</b>		<b>21944,10</b>	<b>15300,00</b>	<b>6644,10</b>	<b>15787,12</b>				
<b>MÉDIA</b>		<b>731,47</b>	<b>510,00</b>	<b>221,47</b>	<b>526,24</b>	<b>4560,13</b>	<b>5107,34</b>	<b>10,15</b>	<b>182,87</b>

				Out/99						
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	
1	274	824,00	510	290,00	592,81	5253,00	5095,41	11,63	206,00	
2	275	574,74	510	48,00	413,48	3817,17	3702,65	11,17	143,69	
3	276	351,44	510	-168,80	252,83	4406,17	4273,98	5,92	87,86	
4	277	34,77	510	-476,24	25,02	1757,67	1704,94	1,47	8,69	
5	278	861,80	510	326,70	620,00	4967,50	4818,48	12,87	215,45	
6	279	523,69	510	-1,56	376,76	5172,50	5017,33	7,51	130,92	
7	280	870,88	510	335,51	626,53	5530,50	5364,59	11,68	217,72	
8	281	383,16	510	-138,00	275,65	2602,50	2524,43	10,92	95,79	
9	282	939,98	510	402,60	676,24	5497,33	5332,41	12,68	234,99	
10	283	1053,90	510	513,20	758,20	6076,50	5894,21	12,86	263,47	
11	284	701,95	510	171,50	505,00	5823,33	5648,63	8,94	175,49	
12	285	647,87	510	119,00	466,09	5745,33	5572,97	8,36	161,97	
13	286	895,07	510	359,00	643,94	5594,83	5426,99	11,87	223,77	
14	287	821,94	510	288,00	591,32	5402,50	5240,43	11,28	205,49	
15	288	674,65	510	145,00	485,36	4447,33	4313,91	11,25	168,66	
16	289	616,97	510	89,00	443,86	4088,83	3966,17	11,19	154,24	
17	290	184,68	510	-330,70	132,86	1521,33	1475,69	9,00	46,17	
18	291	821,43	510	287,50	590,95	4840,33	4695,12	12,59	205,36	
19	292	904,65	510	368,30	650,83	5189,67	5033,98	12,93	226,16	
20	293	635,00	510	106,50	456,83	3992,50	3872,73	11,80	158,75	
21	294	805,87	510	272,40	579,76	5236,17	5079,08	11,41	201,47	
22	295	811,74	510	278,10	583,99	5139,67	4985,48	11,71	202,94	
23	296	1017,64	510	478,00	732,12	6141,67	5957,42	12,29	254,41	
24	297	922,57	510	385,70	663,72	5851,83	5676,28	11,69	230,64	
25	298	544,36	510	18,50	391,62	3726,17	3614,38	10,84	136,09	
26	299	252,76	510	-264,60	181,84	2021,33	1960,69	9,27	63,19	
27	300	579,89	510	53,00	417,19	3892,50	3775,73	11,05	144,97	
28	301	417,36	510	-104,80	300,26	5407,50	5245,28	5,72	104,34	
29	302	869,32	510	334,00	625,41	5912,17	5734,80	10,91	217,33	
30	303	830,70	510	296,50	597,62	5399,17	5237,19	11,41	207,67	
31	304	768,38	510	236,00	552,79	6081,00	5898,57	9,37	192,10	
<b>TOTAL</b>		<b>21143,13</b>	<b>15810</b>	<b>4717,31</b>	<b>15210,88</b>					
<b>MÉDIA</b>		<b>679,16</b>	<b>510,00</b>	<b>149,38</b>	<b>488,60</b>	<b>4681,83</b>	<b>4541,38</b>	<b>10,47</b>	<b>169,79</b>	

Nov/99									
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
1	305	828,24	510	318,24	595,86	5495,33	4780,94	12,46	207,06
2	306	798,97	510	288,97	574,80	5401,17	4699,02	12,23	199,74
3	307	810,82	510	300,82	583,32	5261,17	4577,22	12,74	202,70
4	308	698,96	510	188,96	502,85	4832,67	4204,42	11,96	174,74
5	309	379,56	510	-130,45	273,06	508,67	442,54	***	94,89
6	310	863,45	510	353,45	621,19	5335,67	4642,03	13,38	215,86
7	311	816,48	510	306,48	587,40	5734,00	4988,58	11,77	204,12
8	312	764,26	510	254,26	549,83	5400,17	4698,15	11,70	191,07
9	313	378,01	510	-131,99	271,95	2825,83	2458,48	11,06	94,50
10	314	567,22	510	57,22	408,07	3692,17	3212,19	12,70	141,81
11	315	700,40	510	190,40	503,88	4837,00	4208,19	11,97	175,10
12	316	669,50	510	159,50	481,65	2698,50	2347,70	***	167,38
13	317	485,23	510	-24,77	349,09	3267,50	2842,73	12,28	121,31
14	318	180,25	510	-329,75	129,68	4641,17	4037,82	***	45,06
15	319	52,65	510	-457,35	37,88	5221,83	4543,00	***	13,16
16	320	906,92	510	396,92	652,46	6137,67	5339,77	12,22	226,73
17	321	883,95	510	373,95	635,93	6091,00	5299,17	12,00	220,99
18	322	845,04	510	335,04	607,94	6004,50	5223,92	11,64	211,26
19	323	772,98	510	262,98	556,10	5297,67	4608,97	12,07	193,25
20	324	602,55	510	92,55	433,49	4265,67	3711,13	11,68	150,64
21	325	685,98	510	175,98	493,51	4699,33	4088,42	12,07	171,50
22	326	726,46	510	216,46	522,63	5469,83	4758,76	10,98	181,61
23	327	840,27	510	330,27	604,51	5728,67	4983,94	12,13	210,07
24	328	845,32	510	335,32	608,14	6070,00	5280,90	11,52	211,33
25	329	839,14	510	329,14	603,70	6078,00	5287,86	11,42	209,79
26	330	445,99	510	-64,01	320,86	3195,50	2780,09	11,54	111,50
27	331	735,11	510	225,11	528,86	5772,00	5021,64	10,53	183,78
28	332	80,44	510	-429,56	57,87	6072,33	5282,93	***	20,11
29	333	0,00	510	-510,00	0,00	5930,33	5159,39	***	0,00
30	334	778,80	510	268,80	560,29	5814,33	5058,47	11,08	194,70
<b>TOTAL</b>		<b>18982,96</b>	<b>15300</b>	<b>3682,96</b>	<b>13656,81</b>				
<b>MÉDIA</b>		<b>632,77</b>	<b>510,00</b>	<b>122,77</b>	<b>455,23</b>	<b>4925,99</b>	<b>4285,61</b>	<b>11,88</b>	<b>158,19</b>

Dez/99									
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
1	335	771,47	510	261,47	555,01	6010	5169,00	10,74	192,87
2	336	752,93	510	242,93	541,68	5660	4868,00	11,13	188,23
3	337	824,00	510	314,00	592,81	4780	4111,00	14,42	206,00
4	338	463,50	510	-46,50	333,45	2790	2399,00	13,90	115,88
5	339	777,65	510	267,65	559,46	6270	5392,00	10,38	194,41
6	340	515,00	510	5,00	370,50	4410	3793,00	9,77	128,75
7	341	535,60	510	25,60	385,32	4730	4068,00	9,47	133,90
8	342	722,03	510	212,03	519,45	4570	3930,00	13,22	180,51
9	343	234,84	510	-275,16	168,95	4940	4248,00	3,98	58,71
10	344	536,63	510	26,63	386,06	3720	3199,00	12,07	134,16
11	345	313,12	510	-196,88	225,27	2440	2098,00	10,74	78,28
12	346	289,43	510	-220,57	208,22	2480	2133,00	9,76	72,36
13	347	314,15	510	-195,85	226,01	2090	1797,00	12,58	78,54
14	348	336,81	510	-173,19	242,31	2760	2374,00	10,21	84,20
15	349	576,80	510	66,80	414,96	5590	4807,00	8,63	144,20
16	350	710,70	510	200,70	511,29	5780	4971,00	10,29	177,68
17	351	771,47	510	261,47	555,01	6220	5349,00	10,38	192,87
18	352	743,15	510	233,15	534,64	6140	5280,00	10,13	185,79
19	353	761,69	510	251,69	547,97	6160	5298,00	10,34	190,42
20	354	773,53	510	263,53	556,50	6230	5358,00	10,39	193,38
21	355	721,00	510	211,00	518,71	6300	5418,00	9,57	180,25
22	356	618,00	510	108,00	444,60	4960	4266,00	10,42	154,50
23	357	412,00	510	-98,00	296,40	3600	3096,00	9,57	103,00
24	358	515,00	510	5,00	370,50	4230	3638,00	10,18	128,75
25	359	710,70	510	200,70	511,29	5830	5014,00	10,20	177,68
26	360	710,70	510	200,70	511,29	5710	4911,00	10,41	177,68
27	361	566,50	510	56,50	407,55	4600	3956,00	10,30	141,63
28	362	698,34	510	188,34	502,40	5620	4833,00	10,40	174,59
29	363	721,00	510	211,00	518,71	6160	5298,00	9,79	180,25
30	364	710,70	510	200,70	511,29	5780	4971,00	10,29	177,68
31	365	587,10	510	77,10	422,37	4650	3999,00	10,56	146,78
<b>TOTAL</b>		<b>18695,53</b>	<b>15810,00</b>	<b>2885,53</b>	<b>13450,02</b>				
<b>MÉDIA</b>		<b>603,08</b>	<b>510,00</b>	<b>93,08</b>	<b>433,87</b>	<b>4877,74</b>	<b>4194,90</b>	<b>10,46</b>	<b>150,77</b>

JANEIRO 2000									
D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
1	1					3075,83	2614,46		
2	2					1973,67	1677,62		
3	3					3066,00	2606,10		
4	4					2330,33	1980,78		
5	5					2438,67	2072,87		
6	6					4426,50	3762,53		
7	7	618,00	510,00	108,00	444,60	4340,83	3689,71	12,05	154,5
8	8	776,62	510,00	266,62	558,72	6110,00	5193,50	10,76	194,155
9	9	848,72	510,00	338,72	610,59	6378,50	5421,73	11,26	212,18
10	10	799,28	510,00	289,28	575,02	6206,33	5275,38	10,90	199,82
11	11	629,33	510,00	119,33	452,76	5288,50	4495,23	10,07	157,3325
12	12	530,45	510,00	20,45	381,62	3974,83	3378,61	11,30	132,6125
13	13	628,30	510,00	118,30	452,01	4836,00	4110,60	11,00	157,075
14	14	526,33	510,00	16,33	378,65	4269,50	3629,08	10,43	131,5825
15	15	516,03	510,00	6,03	371,24	4549,33	3866,93	9,60	129,0075
16	16	601,52	510,00	91,52	432,75	4534,17	3854,04	11,23	150,38
17	17	767,35	510,00	257,35	552,05	5927,83	5038,66	10,96	191,8375
18	18	715,85	510,00	205,85	515,00	5251,17	4463,49	11,54	178,9625
19	19	723,06	510,00	213,06	520,19	5820,33	4947,28	10,51	180,765
20	20	714,82	510,00	204,82	514,26	5264,33	4474,68	11,49	178,705
21	21	825,18	510,00	315,18	593,65	5835,83	4960,46	11,97	206,2944
22	22	857,48	510,00	347,48	616,89	6052,83	5144,91	11,99	214,3688
23	23	927,00	510,00	417,00	666,91	6577,17	5590,59	11,93	231,75
24	24	775,59	510,00	265,59	557,98	5614,33	4772,18	11,69	193,8975
25	25	765,29	510,00	255,29	550,57	5004,50	4253,83	12,94	191,3225
26	26	407,88	510,00	-102,12	293,44	2695,00	2290,75	12,81	101,97
27	27	0,00	510,00	-510,00	0,00	4737,00	4026,45	0,00	0
28	28	0,00	510,00	-510,00	0,00	6160,17	5236,14	0,00	0
29	29	891,98	510,00	381,98	641,71	5853,83	4975,76	12,90	222,995
30	30	811,64	510,00	301,64	583,91	5584,00	4746,40	12,30	202,91
31	31	817,82	510,00	307,82	588,36	5042,50	4286,13	13,73	204,455
<b>TOTAL</b>		<b>16475,51</b>	<b>12750,00</b>	<b>3725,51</b>	<b>11852,89</b>	<b>#####</b>			
<b>MÉDIA</b>		<b>659,02</b>	<b>510,00</b>	<b>149,02</b>	<b>474,12</b>	<b>5276,35</b>	<b>4484,90</b>	<b>10,61</b>	<b>164,7551</b>

**FEVEREIRO DE 2000**

<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>	<b>D7</b>	<b>D8</b>	<b>D9</b>	<b>D10</b>
1	32	372,86	510,00	-137,14	268,24	2245,17	2088,01	12,85	93,22
2	33	865,20	510,00	355,20	622,45	5224,67	4858,94	12,81	216,30
3	34	731,30	510,00	221,30	526,12	4837,50	4498,88	11,69	182,83
4	35	494,40	510,00	-15,60	355,68	3214,67	2989,64	11,90	123,60
5	36	618,00	510,00	108,00	444,60	5011,33	4660,54	9,54	154,50
6	37	772,50	510,00	262,50	555,76	5489,50	5105,24	10,89	193,13
7	38	711,73	510,00	201,73	512,04	4355,00	4050,15	12,64	177,93
8	39	507,79	510,00	-2,21	365,32	3680,50	3422,87	10,67	126,95
9	40	638,60	510,00	128,60	459,42	4122,00	3833,46	11,98	159,65
10	41	432,60	510,00	-77,40	311,22	2734,67	2543,24	12,24	108,15
11	42	401,70	510,00	-108,30	288,99	3233,00	3006,69	9,61	100,43
12	43	561,89	510,00	51,89	404,24	3597,67	3345,83	12,08	140,47
13	44	206,00	510,00	-304,00	148,20	1365,83	1270,23	11,67	51,50
14	45	638,60	510,00	128,60	459,42	5177,67	4815,23	9,54	159,65
15	46	824,00	510,00	314,00	592,81	5450,83	5069,28	11,69	206,00
16	47	660,23	510,00	150,23	474,99	4722,50	4391,93	10,81	165,06
17	48	360,50	510,00	-149,50	259,35	2685,33	2497,36	10,39	90,13
18	49	824,00	510,00	314,00	592,81	5818,33	5411,05	10,96	206,00
19	50	710,70	510,00	200,70	511,29	5249,83	4882,35	10,47	177,68
20	51	731,30	510,00	221,30	526,12	5251,33	4883,74	10,77	182,83
21	52	824,00	510,00	314,00	592,81	5763,33	5359,90	11,06	206,00
22	53	803,40	510,00	293,40	577,99	5113,50	4755,56	12,15	200,85
23	54	715,24	510,00	205,24	514,56	4695,50	4366,82	11,78	178,81
24	55	721,00	510,00	211,00	518,71	4886,67	4544,60	11,41	180,25
25	56	778,68	510,00	268,68	560,20	5273,50	4904,36	11,42	194,67
26	57	785,89	510,00	275,89	565,39	5540,17	5152,36	10,97	196,47
27	58	847,69	510,00	337,69	609,85	5225,17	4859,41	12,55	211,92
28	59	690,10	510,00	180,10	496,47	5179,00	4816,47	10,31	172,53
29	60	821,22	510,00	311,22	590,81	5025,50	4673,72	12,64	205,31
<b>TOTAL</b>		<b>19051,12</b>	<b>14790,00</b>	<b>4261,12</b>	<b>13705,84</b>				
<b>MÉDIA</b>		<b>656,94</b>	<b>510,00</b>	<b>146,94</b>	<b>472,62</b>	<b>4488,61</b>	<b>4174,41</b>	<b>11,36</b>	<b>164,23</b>

**MARÇO 2000**

<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>	<b>D7</b>	<b>D8</b>	<b>D9</b>	<b>D10</b>
1	61	0,00	510,00	-510,00	0,00	5654,00	5936,70	0,00	0,00
2	62	0,00	510,00	-510,00	0,00	5709,67	5995,15	0,00	0,00
3	63	842,54	510,00	332,54	606,14	5691,17	5975,73	10,14	210,64
4	64	450,11	510,00	-59,89	323,82	5749,50	6036,98	5,36	112,53
5	65	0,00	510,00	-510,00	0,00	4974,83	5223,58	0,00	0,00
6	66	0,00	510,00	-510,00	0,00	5242,33	5504,45	0,00	0,00
7	67	340,93	510,00	-169,07	245,27	2734,67	2871,40	8,54	85,23
8	68	1060,90	510,00	550,90	763,24	5526,83	5803,18	13,15	265,23
9	69	799,28	510,00	289,28	575,02	4838,50	5080,43	11,32	199,82
10	70	711,73	510,00	201,73	512,04	4473,50	4697,18	10,90	177,93
11	71	445,99	510,00	-64,01	320,86	2920,50	3066,53	10,46	111,50
12	72	746,75	510,00	236,75	537,23	4444,33	4666,55	11,51	186,69
13	73	947,60	510,00	437,60	681,73	5297,67	5562,55	12,26	236,90
14	74	945,54	510,00	435,54	680,24	5282,83	5546,98	12,26	236,39
15	75	599,46	510,00	89,46	431,27	3773,50	3962,18	10,88	149,87
16	76	710,70	510,00	200,70	511,29	4225,83	4437,13	11,52	177,68
17	77	646,84	510,00	136,84	465,35	3858,00	4050,90	11,49	161,71
18	78	573,71	510,00	63,71	412,74	3541,33	3718,40	11,10	143,43
19	79	900,22	510,00	390,22	647,64	4858,33	5101,25	12,70	225,06
20	80	669,50	510,00	159,50	481,65	3925,83	4122,13	11,68	167,38
21	81	676,71	510,00	166,71	486,84	4055,50	4258,28	11,43	169,18
22	82	673,62	510,00	163,62	484,62	3967,17	4165,53	11,63	168,41
23	83	669,50	510,00	159,50	481,65	3985,00	4184,25	11,51	167,38
24	84	830,18	510,00	320,18	597,25	4462,17	4685,28	12,75	207,55
25	85	1016,61	510,00	506,61	731,37	5128,00	5384,40	13,58	254,15
26	86	839,45	510,00	329,45	603,92	4677,17	4911,03	12,30	209,86
27	87	626,24	510,00	116,24	450,53	3710,17	3895,68	11,56	156,56
28	88	381,10	510,00	-128,90	274,17	2544,17	2671,38	10,26	95,28
29	89	484,10	510,00	-25,90	348,27	3188,50	3347,93	10,40	121,03
30	90	578,86	510,00	68,86	416,45	3245,83	3408,13	12,22	144,72
31	91	978,50	510,00	468,50	703,96	4872,17	5115,78	13,76	244,63
<b>TOTAL</b>		<b>19146,67</b>	<b>15810,00</b>	<b>3336,67</b>	<b>13774,58</b>				
<b>Média</b>		<b>617,63</b>	<b>510,00</b>	<b>107,63</b>	<b>444,34</b>	<b>4405,13</b>	<b>4625,39</b>	<b>9,89</b>	<b>154,41</b>

**ABRIL 2000**

<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>	<b>D7</b>	<b>D8</b>	<b>D9</b>	<b>D10</b>
1	92	967,17	510,00	457,17	695,81	4982,00	5579,84	12,47	241,79
2	93	1049,57	510,00	539,57	755,09	5021,33	5623,89	13,43	262,39
3	94	1052,66	510,00	542,66	757,31	5004,00	5604,48	13,51	263,17
4	95	1030,00	510,00	520,00	741,01	5215,50	5841,36	12,69	257,50
5	96	876,53	510,00	366,53	630,60	4854,83	5437,41	11,60	219,13
6	97	908,46	510,00	398,46	653,57	4816,33	5394,29	12,12	227,12
7	98	914,64	510,00	404,64	658,01	5050,17	5656,19	11,63	228,66
8	99	873,44	510,00	363,44	628,37	4931,67	5523,47	11,38	218,36
9	100	865,20	510,00	355,20	622,45	4829,00	5408,48	11,51	216,30
10	101	851,81	510,00	341,81	612,81	4756,83	5327,65	11,50	212,95
11	102	849,75	510,00	339,75	611,33	4708,67	5273,71	11,59	212,44
12	103	828,12	510,00	318,12	595,77	4752,00	5322,24	11,19	207,03
13	104	817,82	510,00	307,82	588,36	4518,33	5060,53	11,63	204,46
14	105	810,61	510,00	300,61	583,17	4570,50	5118,96	11,39	202,65
15	106	806,49	510,00	296,49	580,21	4704,50	5269,04	11,01	201,62
16	107	839,45	510,00	329,45	603,92	4813,50	5391,12	11,20	209,86
17	108	795,16	510,00	285,16	572,06	4546,17	5091,71	11,24	198,79
18	109	660,23	510,00	150,23	474,99	3737,50	4186,00	11,35	165,06
19	110	384,19	510,00	-125,81	276,40	2555,50	2862,16	9,66	96,05
20	111	1019,70	510,00	509,70	733,60	4630,00	5185,60	14,15	254,93
21	112	947,60	510,00	437,60	681,73	4795,17	5370,59	12,69	236,90
22	113	804,95	510,00	294,95	579,10	4344,17	4865,47	11,90	201,24
23	114	837,39	510,00	327,39	602,44	4750,33	5320,37	11,32	209,35
24	115	829,15	510,00	319,15	596,51	4764,00	5335,68	11,18	207,29
25	116	835,33	510,00	325,33	600,96	4807,00	5383,84	11,16	208,83
26	117	811,64	510,00	301,64	583,91	4630,67	5186,35	11,26	202,91
27	118	817,82	510,00	307,82	588,36	4637,17	5193,63	11,33	204,46
28	119	828,12	510,00	318,12	595,77	1377,83	1543,17		207,03
29	120	819,88	510,00	309,88	589,84	4630,50	5186,16	11,37	204,97
30	121	817,82	510,00	307,82	588,36	4522,00	5064,64	11,62	204,46
<b>TOTAL</b>		<b>25550,70</b>	<b>15300,00</b>	<b>10250,70</b>	<b>18381,79</b>				
<b>MÉDIA</b>		<b>851,69</b>	<b>510,00</b>	<b>341,69</b>	<b>612,73</b>	<b>4541,91</b>	<b>5086,93</b>	<b>11,73</b>	<b>212,92</b>

MAIO 2000

D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
1	92	774,56	510,00	264,56	557,24	4160,50	5325,44	10,46	193,64
2	93	735,42	510,00	225,42	529,08	3942,17	5045,97	10,49	183,86
3	94	781,77	510,00	271,77	562,42	4244,00	5432,32	10,35	195,44
4	95	717,91	510,00	207,91	516,48	3814,50	4882,56	10,58	179,48
5	96	829,15	510,00	319,15	596,51	4372,50	5596,80	10,66	207,29
6	97	486,16	510,00	-23,84	349,76	2815,17	3603,41	9,71	121,54
7	98	782,80	510,00	272,80	563,17	3746,00	4794,88	11,75	195,70
8	99	619,03	510,00	109,03	445,35	3387,67	4336,21	10,27	154,76
9	100	805,46	510,00	295,46	579,47	3761,83	4815,15	12,03	201,37
10	101	965,11	510,00	455,11	694,32	4336,83	5551,15	12,51	241,28
11	102	871,38	510,00	361,38	626,89	4309,33	5515,95	11,37	217,85
12	103	831,21	510,00	321,21	597,99	4346,00	5562,88	10,75	207,80
13	104	805,46	510,00	295,46	579,47	4227,33	5410,99	10,71	201,37
14	105	775,59	510,00	265,59	557,98	4061,50	5198,72	10,73	193,90
15	106	780,74	510,00	270,74	561,68	3937,17	5039,57	11,15	195,19
16	107	777,65	510,00	267,65	559,46	3723,50	4766,08	11,74	194,41
17	108	516,03	510,00	6,03	371,24	2802,50	3587,20	10,35	129,01
18	109	762,20	510,00	252,20	548,35	3519,83	4505,39	12,17	190,55
19	110	662,29	510,00	152,29	476,47	3118,67	3991,89	11,94	165,57
20	111	742,63	510,00	232,63	534,27	3454,33	4421,55	12,08	185,66
21	112	859,02	510,00	349,02	618,00	3810,67	4877,65	12,67	214,76
22	113	900,22	510,00	390,22	647,64	4145,67	5306,45	12,20	225,06
23	114	800,31	510,00	290,31	575,76	3889,50	4978,56	11,56	200,08
24	115	801,34	510,00	291,34	576,50	3918,17	5015,25	11,50	200,34
25	116	827,09	510,00	317,09	595,03	4002,67	5123,41	11,61	206,77
26	117	721,00	510,00	211,00	518,71	3503,33	4484,27	11,57	180,25
27	118	554,14	510,00	44,14	398,66	2912,50	3728,00	10,69	138,54
28	119	956,87	510,00	446,87	688,40	4018,17	5143,25	13,38	239,22
29	120	833,27	510,00	323,27	599,47	4111,00	5262,08	11,39	208,32
30	121	768,38	510,00	258,38	552,79	3766,33	4820,91	11,47	192,10
31	122	797,22	510,00	287,22	573,54	2703,00	3459,84	16,58	199,31
<b>TOTAL</b>		<b>23841,41</b>	<b>15810,00</b>	<b>8031,41</b>	<b>17152,09</b>				
<b>MÉDIA</b>		<b>769,08</b>	<b>510,00</b>	<b>259,08</b>	<b>553,29</b>	<b>3769,75</b>	<b>4825,28</b>	<b>11,50</b>	<b>192,27</b>

Anexo 3 – Dados meteorológicos da cidade de Campinas

INSTITUTO AGRONÔMICO - SEÇÃO DE CLIMATOLOGIA AGRÍCOLA  
NORMAIS CLIMATOLÓGICAS - 1961 a 1990

ESTAÇÃO EXPERIMENTAL **CAMPINAS**  
LAT: 22G 54' S LONG: 47G 05' W ALT: 674 M

MES	TEMPERATURA DO AR ( C )							
	MEDIA COMP	MEDIA MAX/MIN	MEDIA MAXIMA	MAXIMA ABSOL	ANO OCOR.	MEDIA MINIMA	MIN. ABSOL	ANO OCOR.
JAN	23,0	24,0	29,2	35,5	1971	18,9	12,6	1970
FEV	23,3	24,4	29,7	35,1	1971	19,1	13,6	1964
MAR	22,9	23,9	29,2	34,4	1974	18,5	10,6	1965
ABR	21,0	22,0	27,5	33,0	1990	16,5	3,8	1971
MAI	18,7	19,6	25,3	31,4	1989	14,0	0,2	1979
JUN	17,3	18,3	24,3	30,0	1972	12,3	1,0	1979
JUL	17,3	18,2	24,4	31,1	1963	11,9	0,2	1981
AGO	18,9	19,8	26,4	35,0	1963	13,2	0,6	1965
SET	20,3	21,0	27,2	37,8	1961	14,9	5,4	1966
OUT	21,3	22,1	28,0	37,0	1963	16,3	9,0	1974
NOV	22,1	22,9	28,6	37,8	1985	17,3	10,0	1979
DEZ	22,5	23,4	28,4	35,0	1961	18,3	11,6	1972
ANO	20,7	21,6	27,3	37,8	1961	15,9	0,2	79/81

MES	VENTOS		PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA				UMID RELAT MEDIA (%)
	DIREÇÃO PREDOM.	VELOC. MEDIA m/s	TOTAL (mm)	NUMERO DE DIAS	QUEDA MAXIMA DIARIA	ANO OCOR.	
JAN	SE	1,7	240,2	16	138,2	1990	77,0
FEV	SE	1,6	190,9	14	104,2	1970	76,9
MAR	SE	1,7	147,3	11	108,3	1987	76,1
ABR	SE	1,9	71,0	6	65,6	1984	74,8
MAI	SE	1,5	65,1	6	66,5	1983	74,1
JUN	SE	1,4	48,7	5	74,4	1976	72,5
JUL	SE	2,0	36,8	4	65,0	1976	68,0
AGO	SE	2,2	37,4	4	46,1	1984	64,6
SET	SE	2,7	65,6	7	52,3	1976	65,5
OUT	SE	2,7	123,6	10	106,1	1963	69,2
NOV	SE	2,5	137,5	11	71,0	1967	70,8
DEZ	SE	2,1	217,1	16	82,2	1989	76,2
ANO	SE	2,0	1381,2	111	138,2	1990	72,1