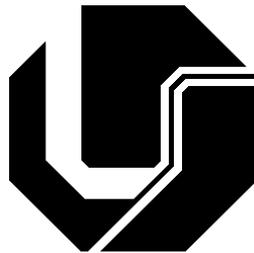


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**UMA CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA PARA A ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA PEQUENOS CONSUMIDORES COM  
AUXÍLIO COMPUTACIONAL**

**FLÁVIA FERNANDES DE LEVA**

**FEVEREIRO  
2005**

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UMA CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA PARA A ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE**  
**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA PEQUENOS CONSUMIDORES COM**  
**AUXÍLIO COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada por Flávia Fernandes de  
Leva à Universidade Federal de Uberlândia para a  
obtenção do título de Mestre em Ciências,  
aprovada em 15/02/05 pela banca examinadora.

**Prof. Carlos Henrique Salerno Dr. (UFU) – Orientador;**  
**Prof. Sebastião Camargo Guimarães Jr., Dr. (UFU);**  
**Profa. Eliane Aparecida Faria Amaral Fadigas, Dra. (USP);**  
**Prof. José Roberto Camacho, Ph.D. (UFU).**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborado pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

L655c Leva, Flávia Fernandes de, 1972-  
Uma contribuição técnica para a análise e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para pequenos consumidores com auxílio computacional / Flávia Fernandes de Leva. - Uberlândia, 2005.  
151f. : il.  
Orientador: Carlos Henrique Salerno.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
Inclui bibliografia.  
1. Geração de energia fotovoltaica - Teses. 2. Energia solar - Teses. 3. Células solares - Teses. I. Salerno, Carlos Henrique. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.311.243 (043.3)

**UMA CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA PARA A ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA PEQUENOS CONSUMIDORES COM  
AUXÍLIO COMPUTACIONAL**

**FLÁVIA FERNANDES DE LEVA**

Dissertação apresentada por Flávia Fernandes de Leva à Universidade Federal de Uberlândia para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

---

Prof. Carlos Henrique Salerno Dr. (UFU) – Orientador

*“Confie no Senhor de todo o coração e não se apóie na sua própria inteligência”.*

*Lembre de Deus em tudo que fizer, e ele lhe mostrará o caminho certo”.*

*Provérbios 3,5-6*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pela porta que sempre se abre em minha vida a cada dificuldade e tribulação, trazendo dia a dia a força necessária para levantar e continuar.

Aos meus pais Edson e Terezinha por seu amor Ágape, por seu exemplo de vida, sua dedicação, força, garra, e principalmente pela Fé e seus ensinamentos no amor de Deus.

Ao meu esposo, Lindolfo, meu amigo, meu companheiro de alegrias e de superação das dificuldades, por tudo o que você significa para mim, pelo carinho, pela compreensão, pelo apoio e pela harmonia que encontramos juntos.

Aos meus irmãos Edson Jr. e José Humberto, as minhas irmãs Vânia e Elaine (em memória), aos meus cunhados e irmãos Valdeir e Renata, que sempre me apóiam, entendem e participam de meus sonhos.

A meu orientador, Prof. Dr. Carlos Henrique Salerno pela paciência, amizade, contribuição e boa vontade sempre que solicitei.

Aos professores do Núcleo de Eletricidade Rural e Fontes Alternativas de Energia, Prof. Sebastião Camargo Guimarães Jr. e Prof. José Roberto Camacho.

A todos meus colegas de laboratório, Humberto de Ávila, Lindolfo Marra de Castro Neto, Lucilene Silva Dias, Fernando E.R. Morikawa, Sidney Pereira e Rogério Silva Cunha, sempre pacientes, fazendo-me sentir como se estivesse em casa.

A CAPES, pela ajuda financeira recebida no decurso deste trabalho e a FAPEMIG pela ajuda financeira para participação em congressos.

## RESUMO

A energia solar é uma fonte renovável de energia com potencial praticamente inesgotável, e dentre muitas aplicações um de seu destaque é o aproveitamento fotovoltaico. Para isso é preciso um estudo do índice de irradiação solar disponível numa determinada região, o número de horas de sol diário, dentre outros.

No dimensionamento de um sistema fotovoltaico será utilizado um modelo matemático de simulação com metodologia apropriada. Ele será utilizado para projetar sistemas de suprimento de energia elétrica que atenderão cargas comunitárias (iluminação pública e de escolas e creches, refrigeração em centros de saúde, irrigação, telecomunicações e lazer) e cargas residenciais (iluminação, refrigeração, rádio e televisão, bombeamento de água, etc, de acordo com a configuração que se deseja.

Além do dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de forma simples e eficiente, foi feito cálculos de caráter ilustrativo da radiação solar, do comportamento das placas em relação a variação da temperatura e do índice de irradiação.

O trabalho contém dados que o tornando uma ferramenta importante para todos aqueles que desejem projetar sistemas fotovoltaicos e não tem algum conhecimento técnico sobre o assunto.

**Palavras chaves:** Energia Solar Fotovoltaica; Projeto; Dimensionamento; Desempenho.

## **ABSTRACT**

Solar power is a renewable source of energy with many applications and practically inexhaustible potential, where the photovoltaic physical phenomenon is one of its main applications. In order to do this it is necessary a study on the solar radiation index available in certain regions, the number of daylight hours and others.

To develop an efficient and simple photovoltaic system, with a performance up to the good standards needed from a commercial energy source, a mathematical model with appropriate methodology has been used. This model is able to design electrical energy supply systems that will be able to serve community loads (public lighting and schools, refrigeration in health care centers, irrigation, telecommunication and others) and residential loads (lighting, refrigeration, radio, television sets, water pumping and others), according to the configuration needed.

Besides, for the behavior of the solar panels relatively to the temperature and to the radiation index, solar radiation illustrative calculation was made.

The work has data that makes it an important tool to anyone who needs to design photovoltaic systems and do not have technical knowledge on the subject.

**Keywords:** photovoltaic solar energy, design, dimensioning, performance

**UMA CONTRIBUIÇÃO TÉCNICA PARA A ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA PEQUENOS CONSUMIDORES COM  
AUXÍLIO COMPUTACIONAL**

**SUMÁRIO**

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ENERGIA QUE VEM DO SOL.....	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Características do Sol.....	6
2.3. Movimento da Terra ao Redor do Sol.....	9
2.3.1. Estações do ano.....	9
2.3.2. Os Solstícios.....	10
2.3.3. Os Equinócios.....	10
2.4. Radiação Solar.....	12
2.4.1. A radiação solar no topo da atmosfera.....	12
2.4.2. O Espectro Solar.....	17
2.4.3. Radiação Solar ao Nível do Solo.....	23
2.4.4. Solarimetria e Instrumentos de Medição.....	24

3.	COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	30
3.1.	Introdução.....	30
3.2.	Gerador Fotovoltaico.....	33
3.2.1.	Efeito Fotovoltaico .....	35
3.2.2.	Célula fotovoltaica.....	38
3.2.3.	Ponto de Potência Máxima.....	41
3.2.4.	Fatores que Influenciam na energia gerada das células e /ou módulos.....	45
3.3.	Armazenador de Energia .....	53
3.3.1.	Acumuladores Eletroquímicos .....	56
3.3.2.	Acumuladores de Chumbo Ácido .....	57
3.3.3.	Ciclo de Vida Útil.....	58
3.4.	Controladores .....	58
3.5.	Inversores .....	60
3.6.	Fios, Conexões e Suporte .....	62
3.7.	Cargas.....	63
3.7.1.	Iluminação .....	64
3.7.2.	Bombeamento.....	67
3.7.3.	Refrigeração .....	68
3.7.4.	Telecomunicação.....	68
3.7.5.	Eletrificação de cercas.....	69
4.	ANÁLISE PARA PROJETO .....	70
4.1.	Legislação em vigor e normas ABNT .....	71
4.2.	Etapas do Projeto de um Sistema Fotovoltaico .....	72
4.2.1.	Recurso Solar.....	72

4.2.2.	Escolha da configuração.....	74
4.2.3.	Cálculo do consumo das cargas.....	75
4.2.4.	Valor da corrente .....	76
4.2.5.	Dimensionamento do Banco de Baterias.....	76
4.2.6.	Determinação dos painéis fotovoltaicos.....	78
4.2.7.	Determinação do Inversor .....	79
4.2.8.	Determinação do Controlador de carga.....	79
4.3.	Instalação.....	80
4.3.1.	Recomendações gerais sobre segurança.....	80
4.3.2.	Locação dos painéis fotovoltaicos.....	81
4.3.3.	Orientação dos painéis fotovoltaicos.....	81
4.3.4.	Suporte de sustentação dos painéis fotovoltaicos.....	82
4.3.5.	Montagem do banco de baterias .....	84
4.3.6.	Montagem e posicionamento do painel de controle e proteções.....	85
5.	ESTUDO DE CASOS E APLICAÇÃO DA METODOLOGIA .....	86
5.1.	Introdução.....	86
5.2.	Projeto residencial .....	87
5.3.	Calculo da radiação solar extraterrestre.....	91
5.4.	Influencia do índice de irradiação e da temperatura no rendimento dos módulos ...	91
5.5.	Exemplo de Dimensionamento.....	96
5.5.1.	Exemplo1 .....	96
5.5.2.	Exemplo 2.....	102
6.	CONCLUSÕES E SUJESTÕES PARA PROJETOS FUTUROS.....	108
6.1.	Conclusões.....	108

## Sumário

---

6.2. Sugestões para trabalhos futuros .....	110
BIBLIOGRAFIA .....	111
ANEXOS.....	117
I - Programa para cálculo da distância entre o Sol e a Terra.....	118
II - Programa para cálculo da variação em função da distância entre o Sol e a Terra.....	119
III - Programa para cálculo da declinação.....	120
IV - Resolução nº 112, de 18 de maio de 1999.....	125
V - Características de equipamentos fornecidas por fabricantes.....	132
VI - Cálculo do valor da irradiação topo da atmosfera.....	146

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 2.1 – Terra para escala.....	6
Figura 2.2 – Camadas do Sol.....	8
Figura 2.3 – Estações do ano.....	9
Figura 2.4 - Solstício de Verão no hemisfério norte.....	10
Figura 2.5 - Equinócio.....	11
Figura 2.6 - Ângulo de Inclinação.....	15
Figura 2.7 - Espectro Eletromagnético.....	18
Figura 2.8 - Trajetória dos raios na atmosfera e definição do coeficiente de "Massa de Ar" (AM).....	22
Figura 2.9 - Massa de Ar.....	23
Figura 2.10 - Incidência sobre a Terra.....	24
Figura 2.11 - Piranômetro de Segunda Classe.....	27
Figura 2.12 - Medição da Radiação Difusa.....	27
Figura 2.13 - Pireliômetro de Cavidade Absoluta.....	27
Figura 2.14 - Pireliômetro de Incidência Normal.....	28
Figura 2.15 - Heliógrafo Capbell-Stokes.....	28
Figura 2.16 - Actinógrafo Robitzsch-Fuess.....	29
Figura 3.1 - Componentes e configurações do sistema fotovoltaico.....	31
Figura 3.2 - Estrutura de uma célula de silício convencional.....	37

Figura 3.3 - Característica I-V de iluminação.....	40
Figura 3.4 - Ponto de Máxima Potência.....	42
Figura 3.5 - Variação do ponto de máxima potência e do fator de forma no intervalo de valores das células utilizadas na prática.....	44
Figura 3.6 - Variação dos parâmetros de funcionamento com a temperatura.....	49
Figura 3.7 - Dependência da característica corrente x tensão com a temperatura.....	50
Figura 3.8 - Dependência da característica potência x tensão com a temperatura.....	51
Figura 3.9 - Características I-V de células fotovoltaicas ideais com diferentes níveis de iluminação.....	52
Figura 3.10 - Potência x tensão para uma célula fotovoltaica para quatro níveis de iluminação.....	53
Figura 4.1 - Radiação solar média diária mensal.....	73
Figura 4.2 - Tipos de estruturas para painéis solares.....	83
Figura 3.3 - Interligações entre baterias .....	85
Figura 5.1 - (a) Variação da potência do módulo com a variação da temperatura, (b) zoom de (a).....	93
Figura 5.2 - (a) Variação da corrente do módulo com a variação da temperatura, (b) zoom de (a).....	93
Figura 5.3 - (a) Variação da potência do módulo com a variação do índice de irradiação, (b) zoom de (a).....	95
Figura 5.4 - (a) Variação da corrente do módulo com a variação do índice de irradiação, (b) zoom de (a).....	95
Figura I.1 - Distância entre o Sol e a Terra.....	118
Figura II. 1 - Variação da Constante Solar.....	119

## Índice de Figuras

---

Figura III. 1 - Declinação.....	120
Figura VI.1 - Irradiação no topo da Atmosfera para cidade de Uberlândia.....	146
Figura VI. 2 - Ângulo Horário para cidade de Uberlândia.....	146
Figura VI. 3 - Horas de sol por dia para cidade de Uberlândia.....	147
Figura VI. 4 - Irradiação para todas latitudes no dia 205.....	147
Figura VI. 5 - Irradiação Horária no topo da Atmosfera para cidade de Uberlândia no dia 10.....	148
Figura VI. 6 - Irradiação Horária no topo da Atmosfera para cidade de Uberlândia no dia 110 - 20 de Abril.....	148
Figura VI. 7 - Irradiação Horária no topo da Atmosfera para cidade de Uberlândia no dia 24 de Junho.....	149
Figura VI. 8 - Irradiação Horária no topo da Atmosfera para cidade de Uberlândia no dia 253 - 10 de Setembro.....	150
Figura VI. 9 - Irradiação Horária no topo da Atmosfera para cidade de Uberlândia no dia 324 - 20 de Novembro.....	151

**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Período de Claridade .....	11
Tabela 2.2 - Datas das Estações do Ano para os Hemisfério Terrestres .....	12
Tabela 2.3 – Tipo de comprimento de onda .....	18
Tabela 3.1- Características dos tipos de baterias .....	54
Tabela 3.2 - Comparativo entre Inversores com diferentes formas de Onda. ....	61
Tabela 3.3 – Comparativo entre lâmpadas fluorescente PL e incandescente .....	65
Tabela 3.4 – Potencia disponíveis para os diversos tipos de lâmpadas .....	66
Tabela 5.1 - Quadro de cargas solicitadas .....	88
Tabela 5.2 - Oscilação dos parâmetros das placas fotovoltaicas com a variação da temperatura.....	94
Tabela 5.3 – Oscilação dos parâmetros da placa fotovoltaica com a variação do índice de irradiação.....	96
Tabela 5.4 - Exemplo1 de cargas solicitadas.....	97
Tabela 5.5 - Cargas CC - Sistema 1 .....	103
Tabela 5.6 - Cargas CA - Sistema 2 .....	103
Tabela 5.7 - Dados de Placa SM50 obtidos do programa POTPLACA com variação do .....	103

## Índice de Tabelas

---

índice de irradiação.....	103
Tabela 5.8 - Resultados Simulação Sistema 1.....	104
Tabela 5.9 - Resultados Simulação Sistema 2.....	104
Tabela 5.10 -Resultados Dimensionamento Sistemas 1 e 2.....	105
Tabela 5.11 - Resultados Comparando valores com baterias diferentes para o.....	106
Tabela 5.12 - Resultado de Simulação do Sistema 1 Placa SM50 com variação da Irradiação.....	106
Tabela 5.13 - Dimensionamento para o Sistema 1 Placa SM50 com irradiação de 1000W/m <sup>2</sup> .....	107
Tabela 5.14 - Valor do Sistema utilizando Placa SM50 com variação da Irradiação.....	107
Tabela III.1 – Ângulo de declinação.....	121
Tabela V.1 – Características placas Shell Solar.....	132
Tabela V.2 – Preços de placas.....	133
Tabela V.3 – Características de Placas BP Solar.....	134
Tabela V.5 – Características de Placas ISOFOTON.....	135
Tabela V.6 – Baterias Moura.....	136
Tabela V.7 – Baterias Estacionárias Delphi.....	137
Tabela V.8 – Preços e Características de Controladores.....	138
Tabela V.9 – Preços de Inversores.....	139
Tabela V.10 – Inversores Jazz - Xantrex.....	140
Tabela V.11 – Inversores Jazz - Xantrex.....	141
Tabela V.12 – Inversores PortaWattz.....	141
Tabela V.13 – Características Inversores IZZY POWER.....	142
Tabela V.14 – Geladeiras e Freezers.....	143

## Índice de Tabelas

---

Tabela V.15 – Refrigerador - Modelo RE 080:.....	143
Tabela V.16 – Refrigerador - Modelo RE 120.....	144
Tabela V.17 – Refrigerador Vertical - RE 240:.....	144
Tabela V.18 – Consumo de aparelhos.....	145
Tabela VI.1 – Dados da Figura VI.5.....	148
Tabela VI.2 – Dados da Figura VI.6.....	149
Tabela VI.3 – Dados da Figura VI.7.....	149
Tabela VI.4 – Dados da Figura VI.8.....	150
Tabela VI.5 – Dados da Figura VI.9.....	151

## **LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

A	área total;
$A_M$	área do painel;
AmpDesc	amplitude de descarga [ - ];
Bat	reserva ou capacidade da bateria em [Watth];
Bat(Ah)	reserva da bateria em Ah;
BatPar	quantidade de baterias em paralelo;
BatSer	quantidade de baterias em série;
C1	coeficiente de segurança para perdas [ - ];
CBS	capacidade nominal da bateria selecionada [Ah];
Cons1	consumo para cargas de corrente-contínua [Watt];
Cons2	consumo para cargas de corrente alternada [Watt];
ConsTot	consumo total [Watt];
ConsTotal	consumo total [Watt];
D	número de dias independentes [ - ];
$e$	é a carga do elétron [C];
EfCon	eficiência do conversor CC-CA [%/100];
$E_{GO}$	largura da banda proibida a 0 Kelvin [K];
FF	é o fator de forma [ - ];
$G_{0,J}$	irradiância extraterrestre média diária;
$G_{0,J}$	é a irradiação no plano horizontal incidente no dia $J$ no topo da atmosfera [W/m <sup>2</sup> ];
$G_{SC}$	é a constante solar = 1.367 [W/m <sup>2</sup> ];
H	duração do dia solar, é o período de visibilidade do Sol ou de claridade [h];
h	número de horas de funcionamento do equipamento [h];
Itotal	corrente total em Ah por dia [Ah];

I	é a corrente elétrica [A];
$I_0$	é a corrente de saturação reversa do diodo no escuro [A];
$I_1$	corrente das cargas CC [Ah];
$I_2$	corrente das cargas CA [Ah];
$I_{Bat}$	corrente da Bateria [A];
$I_{carga}$	corrente da carga [A];
$I_{conv}$	corrente do conversor [A];
$I_D$	é a corrente elétrica de obscuridade, gerada devido à recombinação de portadores que produzem a tensão necessária para poder entregar energia a carga [A];
$I_L$	é a corrente elétrica produzida devido a geração de portadores pela iluminação [A];
$I_M$	corrente no ponto de potência máxima [A];
$I_{painel}$	corrente do painel [A];
$I_{sc}$	é a corrente de curto-circuito [A];
$I_{scMS}$	corrente nominal da placa escolhida [A];
$I_{total}$	corrente total das cargas [A];
J	dia Juliano - dia do ano: 1 a 365;
k	é a constante de Boltzmann [J/K];
K	é o fator de correção da forma da curva característica [ $\Omega/^\circ\text{C}$ ];
kWh/m <sup>2</sup>	quilowatt hora por metro quadrado;
m	é o fator de idealidade do diodo[-];
M	número total de painéis;
m <sup>2</sup>	metros quadrados – unidade de área;
MJ/m <sup>2</sup>	mega joule por metro quadrado;
$M_p$	número de painéis em paralelo;
$M_s$	número de painéis em série;
$M_s$	número de painéis em série;
N	número de horas que o Sol ficará acima do horizonte da superfície [h];
$N_{bat}$	número total de baterias;
$^\circ\text{C}$	graus Celsius – unidade de temperatura;
P	é a Potência [W];
$P_L$	é a potencia de radiação solar incidente sobre o dispositivo [W];

$P_M$	é a potencia máxima do módulo [W];
$R$	distancia entre o Sol e a Terra para cada dia do ano [Km].
$R_0$	$1,495 \times 10^8$ , é a distância média entre o Sol e a Terra [Km];
$R_S$	é a resistência série [ $\Omega$ ];
$T$	é a temperatura absoluta da célula fotovoltaica [ $^{\circ}\text{C}$ ];
$ua$	unidade astronômica;
$V$	é a tensão elétrica [V];
$Var_{SC}$	da constante solar ao longo do ano [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];
$V_{bat}$	tensão nominal da bateria [V];
$V_{carga}$	tensão da carga [V];
$V_M$	tensão no ponto de potência máxima [V];
$V_{oc}$	é a tensão em circuito aberto [V];
$V_{painel}$	tensão do painel [V];
$VS$	tensão nominal do sistema [V];
$w$	ângulo horário;
$\text{W}/\text{m}^2$	watt por metro quadrado;
$w_{nas}$	nascer do sol;
$w_{por}$	por do sol;
$\delta$	declinação;
$\eta$	é a Eficiência da Conversão Energética de uma célula solar [ - ];
$\theta$	é a distância angular entre o feixe solar e a vertical no local de incidência;
$\theta_z$	ângulo zenital, representa o angulo entre a vertical e a linha do Sol (Zênite)
Graus - $^{\circ}\text{C}$ ];	
$\Phi$	a latitude local [Graus - $^{\circ}\text{C}$ ];
$\omega$	angulo horário é a localização angular do Sol a leste ou oeste do meridiano local devido à rotação da Terra sobre seu eixo em $15^{\circ}$ por hora [Graus - $^{\circ}\text{C}$ ];
$\omega_{nas}$	ângulo horário ao nascer do Sol;
$\omega_{por}$	ângulo horário ao pôr do Sol.

**CAPÍTULO I**  
**INTRODUÇÃO**

A geração de energia elétrica através do sol é uma das diversas maneiras de aproveitar-se da energia solar em benefício do homem, através de seu processo denominado “efeito fotovoltaico” uma das células fotovoltaicas obtidas a partir do silício (material abundante na natureza), por exemplo, absorvem partículas de fótons existentes nos raios solares e as convertem em energia elétrica contínua para ser utilizada no acionamento de diversos dispositivos elétrico-eletrônicos.

Quando se trata de Brasil não se pode esquecer que a principal característica do seu sistema elétrico de potência é a utilização de grandes usinas, centralizando a geração de energia elétrica, com o transporte desta através de extensas redes de transmissão e distribuição, que acarreta num acréscimo das perdas nestas redes devido às longas distâncias entre os locais de geração e consumo. Neste sentido, tem surgido uma nova opção, denominada Geração Distribuída, na qual os geradores são situados próximos dos consumidores, oferecendo para as concessionárias um meio de aumentar a disponibilidade de energia localmente, eliminando o inconveniente do transporte desta para os centros consumidores.

E esta nova alternativa de geração oferece algumas vantagens, como suporte de tensão através do fornecimento de energia reativa local, melhoria da qualidade de suprimento, redução das perdas, melhoria do fator de potência, liberação da capacidade de atendimento, possibilidade de ilhamento para atendimento de carga local, melhoria na curva de carga, redução nos custos de expansão da rede e a prorrogação de novos investimentos para a construção de grandes usinas. A conversão solar fotovoltaica é uma das formas de energia alternativa que substituirá os métodos convencionais de geração de eletricidade, em sua geração não ocorre nenhum tipo de poluição, não consome combustíveis e permite sua auto-suficiência energética.

O uso de sistemas fotovoltaicos tem ganhado impulso em regiões onde o acesso à energia elétrica convencional é ainda economicamente inviável, principalmente na zona rural, porém, tem-se intensificado muito a pesquisa do sistema conectado a rede elétrica. Nas políticas de desenvolvimento rural, o fornecimento da energia elétrica sempre é posta como requisito essencial para a modernização e progresso da zona rural, pelo menos no seu objetivo mais fundamental, ou seja, atender, inicialmente, as necessidades básicas daquelas populações. E para atender a essas necessidades básicas e com qualidade de fornecimento e economia é necessário que seja feito um bom dimensionamento do sistema a ser implantado no local.

Esses sistemas podem ser utilizadas em eletrificação de residências, telecomunicações, suprimento de água potável e irrigação, subestações energéticas, refrigeração, iluminação pública, sinalização/bóias marítimas, proteção catódica contra corrosão em tubulações, cercas elétricas, dentre outras. Sendo cada vez mais pesquisadas novas aplicações para esse tipo de energia como, por exemplo, os carros solares e até aviões.

Seu rendimento é dependente do índice de radiação, temperatura, quantidade de nuvens, quantidade de partículas no ar, dentre outros. Possuem custo de investimento elevado, o rendimento real de conversão de um modula é reduzido face ao custo do investimento; as células fotovoltaicas necessitam de tecnologia sofisticada para sua fabricação.

Dimensionar um sistema significa, neste trabalho, conciliar, harmonizando da melhor forma possível, a geração da energia com o seu respectivo consumo, minimizando suas falhas, os custos dos sistemas e os gastos com sua manutenção. Para tal, é necessário modelar a oferta, a demanda e a capacidade de armazenamento energético de forma a garantir o abastecimento da carga com uma probabilidade conhecida do sistema apresentar falhas.

Para isso é imprescindível que as pessoas que de alguma forma estão ligados à utilização da tecnologia fotovoltaica tenham conhecimento do estado da arte da tecnologia solar fotovoltaica, como ela surgiu, como seu mercado evoluiu até os dias de hoje e quais são suas perspectivas futuras, as características elétricas das placas fotovoltaicas, analisar a influência da temperatura e do índice de radiação solar e os detalhes de funcionamento dos componentes que a transformam em eletricidade no desempenho desses sistemas, assim como fazer análise econômica para um dimensionamento mais preciso.

O objetivo deste trabalho foi gerar um programa computacional, com metodologia e linguagem apropriadas, para auxiliar na análise e no projeto de sistemas fotovoltaicos destinados ao suprimento de pequenas cargas. Foi utilizada a linguagem Matlab por fornecer um resultado final simples e eficiente, tornando o programa acessível a pessoas que não possuam algum conhecimento em dimensionamentos fotovoltaicos.

O capítulo 2 descreve de forma bem sucinta as principais características do Sol e sua produção de energia radiante e algumas das características Sol-Terra.

O capítulo 3 descreve quais são os principais componentes de um sistema fotovoltaico autônomo e suas principais características.

No capítulo 4 é feita análise para projeto, como são feitos os cálculos e fala sobre a montagem dos equipamentos.

No capítulo 5 é realizado estudo de casos e aplicação da metodologia para o dimensionamento dos equipamentos através de programas computacionais.

No capítulo 6 está descrita as conclusões e as sugestões para futuros trabalhos.

## CAPÍTULO II

### ENERGIA QUE VEM DO SOL

#### 2.1. Introdução

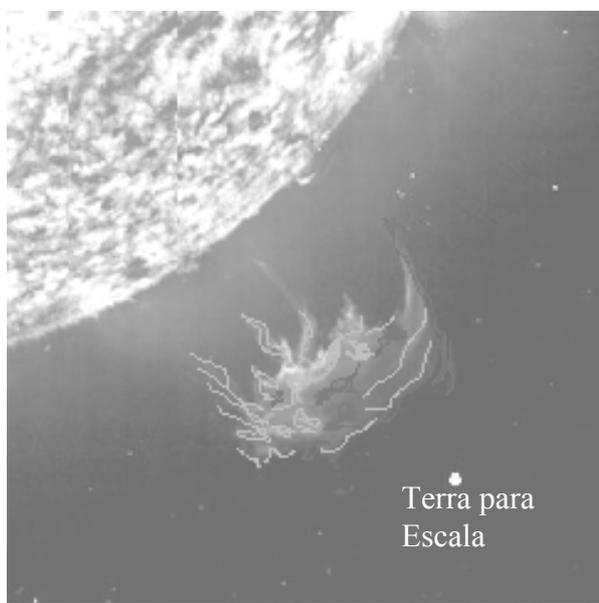
A energia solar pode ser uma fonte inesgotável de energia, podendo representar uma solução para parte dos problemas de escassez de energia no mundo. Nos países subdesenvolvidos, como o Brasil, esta fonte de energia pode ser bem aproveitada, haja visto que esses países apresentam elevadas extensões territoriais e estão situados em zonas tropicais, ou seja, dispõem de alta incidência de radiação, o que torna viável o desenvolvimento de tecnologias capazes de transformar a energia solar em energia térmica, elétrica, química, mecânica etc.

Quase todas as fontes de energia – hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos – são formas indiretas de energia solar. Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, através de efeitos sobre determinados materiais, que é o fotovoltaico e indiretamente, destacando-se o termelétrico.

## 2.2. Características do Sol

O Sol é a principal fonte de energia para a vida na Terra, emitindo radiações eletromagnéticas e corpusculares, cuja quantidade e variabilidade caracterizam o seu grau de atividade em *estável* ou *ativo*. Quase a totalidade da energia do Sol é emitida na forma de radiação eletromagnética. A radiação corpuscular, na forma de partículas do vento solar que é um fluxo tênue de gás e partículas energéticas carregadas, principalmente prótons e elétrons - plasma - que são continuamente liberadas pelo Sol. As velocidades típicas do vento solar estão perto de 350 km por segundo chegando em alguns casos a cerca de 800 km por segundo.

O Sol é a maior estrela e a mais proeminente do sistema solar, e que contém aproximadamente 98% de sua massa total do Sistema Solar. Cento e nove Terras seriam necessárias para cobrir o disco do Sol, e em seu interior caberiam 1,3 milhões de Terras, a Figura 2.1 dá uma idéia da relação de escala entre o Sol e a Terra.



**Figura 2.1. - Terra para escala**

O Sol é uma massa de gases flutuantes, composta basicamente de hidrogênio e hélio. O Sol aparentemente está ativo por 4,6 bilhões de anos e tem combustível suficiente para

continuar por aproximadamente mais cinco bilhões de anos [Maciel,1991], sendo que no fim de sua vida, começará a fundir o hélio em elementos mais pesados e se expandirá, crescendo a um tamanho tão grande que engolirá a Terra. Após um bilhão de anos como uma gigante vermelha, ele rapidamente colapsará em uma anã branca que é o produto final de uma estrela típica do nosso sistema solar e pode levar um trilhão de anos para ele se esfriar completamente.

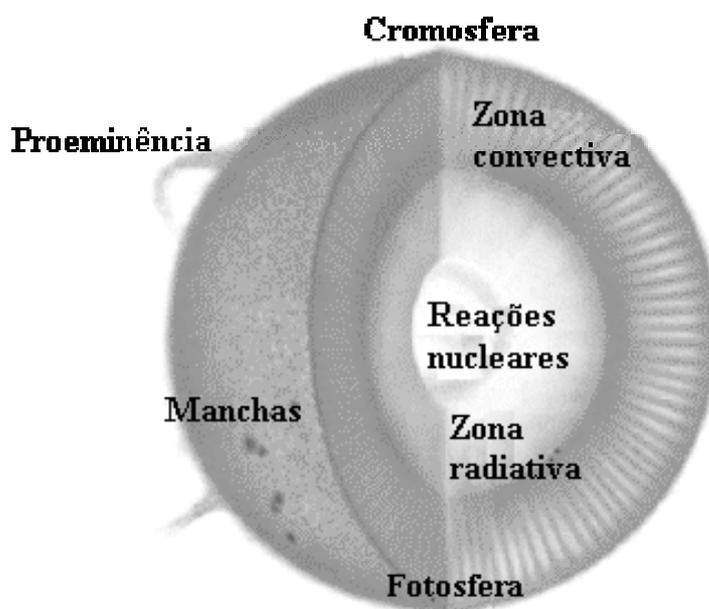
A energia solar é gerada no núcleo do Sol. Lá, a temperatura ( $15.000.000^{\circ}\text{C}$ ) e a pressão (340 bilhões de vezes a pressão atmosférica da Terra ao nível do mar) são tão intensas que ocorrem reações nucleares. Estas reações transformam quatro prótons ou núcleos de átomos de hidrogênio em uma partícula alfa, que é o núcleo de um átomo de hélio. A partícula alfa é aproximadamente 0,7% menos massiva do que quatro prótons. A diferença em massa é expelida como energia e carregada até a superfície do Sol, através de um processo conhecido como convecção e é liberada em forma de luz e calor.

A energia gerada no interior do Sol leva um milhão de anos para chegar à sua superfície, sendo que a cada segundo 700 milhões de toneladas de hidrogênio são convertidos em *cinza* de hélio. Durante este processo 5 milhões de toneladas de energia pura são liberados; portanto, com o passar do tempo, o Sol está se tornando mais leve.

Este processo já ocorre há milhões de anos no núcleo do sol para a sua superfície, de onde é emanada em todas as direções, levando cerca de oito minutos para chegar ao planeta terra, que está a quase 150 milhões de quilômetros de distância. A energia solar viaja no espaço a velocidade da luz que é de  $300.000\text{ Km/s}$ .

A atividade solar é um reflexo dos processos magnéticos que ocorrem no interior do Sol e os seus efeitos podem ser observados tanto na superfície do Sol como na Terra. Essa atividade não é uniforme: existem fases de "Sol calmo", quando essa atividade é mínima, e

"Sol ativo", quando se registra grande número de fenômenos na sua atmosfera. A variação da atividade solar durante um período de 11 anos é chamada "ciclo solar".



*Figura 2.2. - Camadas do Sol*

A energia solar vem das reações nucleares que ocorrem em seu centro percorrem varias camadas do Sol, as quais podem ser observadas na Figura 2.2, passa pela zona radiativa, pela fotosfera (superfície visível do Sol) e pela cromosfera. As manchas (faculae) e as explosões (flares) se levantam da cromosfera, sendo que “faculae” são nuvens brilhantes de hidrogênio que aparecem em regiões onde manchas solares logo se formarão e as “flares” são filamentos brilhantes de gás quente que emergem das regiões das manchas. As manchas solares são depressões escuras na fotosfera com uma temperatura típica em sua superfície de 3.000K enquanto ao seu redor chega a 6.000K.

A coroa é a parte mais externa da atmosfera do Sol, sendo nesta região que as *proeminências* aparecem. Proeminências são imensas nuvens de gás aquecido e brilhante que explodem da alta cromosfera.

## 2.3. Movimento da Terra ao Redor do Sol

### 2.3.1. Estações do ano

A Terra executa um movimento de revolução ao redor do Sol numa órbita elíptica, a qual é muito próxima de uma circunferência, em um período denominado de ano, sendo que o plano que contém essa órbita é chamado Plano da Eclíptica.

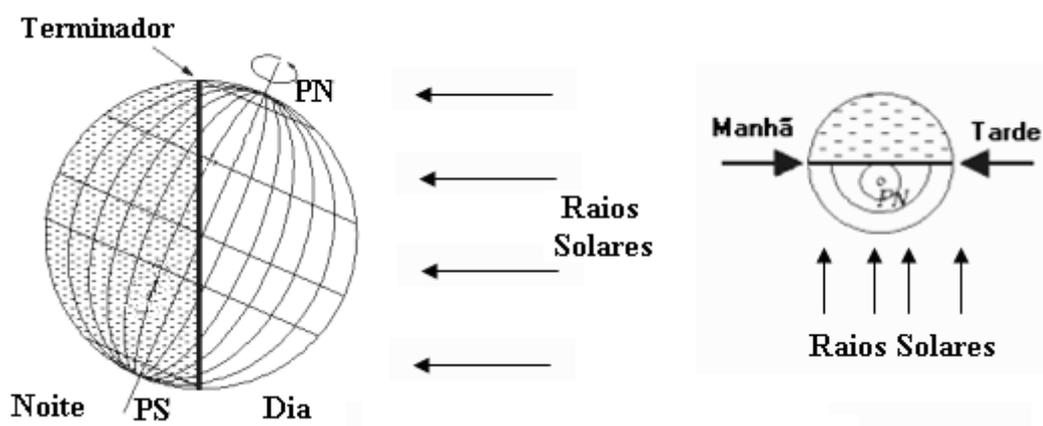


*Figura 2.3. - Estações do ano*

Ao mesmo tempo, realiza um movimento de rotação em torno de si mesma, de forma a completar uma volta em um período definido de dia. Esse eixo faz com o plano da eclíptica um ângulo de  $66^{\circ} 33'$  e conseqüentemente forma um ângulo de  $23^{\circ} 27'$  em relação à perpendicular ao plano da eclíptica. Por esse motivo, os raios solares atingem um mesmo ponto do planeta com diferentes inclinações em diferentes épocas do ano formando assim o que chamamos de Estações do Ano. Ao todo são quatro, Primavera, Verão, Outono e Inverno, que podem ser observadas na Figura 2.3.

### 2.3.2. Os Solstícios

Os solstícios correspondem às épocas do ano em que os hemisférios norte e sul da Terra são desigualmente iluminados, como na Figura 2.4 e ocorrem nas seguintes datas:



**Figura 2.4. - Solstício de verão no hemisfério norte.**

21 de Dezembro – Marca o solstício de verão no hemisfério sul. É a época em que o sol encontra-se na altura do Trópico de Capricórnio, sendo, portanto, verão no hemisfério Sul. Os dias são mais longos e as noites mais curtas (inclinação da Terra). No hemisfério norte ocorre o inverso, ou seja, dias mais curtos e noites mais longas.

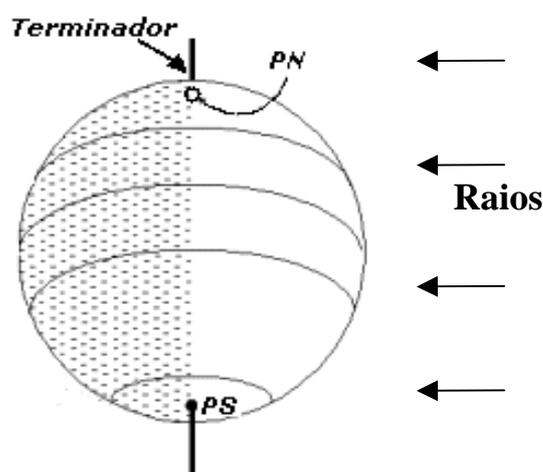
21 de Junho – É o solstício de verão no hemisfério norte. O sol encontra-se na altura do Trópico de Câncer, ocasionando o verão, época de dias mais longos e noites mais curtas. No hemisfério Sul ocorre o inverso, ou seja, dias mais curtos e noites mais longas.

### 2.3.3. Os Equinócios

Os equinócios correspondem às épocas do ano em que os hemisférios norte e sul são igualmente iluminados, como na Figura 2.5. Ocorrem nas datas:

21 de Março – Assinala o início do outono no hemisfério sul e o início da primavera no hemisfério norte. Nessa data, o Sol está incidindo na altura do Equador, acarretando igual duração dos dias e das noites nos dois hemisférios.

23 de Setembro – Marca o início da primavera no hemisfério sul e outono no hemisfério norte. O sol encontra-se novamente na altura do Equador, propiciando igual duração dos dias e das noites nos dois hemisférios.



*Figura 2.5. - Equinócio*

O período de claridade para as estações do ano podem ser vistas na Tabela 2.1.

*Tabela 2.1 - Período de Claridade*

Solstício de Verão	Período de claridade mais longo do ano.
Solstício de Inverno	Menor período de claridade do ano.
Equinócio de Primavera	Igual período de claridade e de escuridão.
Equinócio de Outono	Igual período de claridade e de escuridão.

Cada uma das Estações do Ano possui uma data específica que marca o seu início. A partir do deslocamento do Sol, ao longo da linha de horizonte, essa data está definida na Tabela 2.2.

***Tabela 2.2 - Datas das Estações do Ano para os Hemisfério Terrestres***

Hemisfério Sul	Data de Início entre os Dias	Hemisfério Norte
Equinócio de Primavera	22 e 23 de setembro	Equinócio de Outono
Solstício de Verão	21 a 23 de dezembro	Solstício de Inverno
Equinócio de Outono	20 e 21 de março	Equinócio de Primavera
Solstício de Inverno	21 a 23 de junho	Solstício de Verão

## **2.4. Radiação Solar**

### **2.4.1. A radiação solar no topo da atmosfera**

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar que é uma camada tênue com aproximadamente 300 km. Porém, esta radiação não se apresenta como um modelo de regularidade, pois há a influência das camadas externas do Sol (cromosfera e coroa), com pontos quentes e frios, erupções cromosféricas, etc. Essa irregularidade é inferior a 1,5%, e pode-se dizer então, com razoável precisão, que a radiação incidente no topo da atmosfera depende apenas da distância entre o Sol e a Terra.

Apesar disto, pode-se definir um valor médio para o nível de radiação solar incidente normalmente sobre uma superfície situada no topo da atmosfera. Dados da WMO (World Meteorological Organization) indicam um valor médio de  $1367 \text{ W/m}^2$  denominado constante solar (*constante solar* é definida como sendo o fluxo radiante que incide em uma superfície unitária, perpendicularmente ao feixe da radiação solar, a uma distância média entre a Terra e o Sol, uma unidade astronômica - *ua*) para a radiação extraterrestre [Lorenzo,1994], [Johnson,

1954]e [Duncan, 1982]. Fórmulas matemáticas permitem o cálculo, a partir da "Constante Solar", da radiação extraterrestre ao longo do ano, fazendo a correção pela órbita elíptica.

Lembrando que o Sol emite a radiação eletromagnética em todas as direções, isotropicamente, isto faz com que a intensidade da radiação solar diminua quadraticamente com o aumento da distância Terra-Sol. Devido à excentricidade da órbita terrestre a distância Terra-Sol varia cerca de 5% (ver Anexo 1), podemos calcular a distância entre o Sol e a Terra pela Equação 2.1.

$$R = R_0 \cdot \left\{ 1 - \left[ 0,0167 \cdot \cos \left( \frac{360 \cdot J}{365} \right) \right] \right\} \quad (2.1)$$

onde:

- $J$  é o dia Juliano, sendo 1 o 1º de Janeiro e 365 o 31 de Dezembro (ver Anexo3);
- $R_0 = 1,495 \times 10^8$ , é o raio médio entre o Sol e a Terra [Km];
- $R$  = distancia entre o Sol e a Terra para cada dia do ano [Km].

- A distância menor se dá no final de Junho e início de Julho  $1,47 \times 10^8$  [Km].
- A distância maior se dá no final de Dezembro e início de Janeiro  $1,52 \times 10^8$  [Km].

Irradiância extraterrestre média diária,  $G_{0,J}$ , é o fluxo de radiação incidente em uma superfície unitária, disposta perpendicularmente ao feixe, localizada no topo da atmosfera terrestre à distância de 1 *ua.* do Sol, em um determinado dia. Para se estabelecer o seu valor, utiliza-se a “constante solar”,  $G_{SC}$ , e o dia do ano. Sabe-se ainda que a irradiância sobre uma superfície normal à direção dos raios solares varia inversamente com o quadrado da distância entre a superfície e o Sol. Para um dia qualquer do ano,  $J$ , a irradiância fora da atmosfera pode ser calculada através da Equação 2.2, ao desprezar o termo da segunda ordem temos a Equação 2.4:

$$G_{0,J} = G_{SC} \cdot \left\{ 1 + \left[ 0,0167 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot J}{365}\right) \right]^2 \cdot \cos \theta_Z \right\} \quad (2.2)$$

$$\cos \theta_Z = \cos \phi \cdot \cos \omega \cdot \cos \delta + \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \delta \quad (2.3)$$

$$G_{0,J} = G_{SC} \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot J}{365}\right) \right] \cdot (\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \delta) \quad (2.4)$$

$$\text{Var}_{SC} = \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot J}{365}\right) \right] \quad (2.5)$$

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[ 360 \cdot \left( \frac{284 + J}{365} \right) \right] \quad (2.6)$$

onde:

- $G_{SC}$  = é a constante solar = 1.367 [W/m<sup>2</sup>];
- $G_{0,J}$  = é a irradiação no plano horizontal incidente no dia  $J$  no topo da atmosfera [W/m<sup>2</sup>];
- $J$  = dia Juliano;
- $\theta_Z$  = ângulo zenital, representa o angulo entre a vertical e a linha do Sol (Zênite) [Graus - °C];
- $\omega$  = angulo horário é a localização angular do Sol a leste ou oeste do meridiano local devido à rotação da Terra sobre seu eixo em 15° por hora [Graus - °C];
- $\delta$  = declinação, posição angular de inclinação da órbita da Terra em torno do Sol, em relação ao equador da Terra que varia entre -23°27' e 23°27' [Graus - °C];
- $\Phi$  = a latitude, localização norte ou sul do equador [Graus - °C];
- $\text{Var}_{SC}$  = da constante solar ao longo do ano [W/m<sup>2</sup>];
- 23,45 = 23°27'

A expressão  $\text{Var}_{SC}$  nos dá a variação da constante solar ao longo do ano, cuja diferença se dá devido a variação da distancia entre o sol e a terra, provocado pelo movimento

de translação (ver Anexo 2). A Equação 2.5 determina a quantidade de energia incidente em uma superfície unitária horizontal situada no topo da atmosfera. Esta expressão fornece o resultado em MJ/m<sup>2</sup> caso G<sub>sc</sub> seja dado em W/m<sup>2</sup>. Se for necessário obter o resultado em kWh/m<sup>2</sup>, basta dividir o resultado obtido por 3,6. E se G<sub>sc</sub> seja dado em W/m<sup>2</sup> e queira o resultado em kWh/m<sup>2</sup>, basta multiplicar a expressão por 24.

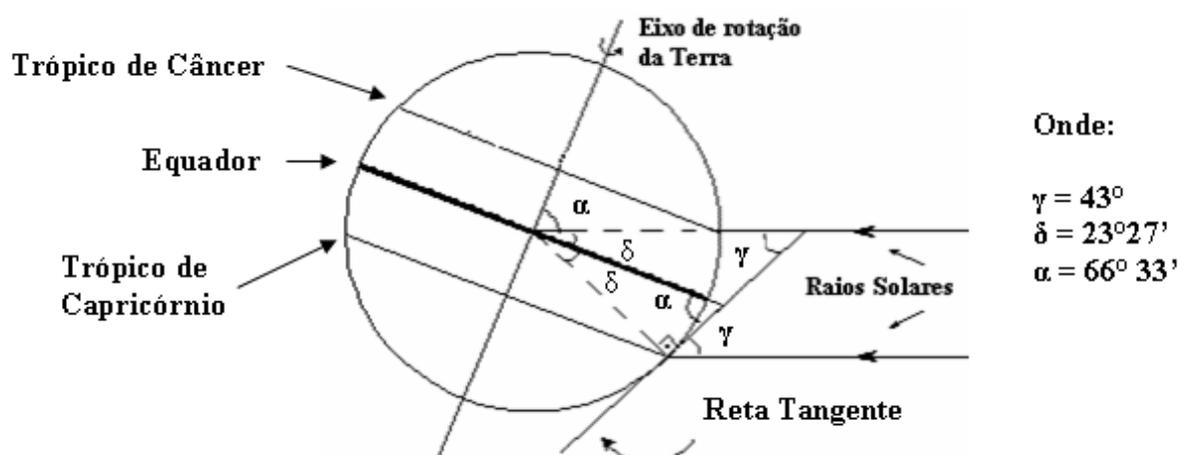


Figura 2.6. - Ângulo de declinação

Deve-se considerar que a declinação durante o dia é constante, pois a mesma no prazo de 24 horas não passa de 0,5°. A Figura 2.6 caracteriza o ângulo de Declinação.

Define-se então como irradiância extraterrestre média diária,  $G_{0,d}$ , como sendo o fluxo de radiação incidente em uma superfície unitária, localizada no topo da atmosfera terrestre à distância de 1 *ua.* do Sol, em determinado dia.

DUFFIE e BECKMAN (1991) desenvolveram a metodologia de cálculo da radiação extraterrestre em cada dia do ano (a radiação solar extraterrestre horária, integrada para as horas entre o nascer e o pôr do Sol).

Pode-se estimar a radiação extraterrestre instantânea sobre qualquer plano pela equação:

$$G_{0,J} = G_{SC} \left[ \cos \phi \cdot \cos \delta + \sin \phi \cdot \sin \delta \cdot \cos \left( \frac{h-12}{15^\circ} \right) \right] \quad (2.7)$$

onde:

-  $\Phi$  = latitude do local;

-  $\delta$  = declividade para o dia especificado.

-  $h$  = duração do dia solar, é o período de visibilidade do Sol ou de claridade – varia, em algumas regiões e períodos do ano, de zero hora (Sol abaixo da linha do horizonte durante o dia todo) a 24 horas (Sol sempre acima da linha do horizonte). As variações são mais intensas nas regiões polares e nos períodos de solstício. O inverso ocorre próximo à linha do Equador e durante os equinócios, quando a duração solar do dia é igual à duração da noite em toda a Terra.

Portanto, o número de horas que o Sol ficará acima do horizonte da superfície em questão,  $N$ , ou seja, o comprimento em horas do dia é dado pela seguinte fórmula:

$$N = \left( \frac{2}{15} \right) \cdot \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \phi) \quad (2.8)$$

onde:

$N$  = de horas que o Sol ficará acima do horizonte da superfície [h];

-  $\Phi$  = latitude do local;

-  $\delta$  = declividade para o dia especificado.

O *ângulo horário*,  $\omega$ , é a distância angular entre o feixe solar e o meridiano local.  $\omega$  é considerado negativo no período da manhã (Sol antes do meridiano local), e positivo no período da tarde. Cada hora do dia corresponde a uma variação de  $15^\circ$  em  $\omega$ .

$$\omega = \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \phi) \quad (2.9)$$

$$\omega_{nas} = 12 - \frac{N}{2} \quad (2.10)$$

$$\omega_{por} = 12 + \frac{N}{2} \quad (2.11)$$

onde:

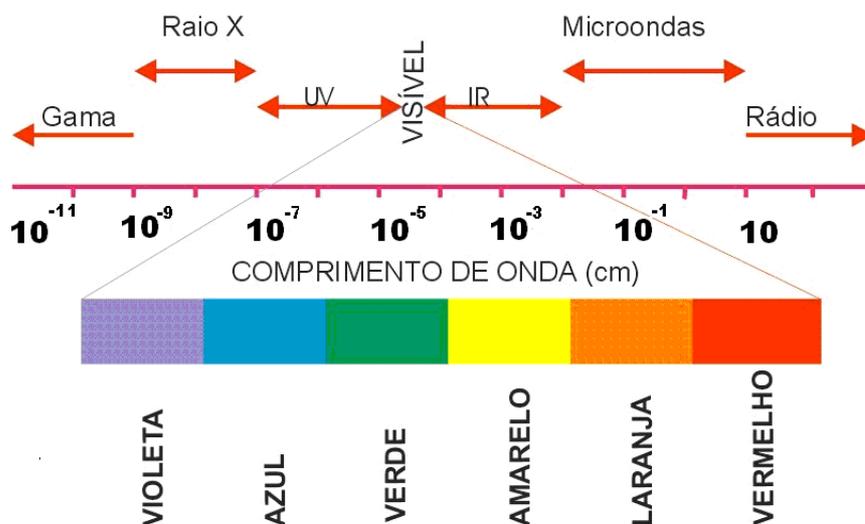
- $\omega$  = ângulo horário;
- $\omega_{nas}$  = ângulo horário ao nascer do Sol;
- $\omega_{por}$  = ângulo horário ao pôr do Sol;
- N = de horas que o Sol ficará acima do horizonte da superfície [h];
- $\Phi$  = latitude do local;
- $\delta$  = declividade para o dia especificado.

Faz-se então a correção do fuso horário, usando-se uma interpolação matemática, onde uma hora corresponde a 15°. Sabendo-se a longitude do local, calcula-se a diferença entre esta e a longitude do meridiano do fuso. Entra-se na interpolação matemática para saber quantos minutos de relógio, corresponde a diferença em graus obtida. Aplica-se a referida correção aos horários inicialmente encontrados. Se a cidade estiver à esquerda do meridiano do fuso, há um atraso, ou seja, deve-se somar os minutos calculados, se for à direita subtrai-se.

#### 2.4.2. O Espectro Solar

A radiação solar chega em todos os comprimentos de onda ou frequências, mas principalmente entre 100 e 3000 nanômetros, veja a Figura 2.7. A radiação solar é composta pelo infravermelho, espectro visível e ultravioleta (UV). A radiação UV se propaga no ar tem comprimento de onda entre 100 e 400nm de acordo com a Tabela 2.3. O componente UV da radiação é pequeno, mas biologicamente importante, consistindo em comprimentos de ondas entre 100 e 400 nanômetros (nm). É subdividido em três categorias, a UVA , UVB e UVC de A UVC é completamente absorvida pela camada de ozônio da atmosfera, assim a radiação

UV que nos atinge consiste em UVB (cerca de 5%) e UVA (95% ou mais). Entretanto, essas porcentagens são aproximações relativas variam com as estações, hora do dia, latitude e muitos outros fatores [revista ISTOÉ, 2001].



**Figura 2.7. - Espectro Eletromagnético**

O espectro visível vai de 400 a 800nm, na seguinte seqüência: violeta, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho. Após a faixa do visível começa o infravermelho (IV) responsável pelo aquecimento terrestre.

**Tabela 2.3 – Tipo de comprimento de onda**

TIPO	FAIXA DE COMPRIMENTO DE ONDA (nm = nanômetro = $10^{-9}$ m)
UVC Invisível	100 - 280
UVB Invisível	280 - 315
UVA Invisível	315 - 400
Visível	400 - 800
Infravermelho	> 800

### 2.4.2.1. Dispersão da atmosfera

A distribuição espectral da radiação solar extraterrestre possui um formato somente aproximado ao de um corpo negro. Isto decorre do fato de o Sol não estar em estado de equilíbrio, nem radiativo, nem termodinâmico. Ao entrar na atmosfera terrestre, a radiação solar, e seu espectro, sofrem algumas modificações em determinados comprimentos de onda devido a absorção por  $O_3$ ,  $H_2O$  e  $CO_2$ , além dos espalhamentos sucessivos por material particulado em suspensão tais como ar, vapor d'água, poeira e nuvens.

#### a) Ar

O ar puro (uma mistura de oxigênio e nitrogênio) não absorve radiação solar, mas é capaz de espalhar radiação com comprimentos de onda menores do que 1 micrômetro (dispersão Rayleigh). Ou seja, verifica-se principalmente no espectro visível, e pode ser observada a olho nu. Esta dispersão é mais acentuada para os menores comprimentos de onda. Se não houvesse atmosfera, o céu seria preto com um disco brilhante (o Sol) do qual receberíamos radiação direta. O ar captura uma parte dessa energia e a espalha, principalmente no azul, ver Figura 2.7; dessa forma, a luz é recebida com esse comprimento de onda predominante como radiação difusa do céu, e esta é a razão de que ele seja azulado durante o período diurno.

Por outro lado, quando o sol se encontra perto do horizonte os raios diretos que chegam a nossos olhos atravessaram uma massa de ar maior, e a dispersão aumenta sua intensidade; a maior atenuação no azul faz com que a luz do sol seja avermelhada no espectro visível. Este efeito se acentua quando há poeira em suspensão na atmosfera (gases absorventes). Na atmosfera existem alguns gases minoritários, presentes em pequenas quantidades se comparados com a massa de ar, mas que produzem efeitos consideráveis de absorção.

b) Ozônio (O<sub>3</sub>)

O ozônio é produzido principalmente na alta atmosfera, entre 25 e 50 km de altitude, através de uma reação fotoquímica: raios solares no espectro eletromagnético são absorvidos por uma molécula de oxigênio (composição O<sub>2</sub>), que fica excitada e é capaz de combinar-se com outra molécula de oxigênio (reação  $O_2 + O_2 \rightarrow O_3 + O$ ). O átomo de oxigênio livre (O) é muito ativo quimicamente, e termina combinando-se com uma molécula de O<sub>2</sub> para formar mais uma de ozônio ( $O + O_2 \rightarrow O_3$ ). Também é possível haver a formação de ozônio perto da atmosfera, a partir dos gases de escapamento de automóveis nas cidades, e de queimas de florestas.

Perto da superfície, a concentração é da ordem de 30-50 ppb (*partes por bilhão*), aumentando até 2000 ppb na estratosfera. A atividade industrial produz alguns gases que, ao se difundirem e chegarem à estratosfera, são capazes de interferir na reação fotoquímica que gera o ozônio. Isto resulta na produção do buraco de ozônio nas regiões polares, responsável por um aumento da radiação ultravioleta que chega à superfície nessas regiões.

c) Vapor d'água (H<sub>2</sub>O)

O vapor de água está presente em proporções variáveis (até 15 ou 20 gramas por cada kg de ar). É capaz de absorver radiação em várias faixas (bandas de absorção) no infravermelho próximo, para comprimentos de onda maiores que 0,8 μm.

d) Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Está presente em concentração constante na atmosfera até pelo menos 80 km de altitude (em torno de 350 ppm: *partes por milhão*). Ele também absorve radiação solar em várias bandas de absorção no infravermelho próximo.

O efeito combinado destes três gases (O<sub>3</sub>, vapor d'água e CO<sub>2</sub>) pode absorver mais de 15% da radiação solar que chega à superfície Terrestre [CPTEC - INPE].

e) Aerossóis

As partículas em suspensão na atmosfera também são capazes de absorver e/ou dispersar radiação solar. Seu efeito é notável quando associado a fenômenos de intensidade de uma queimada em florestas, ou das cinzas expelidas por uma erupção vulcânica.

f) Nuvens

As nuvens são suspensões de gotículas ou de cristais de gelo, e como tais, podem ser consideradas como um aerossol concentrado no espaço. Suas partículas têm alto poder refletor, e no infravermelho próximo são bons absorventes de radiação solar. Sua variedade se estende desde nuvens planas, com pouca espessura e grande extensão horizontal, semitransparentes e situadas em altitudes elevadas (cirrus), até nuvens com grande desenvolvimento vertical e que ocupam áreas relativamente restritas, com grande poder refletivo no seu topo e na lateral (cumulonimbus). As nuvens variam continuamente de forma e tamanho, e são as grandes moduladoras da energia solar que chega à superfície. Considerando sua distribuição sobre o globo terrestre, elas provocam reflexão de 25-30% (em média) da radiação solar que chega ao planeta.

#### **2.4.2.2. Reflexão na superfície**

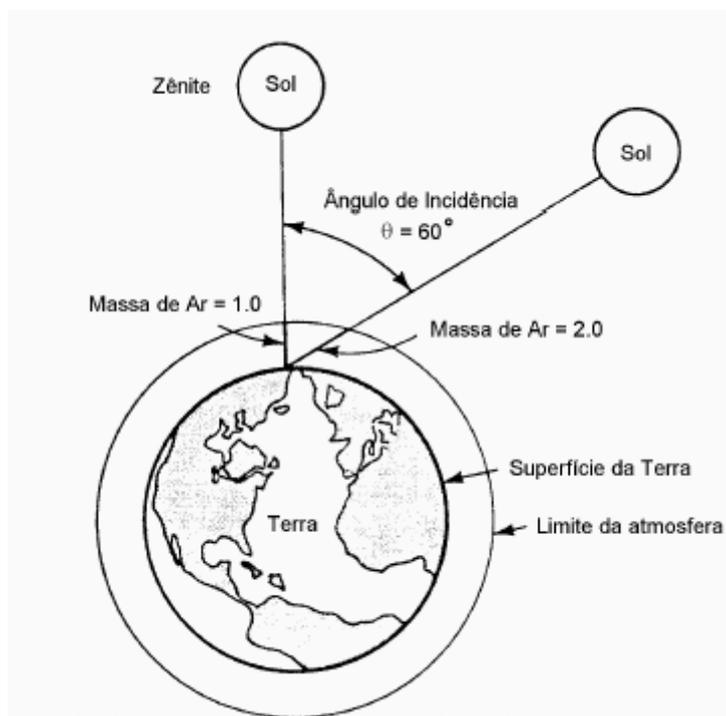
A radiação solar que consegue chegar à superfície poderá ser absorvida pelo solo, na medida em que este tenha pouca refletância (inferior a 10%). Uma superfície com vegetação há bastante absorvente no visível, isto é devido à clorofila, que absorve especialmente no azul, laranja e vermelho: como absorve menos no verde, este é mais refletido.... eis a razão da vegetação ser esverdeada!. Já no infravermelho próximo, nossos olhos não o percebem, mas as superfícies com vegetação têm refletância alta (da ordem ou superior a 35%). Superfícies

minerais têm refletância alta, a algumas (como a neve) refletem a maior parte da radiação solar que chega a elas. Já a água tem refletância pequena no visível, que vai diminuindo ainda mais com o comprimento de onda.

O caminho percorrido pela radiação solar desde sua incidência na atmosfera até atingir a superfície terrestre é chamado de Massa de Ar (Figura 2.8). Matematicamente, o cálculo da massa de ar é definida da seguinte forma:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.11)$$

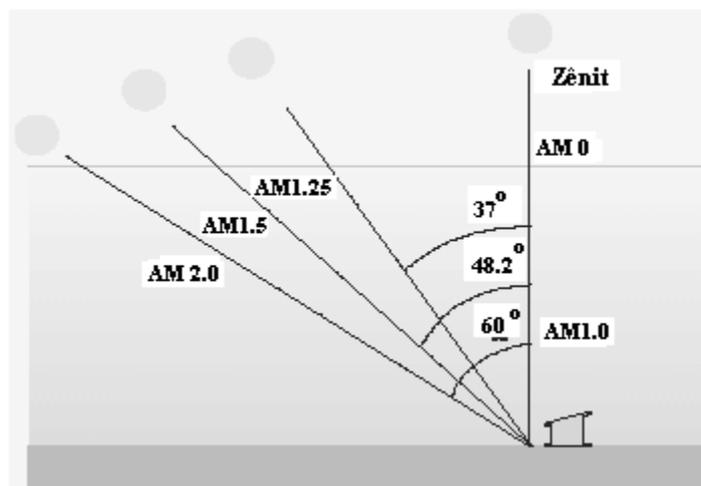
onde  $\theta$  é a distância angular entre o feixe solar e a vertical no local de incidência.



**Figura 2.8. - Trajetória dos raios de Sol na atmosfera e definição do coeficiente de "Massa de Ar" (AM).**

Quando o Sol está no zênite do local, o caminho óptico percorrido pela radiação dentro da atmosfera terrestre é igual a 1, ou seja,  $AM = 1,0$ .  $AM$  igual a 1,0 não é sinônimo de meio dia terrestre, pois o Sol, ao meio dia, não está necessariamente no zênite local. À medida que

crece o ângulo entre o feixe solar e a vertical local (ângulo zenital –  $\theta_z$ ), aumenta a massa de ar. Isto ocorre aproximadamente com a secante de  $\theta_z$ , deste modo, ao atingir aproximadamente  $48^\circ$ , a massa de ar é de 1,5 e com  $\theta_z = 60^\circ$  a massa de ar chega a 2,0, como na Figura 2.9.



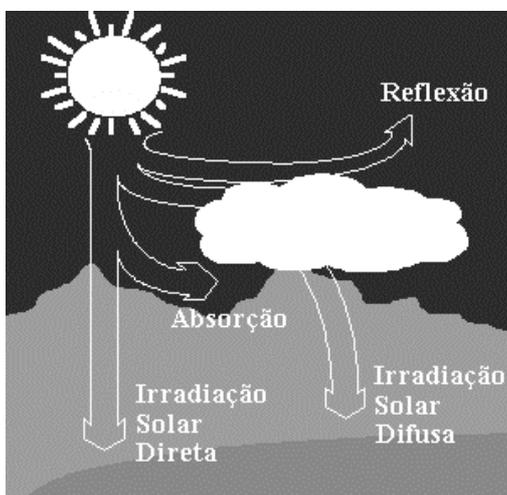
*Figura 2.9. - Massa de ar*

### 2.4.3. Radiação Solar ao Nível do Solo

De toda a radiação solar que chega às camadas superiores da atmosfera, apenas uma fração atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Esta fração que atinge o solo é constituída por uma componente direta (ou de feixe) e por uma componente difusa (figura 2.10). Uma pequena proporção da energia armazenada como energia química em plantas e tecidos de corpos animais se acumularam durante milhões de anos, sob condições geológicas favoráveis, na forma de carvão e óleos minerais, convertendo-se em nossas reservas de combustíveis fósseis.

Ao atravessar a atmosfera, a composição espectral da radiação varia de acordo com as características geográficas e meteorológicas do local. Portanto, a radiação que chega na

superfície terrestre e conseqüentemente a energia disponível, varia segundo a posição no globo terrestre.



*Figura 2.10. - Incidência sobre a Terra*

Como as características meteorológicas são aleatórias e imprevisíveis. Para contornar este problema utilizam-se modelos teórico-estatísticos que estimam a interferência da atmosfera na irradiação disponível a partir de longas séries históricas de medidas.

Os instrumentos de medida que são apresentados a seguir são destinados à medição da irradiação global ou de uma de suas componentes.

#### **2.4.4. Solarimetria e Instrumentos de Medição**

A medição da radiação solar, tanto a componente direta como a componente difusa na superfície terrestre é de maior importância para os estudos das influências das condições climáticas e atmosféricas. Com um histórico dessas medidas, pode-se viabilizar as instalações de sistemas térmicos e fotovoltaicos em uma determinada região garantindo o máximo aproveitamento ao longo do ano onde, as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações.

Irradiância é a quantidade de radiação que incide sobre uma superfície, por unidade de área; pode ser expressa em  $W/m^2$ ,  $mW/cm^2$ ,  $cal./cm^2$ . No Brasil, entre os esforços mais recentes e efetivos de avaliação da disponibilidade de radiação solar, destacam-se os seguintes:

- Atlas Solarimétrico do Brasil, iniciativa da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE e da Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF, em parceria com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB;
- Atlas de Irradiação Solar no Brasil, elaborado pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e o Laboratório de Energia Solar – LABSOLAR, da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
- O Atlas Solarimétrico do Brasil – publicado em agosto de 1997 – apresenta uma estimativa da radiação solar incidente no país, através da interpolação e extrapolação de dados obtidos em estações solarimétricas distribuídas em vários pontos do território nacional. Devido, porém, ao número relativamente reduzido de estações experimentais e às variações climáticas locais e regionais, fazendo estimativas da radiação solar a partir de imagens de satélites.

Como lembrado por pesquisadores do Centro de Pesquisas de Eletricidade – CEPEL, ambos os modelos apresentam falhas e limites e não devem ser vistos como concorrentes. Ao contrário, devem ser complementares, procurando reunir o máximo possível de dados, de forma a melhorar as estimativas e avaliações da disponibilidade de radiação solar no Brasil [CRESESB, 1999].

Os instrumentos solarimétricos medem a potência incidente por unidade de superfície, ao longo de determinado período, integrada sobre diversos comprimentos de onda. São detectados comprimentos de onda compreendidos nos intervalos entre 0,3 e 0,4  $\mu m$ , parte da região do ultravioleta, 0,4 a 0,7  $\mu m$ , região do visível, e de 0,7 a 5  $\mu m$ , região do

infravermelho. Usualmente são medidas a radiação global e, com menor frequência, as suas componentes difusa e direta.

De acordo com as normas preestabelecidas pela OMM (Organização Mundial de Meteorologia) são determinados limites de precisão para quatro tipos de instrumentos: de referência ou padrão, instrumentos de primeira, segunda e terceira classe. As medições padrões são: radiação global e difusa no plano horizontal e radiação direta normal.

A seguir são mostrados alguns instrumentos de medida da radiação, o uso mais freqüente e a classe associada ao seu desempenho.

#### a) Piranômetros

Os piranômetros (Figura 2.11) medem a radiação global. Este instrumento caracteriza-se pelo uso de uma termopilha que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, uma pintada de preto e outra pintada de branco igualmente iluminadas. A expansão sofrida pelas superfícies provoca um diferencial de potencial que, ao ser medida, mostra o valor instantâneo da energia solar. Para medir a radiação difusa usa-se um equipamento acoplado ao piranômetro que faz sombra, como na Figura 2.12.

Um outro modelo bem interessante de piranômetro é aquele que utiliza uma célula fotovoltaica de silício monocristalino para coletar medidas solarimétricas. Estes piranômetros são largamente utilizados, pois apresentam custos bem menores do que os equipamentos tradicionais. Pelas características da célula fotovoltaica, este aparelho apresenta limitações quando apresenta sensibilidade em apenas 60% da radiação solar incidente.

Existem vários modelos de piranômetros de primeira e também de segunda classe. Existem vários modelos de diversos fabricantes entre eles podemos citar: Eppley 8-48 (USA), Cimel CE-180 (França), Schenk (Áustria), M-80M (Rússia), Zonen CM5 e CM10 (Holanda).



*Figura 2.11. - Piranômetro de Segunda Classe*



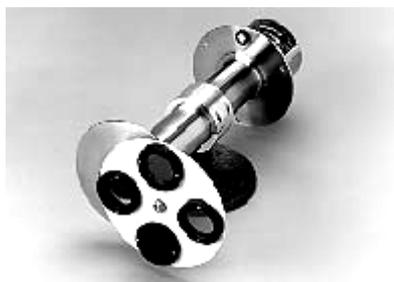
*Figura 2.12. - Medição da Radiação Difusa*

b) Pireliômetros

Os pireliômetros são instrumentos que medem a radiação direta (Figura 2.13). Eles se caracterizam por apresentarem uma pequena abertura de forma a "visualizar" apenas o disco solar e a região vizinha denominada circunsolar. O instrumento segue o movimento solar onde é constantemente ajustado para focalizar melhor a região do sensor.



*Figura 2.13. - Pireliômetros de Cavidade Absoluta*



**Figura 2.14. - Pireliômetros de Incidência Normal**

c) Heliógrafo

Instrumento que registra a duração do brilho solar. A radiação solar é focalizada por uma esfera de cristal de 10 cm de diâmetro sobre uma fita que, pela ação da radiação é energizada. O comprimento desta fita exposta a radiação solar mede o número de horas de insolação, veja Figura 2.15.

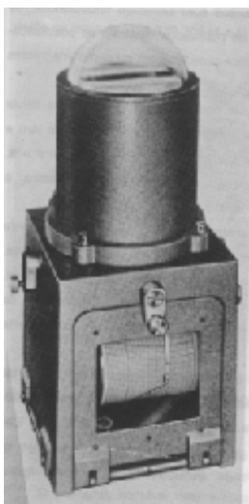


**Figura 2.15. - Heliógrafo Capbell-Stokes**

Este instrumento está disponível em grande parte das estações meteorológicas e pode ser utilizado sobre condições das mais adversas. Sua principal vantagem é não precisar de calibração. Basta que sua construção esteja de acordo com as recomendações da Organização Meteorológica Mundial, estejam corretamente testados assegurando-se uma homogeneidade com dados tomados em diferentes latitudes. Por outro lado, deve-se seguir rigorosamente o compromisso da manutenção diária como as trocas das cartas de papel, limpeza básica para minimizar os efeitos causados por intempéries como a incidência de neve, poeira, ventos.

d) Actinógrafo

A Figura 2.16 mostra o actinógrafo, um instrumento usado para medir a radiação global. Este instrumento é composto de sensores baseados na expansão diferencial de um par bimetalico. Os sensores são conectados a uma pena que, quando de suas expansão, registram o valor instantâneo da radiação solar. Sua precisão encontra-se na faixa de 15 a 20% e mesmo com calibrações periódicas, os erros não são inferiores a 5%. Além disso, sua resposta a variações na radiação é lenta e não há uma compensação de temperatura, sendo considerado um instrumento de terceira classe.



**Figura 2.16. - - Actinógrafo Robitzsch-Fuess**

## CAPÍTULO III

### COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

#### **3.1. Introdução**

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias principais, isolados, híbridos e conectados as redes. A aplicação de cada uma delas depende da disponibilidade dos recursos de energia e / ou da necessidade de geração para suprimento nos locais onde os sistemas serão utilizados. Neste trabalho será abordado apenas os sistemas fotovoltaicos isolados (autônomos) caracterizados pelo baixo consumo, em residências de baixa renda.

A carga elétrica e o gerador fotovoltaico são os elementos fundamentais de um sistema fotovoltaico, podendo ser acoplado ao conjunto carga-gerador um subsistema de acumulação de energia, que é responsável pelo armazenamento da energia quando a geração é superior ao consumo e pelo abastecimento da carga quando há consumo e não há geração. Existem diversas formas de armazenar a energia, porém, é freqüente a utilização de baterias eletroquímicas secundárias, baterias secundárias são aquelas que, depois de descarregadas, podem ser

conduzidas ao estado de carga inicial, através da passagem de uma corrente elétrica na direção oposta à descarga. Normalmente são utilizadas baterias automotivas de chumbo-ácido.

Devido às características intrínsecas das baterias geralmente utilizadas neste tipo de subsistemas, é conveniente instalar um sistema eletrônico de controle da carga e da descarga, chamado regulador ou controlador de carga, o qual evitar cargas ou descargas excessivas no acumulador, aumentando assim sua vida útil. Em algumas ocasiões é necessário adaptar as características da corrente fornecida pelo conjunto módulo-bateria às cargas, fazendo-se necessário o uso de inversores estáticos. A fiação e a estrutura de suporte dos geradores fotovoltaicos também fazem parte do sistema.

No dimensionamento de um sistema autônomo de energia são analisados os tipos de configurações que melhor atenderão o consumidor e a um custo menor, as quais são mostradas na Figura 3.1.

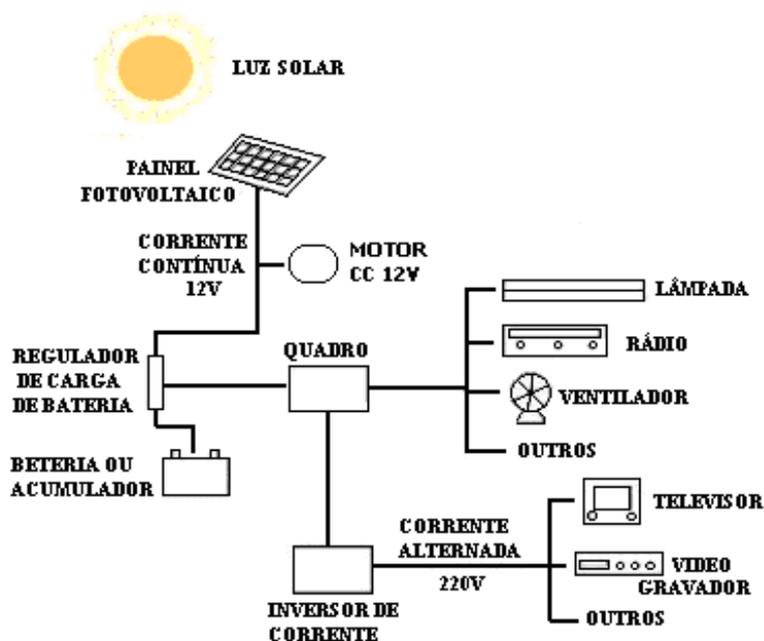


Figura 3.1. - Componentes e configurações do sistema fotovoltaico

- Sistema CC isolado sem armazenamento de energia, neste sistema, a carga CC encontra-se acoplada diretamente ao painel solar, logo, toda a energia elétrica produzida pelo painel é instantaneamente consumida. Um exemplo de uso para esta configuração é o acionamento de bombas d'água.
- Sistema CC isolado com armazenamento de energia, num sistema com armazenamento de energia, é possível utilizar equipamentos elétricos CC independente de haver ou não geração de energia fotovoltaica no período de operação. Exemplos de aplicação deste sistema são iluminação, TV, rádio, telefone, etc. Neste caso o uso de controladores de carga é comum visto que, devido as recentes tecnologias das baterias, tem-se exigido um melhor controle do processo de carga e descarga com objetivo de proporcionar um aumento de sua vida útil.
- Sistema CA isolado com armazenamento de energia, esta configuração de sistema é semelhante ao sistema CC isolado com armazenamento de energia, porém, o diferencial é que a carga é alimentada em energia CA devendo, portanto, ser utilizado um inversor entre o painel e a carga. O inversor utilizado na geração da energia CA pode incorporar o controlador de carga com dispositivo eletrônico seguidor de máxima potência.
- Sistema CA isolado sem armazenamento de energia, esta configuração de sistema é semelhante ao sistema CC isolado sem armazenamento de energia, porém, o diferencial é que a carga é alimentada em energia CA devendo, portanto, ser utilizado um inversor entre o painel e a carga. O acionamento de bomba d'água equipada com motor CA convencional é uma das aplicações.

### 3.2. Gerador Fotovoltaico

O gerador fotovoltaico é quem permite converter a energia proveniente do sol incidente em sua superfície em energia elétrica. É na célula fotovoltaica, através do processo denominado efeito fotovoltaico que ocorre essa conversão. Estas células podem ser construídas com diferentes tipos de materiais. Os mais utilizados são, o silício(Si) (cristalino, amorfo hidrogenado); telureto de cádmio, CdTe (materiais semicondutores); compostos relacionados ao disseleneto de cádmio (gálio), índio (CuInSe<sub>2</sub> ou CIS e Cu(InGa)Se<sub>2</sub> ou CIGS). Neste último grupo aparecem elementos que são ou altamente tóxicos (Cd, Se, Te ) ou muito raros (Te, Se, Ga, In, Cd), ou ambos, tornando um obstáculo considerável no uso dessas tecnologias. O silício, por outro lado, é o segundo elemento mais abundante na superfície de nosso planeta (mais de 25% crosta terrestre é silício [Hammond, 1992]) e é 100 vezes menos tóxico que qualquer um dos outros elementos citados acima [Shah, 1992].

Dependendo do processo de fabricação, são formadas estruturas atômicas denominadas monocristalinas, policristalinas ou amorfas, conforme a distribuição dos átomos no material. Pode-se então ter os seguintes tipos de Silício:

a) Silício cristalino (c-Si)

É a mais tradicional das tecnologias fotovoltaicas e a que ainda hoje apresenta maior escala de produção em nível comercial, cerca de 80% em 2002 [Maycock, 2003], o c-Si se consolidou no mercado fotovoltaico devido sua extrema robustez e confiabilidade, apesar de seu custo de produção ainda ser bastante elevado.

b) Silício monocristalino (m-Si)

Os cristais monocristais dessas células recebem um banho de silício fundido de alta pureza (Si = 99,99% a 99,9999%) em reatores e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas, da ordem de alguns cm/hora. Levando-se em conta que a temperatura é

da ordem de 1400°C, o consumo de energia nesse processo é extremamente elevado, sendo necessário um tempo maior do que 2 anos para que o módulo gere a energia equivalente para a sua fabricação. É necessário ainda o corte de lâminas por fios ou serras diamantadas; lapidação, ataque químico e polimento (processos esses que acarretam numa perda do material da ordem de 50%); processos de difusão/ dopagem, deposição da máscara condutora de eletricidade gerada e finalmente a interconexão de células em série e em paralelo para a obtenção do módulo fotovoltaico.

c) Silício policristalino (p-Si)

Apresenta menor eficiência de conversão, com a vantagem de baixo custo de produção, já que a perfeição cristalina é menor que no caso do m-Si e o processamento é mais simples. O material de partida é o mesmo do monocristalino, que é fundido e depois solidificado diretamente, resultando num bloco com grandes cristais ou grãos, concentrando em seu contorno os defeitos que tornam menor sua eficiência.

Nos últimos anos o p-Si tem crescido sua participação no mercado fotovoltaico mundial, em detrimento do m-Si, e atualmente mais de 50% da produção mundial utiliza o p-Si [Maycock, 2003]. Sendo produzido também na forma de tiras ou fitas (ribbon technology), a partir de um banho líquido de silício e assim neste processo fica dispensado o fatiamento em lâminas, uma vez que as tiras são produzidas com a espessura final da célula.

d) Silício amorfo hidrogenado (a-Si)

Apresenta uma resposta espectral mais voltada para o azul do espectro eletromagnético, tendo uma eficiência superior à do c-Si em dias com céus encobertos. Por sua aparência estética mais atraente tem encontrado aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas em instalações integradas ao ambiente construído.

O processo de produção de a-Si ocorre a temperaturas relativamente baixas (300°C), e podem ser depositados em vidros, inox e alguns plásticos, o que tornam os painéis flexíveis, inquebráveis, leves, semitransparente e com superfícies curvas, ampliando assim o mercado com sua versatilidade.

e) Telureto de cádmio (CdTe)

È o mais recente competidor do c-Si e a-Si, principalmente na forma de filmes finos, sendo que para aplicações de calculadoras, ele já é utilizado a mais de uma década.

Recentemente é que começou a comercialização de grandes áreas, pois as empresas envolvidas nessa tecnologia vêm buscando as aplicações arquitetônicas (esteticamente atrativas) como nicho de mercado enquanto desenvolvem seu produto, ampliando volumes de produção e reduzindo custos.

Seu custo de produção é relativamente baixo para produção em larga escala, porém a baixa abundância de seus elementos e a toxicidade devem ser levados em consideração.

f) Disseleneto de cobre (gálio) e índio (CIS e CIGS)

São empregados integrados a edificação, principalmente por ter eficiência relativamente elevada e os módulos CIGS são os que apresentam o melhor rendimento dentre os filmes finos.

Assim como o a-Si e o CdTe os painéis CIS e CIGS apresentam uma ótima aparência estética e estão surgindo no mercado em grandes superfícies e em arquiteturas diversas. Sua baixa abundância de seus elementos e a toxicidade devem ser levados em consideração.

### 3.2.1. Efeito Fotovoltaico

Para melhor compreensão do efeito fotovoltaico é necessário entender o comportamento dos materiais semicondutores.

Um átomo de Si, por exemplo, tem quatro elétrons de valência, os quais para formar cristais do mesmo elemento dispõem-se simetricamente de tal forma que comportem os seus elétrons com outros quatro átomos mediante enlace covalentes. Ou seja, essa ligação covalente faz com que compartilhando seus átomos o elemento fique com oito elétrons na ultima camada e ficando assim presos a essa ligação, caracterizando o semiconductor.

O semiconductor de acordo com a temperatura pode se comportar como isolante ou como condutor. A uma temperatura de zero grau absoluto (0 Kelvin) todos os elétrons do cristal estão ligados, o que caracteriza o semiconductor como isolante. Em temperatura ambiente o semiconductor já apresenta uma certa condutividade, pois ganham energia térmica suficiente para romper ligações, tornando alguns elétrons livres, os quais se movem aleatoriamente pela estrutura cristalina. Essa energia térmica é de aproximadamente 1,1 eV (1eV=  $1,6 \times 10^{-19}$ J). Os semicondutores que se comportam dessa forma são chamados de semiconductor “tipo i”.

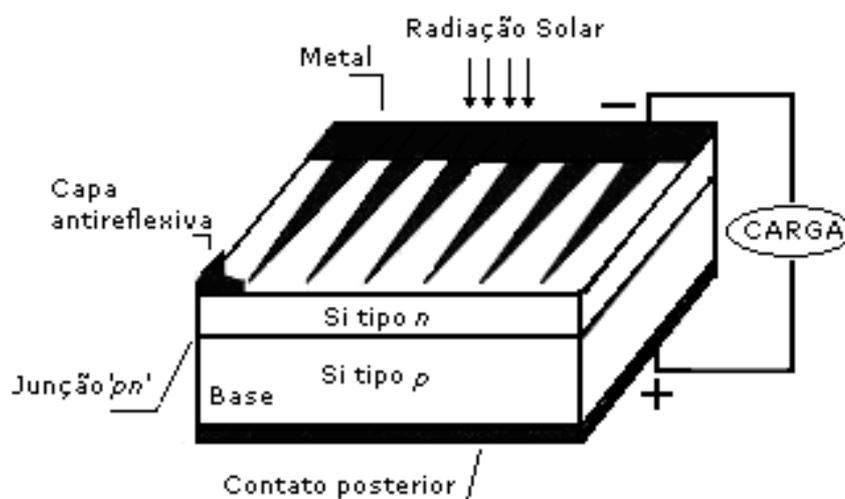
Pode-se aumentar consideravelmente a condutividade do semiconductor adicionando “impurezas” á estrutura cristalina, num processo conhecido como dopagem. No caso do silício, cujos átomos possuem 4 elétrons na ultima camada de valência, os materiais mais utilizados como dopantes são:

- O fósforo, ou arsênio, ou antimônio, que possuem 5 elétrons na última camada.
- O boro, ou gálio, ou índio, que possuem 3 elétrons na última camada.

Introduzindo um átomo de fósforo (por exemplo) no silício puro, 4 dos 5 elétrons de valência do fósforo formam ligações covalentes com átomos de silício, ficando o quinto elétron sem com quem formar ligação. Átomos desse tipo pentavalentes são chamados de doadores e o cristal dopado passa a ser chamado “tipo n” por ter predominância de portadores

de carga negativa. A razão, ou proporção de material entre o átomo de Fósforo e o átomo de Silício é da ordem de 1 para 1000.

Quando o dopante é o boro (por exemplo) são completadas apenas 3 ligações covalentes com átomos do silício e a ausência de elétrons na quarta ligação representa uma lacuna para cada impureza introduzida. Como uma lacuna pode se recombinar com um elétron, diz que a impureza é receptora e o cristal passa a ser chamado de “tipo p” pois nele predomina portadores de carga positiva. A razão, ou proporção de material entre o átomo de Boro e o átomo de Silício é da ordem de 1 para 10 bilhões.



**Figura 3.2. - Estrutura de uma célula de silício convencional**

Como a região n fica com uma alta concentração de elétrons livres ocorre, por difusão, uma migração de elétrons desta região para a região p. Ao mesmo tempo em que lacunas da região p migram para a região n, como caracterizado na Figura 3.2. Essa movimentação de cargas é limitada pelo surgimento na região da junção de um campo elétrico que se opõe à difusão original, causado justamente pela ausência daquelas cargas que trocaram de lado. Em

outras palavras esse campo elétrico é consequência da concentração de elétrons no lado p e de lacunas no lado n da fronteira entre as regiões.

Dessa forma a corrente associada à difusão compensa a corrente causada pelo campo elétrico e o cristal chega a um estado de equilíbrio elétrico. Nesta situação, se os terminais da célula fotovoltaica fossem conectados por um fio, nenhuma corrente circularia através deste.

O equilíbrio elétrico é quebrado quando a junção é iluminada. Segundo a mecânica quântica a luz é constituída de fótons, os quais possuem determinada quantidade de energia proporcional à sua frequência de vibração. O elétron absorve a energia do fóton que atingiu sua banda de valência. Se essa energia for suficiente para arrancar o elétron de sua ligação, este passa à banda de condução e torna-se livre, criando um par elétron-lacuna.

O campo elétrico descrito anteriormente faz com que o elétron seja acelerado para a região n, ao mesmo tempo em que a lacuna é atraída para a região p. Quanto mais fótons atingirem os elétrons da junção, mais pares elétrons-lacunas serão formados e separados pelo campo elétrico. Ocorre assim um desequilíbrio nas correntes da junção transferindo uma tensão nos terminais do dispositivo. Dessa vez se os terminais da célula forem conectados por um fio, circulará através dele uma fotocorrente proporcional à intensidade da luz incidente.

### **3.2.2. Célula fotovoltaica**

Ao se conectar uma célula fotovoltaica a uma carga elétrica, ocorre uma resistência natural à passagem das cargas, proporcional à tensão criada nos pólos da carga. Isto cria uma corrente, que circula no sentido inverso à corrente fotogerada, denominada de corrente de recombinação, ou corrente de escuro.

A corrente entregue a uma carga por um diodo semicondutor iluminado é o resultado líquido dos componentes internos de corrente que se opõem, como mostra a Equação 3.1.

$$I = I_L - I_D(V) \quad (3.1)$$

onde:

- I é a corrente elétrica [A];
- $I_L$  é a corrente elétrica produzida devido a geração de portadores pela iluminação [A];
- $I_D$  é a corrente elétrica de obscuridade, gerada devido à recombinação de portadores que produzem a tensão necessária para poder entregar energia a carga [A].

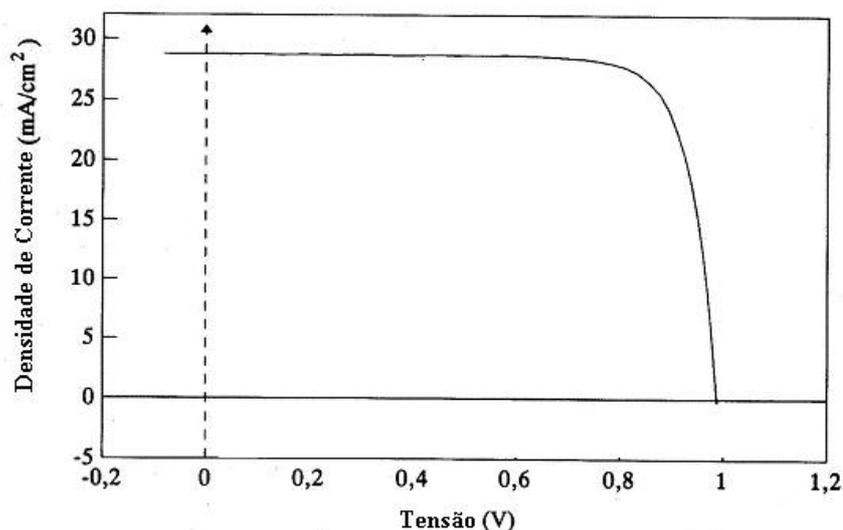
De acordo com a Equação 3.1, a corrente elétrica fornecida por uma célula solar a uma carga vem da diferença entre a fotocorrente  $I_L$  e a corrente de recombinação  $I_D(V)$ , devido à polarização produzida pela tensão gerada. Considerando, para simplificar, que a corrente de recombinação pode ser expressa mediante o modelo de uma única equação exponencial, a equação característica fica:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

onde:

- I é a corrente elétrica [A];
- $I_L$  é a corrente elétrica produzida devido a geração de portadores pela iluminação [A];
- $I_0$  é a corrente de saturação reversa do diodo no escuro [A];
- V é a tensão aplicada nos terminais do diodo [V];
- e é a carga do elétron [C];
- m é o fator de idealidade do diodo[-];
- k é a constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  [J/K]
- T é a temperatura absoluta da célula fotovoltaica [°C].

A característica I-V representada por esta equação tem a forma padrão mostrada na Figura 3.3.



**Figura 3.3. - Característica I-V de iluminação**

Como se pode observar na Figura 3.3, o maior valor da corrente de geração se obtém para condições de curto-circuito, ou  $V = 0$ . Segundo a Equação 3.2, a corrente de curto-circuito  $I_{SC}$  é dada pela Equação 3.3 descrita abaixo.

$$I_{SC} \equiv I(V = 0) = I_L \quad (3.3)$$

onde:

- $I_{SC}$  é a corrente de curto- circuito [A];
- $I$  é a corrente elétrica [A];
- $I_L$  é a corrente elétrica produzida devido a geração de portadores pela iluminação [A].

Se o dispositivo se mantém em circuito aberto ( $I = 0$ ), este se auto polarizará com certa tensão. Trata-se da tensão de circuito aberto  $V_{OC}$  e seu valor é tal que a fotocorrente fica apenas como a corrente de polarização. Isto é, em condições de circuito aberto,  $I_L = I_D(V_{OC})$ , e levando em conta a Equação 3. 1, obtemos a Equação 3.4. A partir da definição dos

parâmetros da equação anteriores permite-se escrever a característica da célula, como está apresentado na Equação 3.5.

$$V_{OC} = m \frac{kT}{e} \ln \left[ \frac{I_L}{I_0} + 1 \right] \quad (3.4)$$

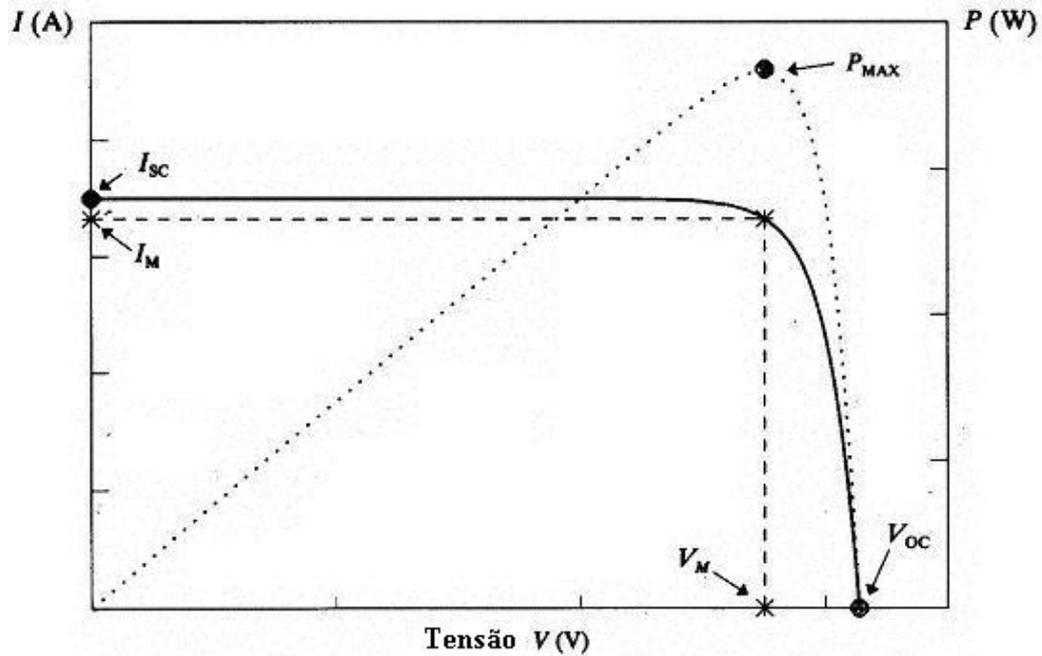
$$I = I_{SC} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{e(V_{OC} - V)}{mkT} \right) \right] \quad (3.5)$$

onde:

- $V_{OC}$  é a tensão em circuito aberto [V];
- $V$  é a tensão aplicada nos terminais do diodo [V];
- $I_L$  é a corrente elétrica produzida devido a geração de portadores pela iluminação [A];
- $I_0$  é a corrente de saturação reversa do diodo no escuro [A];
- $e$  é a carga do elétron [C];
- $m$  é o fator de idealidade do diodo[-];
- $k$  é a constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  [J/K]
- $T$  é a temperatura absoluta da célula fotovoltaica [°C].
- $I_{SC}$  é a corrente de curto- circuito [A];
- $I$  é a corrente elétrica [A];

### 3.2.3. Ponto de Potência Máxima

A região da curva característica compreendida entre  $I_{SC}$  e  $V_{OC}$  corresponde ao funcionamento da célula como gerador. Se a energia é fornecida a uma carga resistiva, como é mostrado na Figura 3.4, a potência entregue à resistência é dada pelo produto  $P = VI$ , e existirá um ponto de funcionamento ( $I_M$ ,  $V_M$ ) em que a potência será máxima, o qual é denominado ponto de potência máxima.



**Figura 3.4. - Ponto de Potência Máxima**

Os valores de  $I_M$  e  $V_M$  pode-se obter usando-se a Equação 3.6, a qual pode ser escrita como na Equação 3.7, que representa uma condição de máximo generalizado. Quando se aplica a uma célula descrita pela Equação 3.2 resulta na Equação 3.8. E assim completa-se a equação da célula solar com a apresentada pela Equação 3.9.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{ou} \quad 0 = d(IV)_M \equiv I_M dV + V_M dI \quad (3.6)$$

$$\left[ \frac{dI}{dV} \right]_M = -\frac{I_M}{V_M} \quad (3.7)$$

$$I_M = \frac{I_L + I_0}{1 + \frac{mkT}{eV_M}} \quad (3.8)$$

$$I_M = I_L - I_0 \left[ \exp \frac{eV_M}{mkT} - 1 \right] \quad (3.9)$$

onde:

- P é a Potência [W]
- V é a tensão elétrica [V];
- I é a corrente elétrica [A];
- $V_M$  tensão no ponto de potência máxima [V];
- $I_M$  corrente no ponto de potência máxima [A];
- $I_L$  é a corrente elétrica produzida devido a geração de portadores pela iluminação [A];
- $I_0$  é a corrente de saturação reversa do diodo no escuro [A];
- $e$  é a carga do elétron [C];
- $m$  é o fator de idealidade do diodo[-];
- $k$  é a constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  [J/K]
- $T$  é a temperatura absoluta da célula fotovoltaica [°C].

As Equações 3.8 e 3.9 formam um sistema do qual pode-se calcular  $I_M$  e  $V_M$ . Para valores usuais práticos das células solares, estas fórmulas indicam valores de  $I_M$  próximo de  $I_L$  e valores de  $V_M$  próximos a  $V_{OC}$ , como visto na curva da Figura 3.5. Por esta razão, o ponto de potência máxima se situa no cotovelo da curva característica, como indica a Figura 3.4.

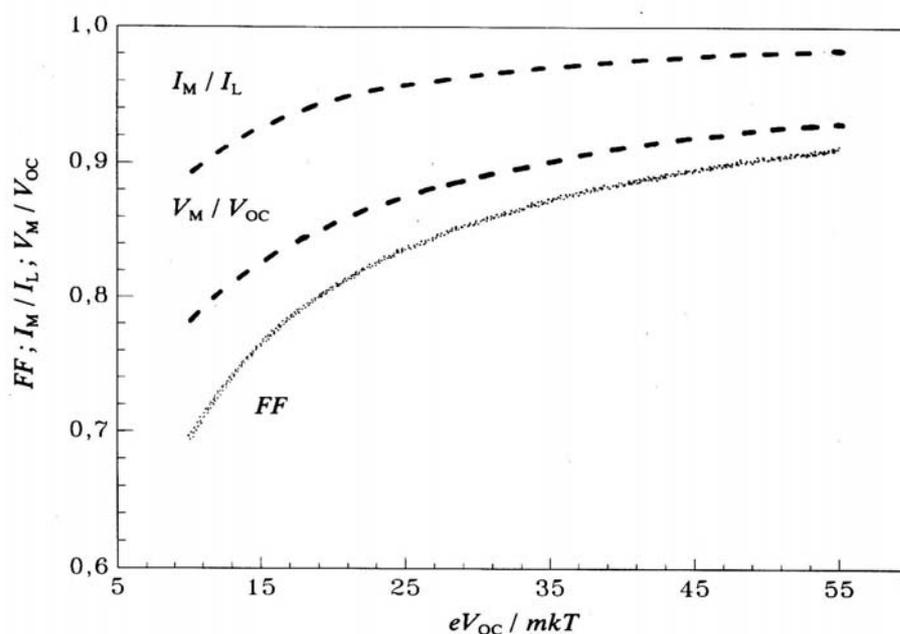
O produto  $I_M V_M$  que dá a potência máxima entregue à carga, mostrado na Figura 3.4 pela área do retângulo pontilhado, é obviamente menor que a do retângulo que representa o produto  $I_{SC} V_{OC}$  o qual é a maior corrente que se pode extrair da célula pela maior tensão. Através do quociente destes dois produtos determina-se o Fator de Forma ou, o qual é apresentado pela Equação 3.10.

$$FF = \frac{P_M}{I_{SC} V_{OC}} \quad (3.10)$$

onde:

- FF é o fator de forma [-];
- $P_M$  é a potência máxima do módulo [W];
- $I_{SC}$  é a corrente de curto-circuito [A];
- $V_{oc}$  é a tensão em circuito aberto [V].

O fator de forma é um parâmetro de grande utilidade prática, que varia pouco de uns dispositivos para outros e possuem valores entre 0,7 e 0,8 para a maioria das células de semicondutores cristalinos, como mostra a Figura 3.5.



**Figura 3.5. - Variação do ponto de máxima potência e do fator de forma no intervalo de valores das células utilizadas na prática**

Fazendo uso da definição do fator de forma, a potência máxima entregue pela célula é descrita pela Equação 3.11. E a Eficiência da Conversão Energética de uma célula solar se define como o quociente entre a máxima potência elétrica que se pode entregar à carga e a potência de radiação solar incidente  $P_L$  sobre o dispositivo descrita na Equação 3.12.

$$P_M = FF * I_{SC} * V_{OC} \quad (3.11)$$

$$\eta = \frac{I_M V_M}{P_L} \equiv \frac{FF * I_{SC} V_{OC}}{P_L} \quad (3.12)$$

onde:

- $\eta$  é a Eficiência da Conversão Energética de uma célula solar [ - ];
- FF é o fator de forma [ - ];
- $P_M$  é a potencia máxima do módulo [W];
- $V_M$  tensão no ponto de potência máxima [V];
- $I_M$  corrente no ponto de potência máxima [A];
- $I_{SC}$  é a corrente de curto-circuito [A];
- $V_{oc}$  é a tensão em circuito aberto [V].
- $P_L$  é a potencia de radiação solar incidente sobre o dispositivo [W].

#### 3.2.4. Fatores que Influenciam na energia gerada das células e /ou módulos

Vários parâmetros podem afetar o rendimento dos módulos fotovoltaicos. O principal deles é a duração da radiação solar, que depende fundamentalmente da localização geográfica da instalação (latitude, longitude e relevo, dentre outros) temperatura ambiente, bem como de sua inclinação e orientação. A temperatura dos painéis, temperatura ambiente, cobertura de nuvens, o sombreamento parcial, o descasamento entre painéis de um mesmo “string”, as resistências dos condutores e o estado de limpeza dos painéis também influenciam a desempenho do sistema gerador fotovoltaico.

A irradiação e a temperatura são as duas principais grandezas que determinam o desempenho elétrico dos módulos. Como são ambas resultado das condições meteorológicas não estão sob nosso domínio, podendo apenas serem estimadas.

A seguir serão feitos alguns comentários a respeito dos aspectos mais relevantes na influencia do desempenho dos módulos:

a) Inclinação e orientação dos painéis

Seus efeitos no rendimento do gerador dependem da razão entre a radiação direta e difusa locais, bem como da fração de albedo (reflexão dos arredores), que é característica do ambiente que circunda a instalação. Como regra geral, a inclinação ótima com relação à horizontal para incidência solar máxima em regime anual é dada pela latitude local. A orientação ideal é a de uma superfície voltada para o equador (norte geográfico no hemisfério norte). Van der Borg & Wiggelinkhuizen [2001] realizaram um extensa análise dos efeitos da orientação de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações quantificando as perdas energéticas decorrentes de orientação e inclinações não-ótimas [Van der Borg & Wiggelinkhuizen, 2001].

A inclinação e a orientação exata não são, no entanto, críticas, ao contrário de uma percepção freqüente de que módulos solares somente podem ser instalados em estruturas voltadas para o norte (sul no hemisfério norte), de preferência móveis para poder seguir o sol. Para uma grande variedade de orientações possíveis, pode-se atingir uma incidência de mais de 95% da radiação máxima. Esta afirmação somente é válida para uma superfície livre de obstruções. Em situações onde ocorrerem obstáculos físicos, ou padrões climáticos diários ou sazonais anômalos, estes parâmetros devem obviamente ser levados em consideração. Além disto, fachadas voltadas para o leste ou oeste podem ter desempenho satisfatória mesmo quando instalados em ângulos inclinados ou na vertical, com uma produção de energia da

ordem de 60% em relação a uma orientação ótima, devido ao baixo ângulo do sol no início e final do dia [Sick & Erge, 1996]] [Ruther & Kleiss, 1996].

b) Sombreamento

É uma questão crítica. Um gerador fotovoltaico apresenta desempenho ótimo quando iluminado homogeneamente. Dada a característica construtiva da maioria dos módulos fotovoltaicos, em que as células solares individuais são conectadas em série, uma pequena sombra sobre uma destas células, como a sombra projetada por uma antena, chaminé ou poste, pode reduzir acentuadamente o rendimento de todo o sistema. Isto se deve ao fato de que a célula sobre a qual incidir a menor quantidade de radiação é que irá determinar a corrente (e portanto a potência) de operação de todo o conjunto a ela conectado em série. Sob certas condições, uma célula solar parcialmente sombreada pode vir a atuar como uma carga, o que pode levar a um aquecimento excessivo da célula e possivelmente à destruição do módulo. Este efeito, conhecido como “hot spot”, pode ser evitado pela instalação de diodos de “bypass” entre cada célula de um módulo, o que por outro lado leva a uma perda de rendimento. Módulos solares de filmes finos, cujas células são normalmente tiras longas e estreitas, são menos afetados por este fenômeno do que os mais tradicionais módulos solares de c-Si.

c) Temperatura

Como ilustração dos efeitos da temperatura, considera-se uma célula descrita pelo modelo exponencial com  $m = 1$ , o que corresponde a um comportamento dominado pelas correntes de recombinação nas zonas neutras, fazendo uma aproximação suficiente em uma análise de primeira ordem. A fórmula característica é apresentada pela Equação 3.13.

$$I = I_L - I_0(T) \left[ \exp \frac{e(V + IR_S)}{kT} - 1 \right] \quad (3.13)$$

onde:

- I é a corrente elétrica [A];
- $I_L$  é a corrente elétrica produzida devido a geração de portadores pela iluminação [A];
- $I_0$  é a corrente de saturação reversa do diodo no escuro [A];
- V é a tensão [V];
- e é a carga do elétron [C];
- $R_S$  é a resistência série [ $\Omega$ ];
- k é a constante de Boltzmann [J/K];
- T é a temperatura absoluta da célula fotovoltaica [ $^{\circ}\text{C}$ ].

A fotocorrente  $I_L$  aumenta ligeiramente com a temperatura, devido em parte, ao aumento dos comprimentos de difusão dos portadores minoritários e, em parte ao estreitamento da banda proibida, porém, a variação da fotocorrente é pequena, e em primeira aproximação,  $I_L$  pode-se considerar independente da temperatura.

A variação das características da célula com a temperatura se manifesta de forma exponencial e de forma implícita através de  $I_0(T)$ . A dependência com a temperatura da corrente inversa de saturação é descrita pela Equação 3.14. Sendo K e  $E_{G0}$  (largura da banda proibida a 0 K) duas constantes aproximadamente independentes da temperatura e levando em conta as Equações 3.13 e 3.14 deduz-se a Equação 3.15, a qual é tensão de circuito aberto.

$$I_0 = KT^3 \exp \left( - \frac{E_{G0}}{kT} \right) \quad (3.14)$$

$$V_{oc}(T) = \frac{E_{G0}}{e} - \frac{kT}{e} \ln \frac{KT^3}{I_L} \quad (3.15)$$

onde:

- $I_L$  é a corrente elétrica produzida devido a geração de portadores pela iluminação [A];
- $I_0$  é a corrente de saturação reversa do diodo no escuro [A];
- $E_{GO}$  é a largura da banda proibida a 0 Kelvin [K];
- $K$  é o fator de correção da forma da curva característica [ $\Omega/^\circ\text{C}$ ];
- $e$  é a carga do elétron [C];
- $V_{oc}$  é a tensão em circuito aberto [V];
- $k$  é a constante de Boltzmann [J/K];
- $T$  é a temperatura absoluta da célula fotovoltaica [ $^\circ\text{C}$ ].

A Equação 3.15 mostra uma diminuição de  $V_{oc}$  com o aumento da temperatura, como é mostrado na Figura 3.6. Esta variação se situa em um valor de aproximadamente  $2,3\text{mV}/^\circ\text{C}$  para células de silício a temperatura ambiente.

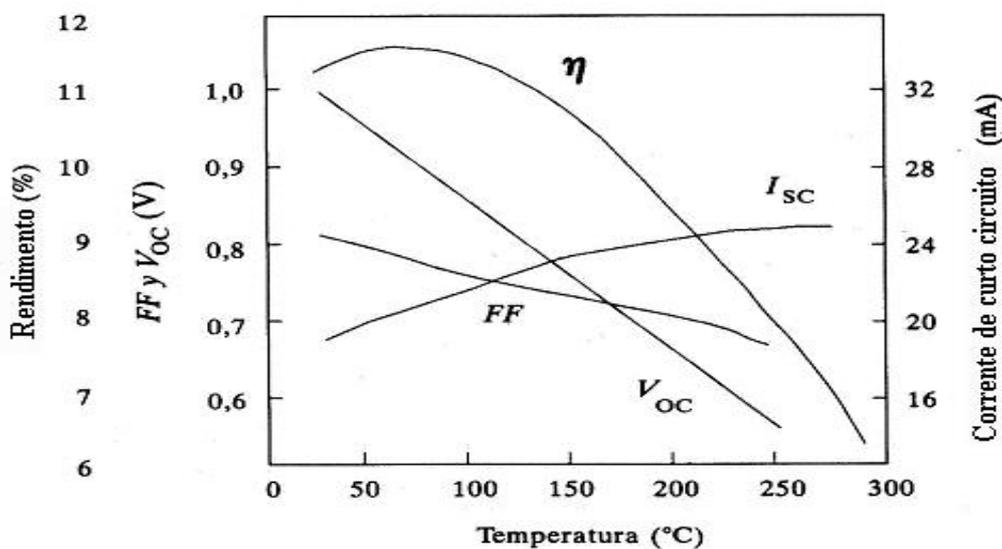


Figura 3.6. - Variação dos parâmetros de funcionamento com a temperatura

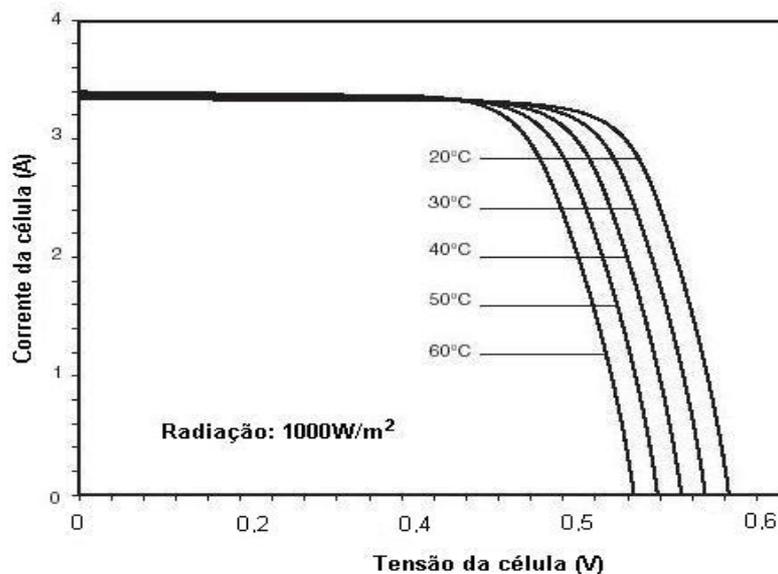
O fator de forma (FF) apresenta também uma diminuição com a temperatura, porém não muito acentuada para temperaturas inferiores a  $200^\circ\text{C}$ . O decréscimo de FF se deve ao

aumento de  $I_0$  e ao arredondamento do cotovelo da característica I-V que se produz quando a temperatura aumenta na exponencial da Equação 3.13. Como consequência da diminuição de  $V_{OC}$  e FF com a temperatura, o pequeno aumento de  $I_L$  não produz efeito e o rendimento da célula diminui com o aumento da temperatura, como é mostrado na Figura 3.4. A diminuição é da ordem de 0,04 a 0,06% por cada grau centígrado de temperatura que aumenta para células de silício, e de 0,02 a 0,03% para as de GaAs, para temperaturas de funcionamento próximas a do ambiente.

Esta variação se mostra melhor mediante a definição do coeficiente de variação com a temperatura, o qual é mostrado na Equação 3.16.

$$\frac{dV_{OC}}{dT} = \frac{1}{T} \left[ \frac{E_{G0}}{e} - V_{OC}(T) \right] \quad (3.16)$$

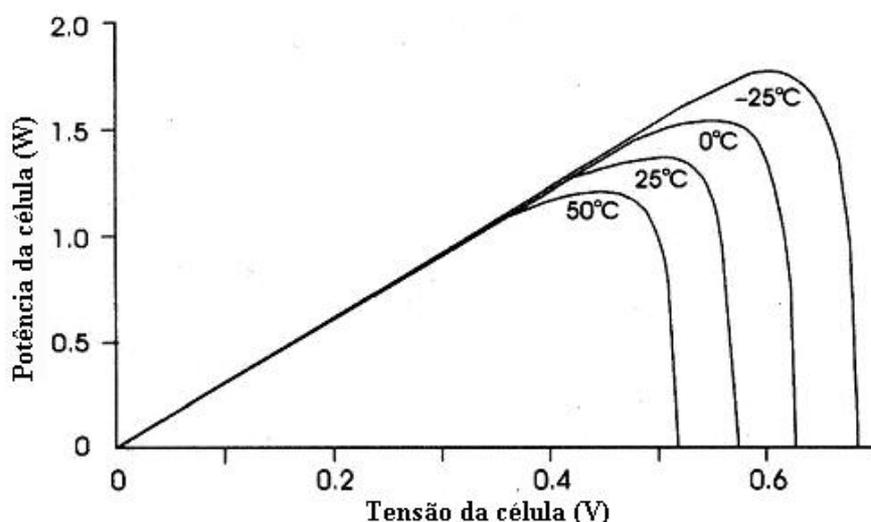
Assim, o desempenho de uma célula fotovoltaica com a variação da temperatura é apresentada na Figura 3.7, onde mostra um pequeno aumento na corrente e uma considerável diminuição na tensão de circuito aberto quando ocorre a elevação da temperatura.



**Figura 3.7. - Dependência da característica corrente x tensão com a temperatura**

Observa-se também através da Figura 3.8 que, com o aumento da temperatura, a potência máxima da célula sofre um decréscimo considerável.

É importante lembrar que quando a célula é iluminada, geralmente será convertida menos que 20% da radiação solar em energia elétrica. A outra parte é convertida em calor, resultando no aquecimento da célula. Como resultado, é esperado que a célula opere em uma temperatura acima da ambiente.



*Figura 3.8. - Dependência da característica potência x tensão com a temperatura*

d) Intensidade de radiação solar

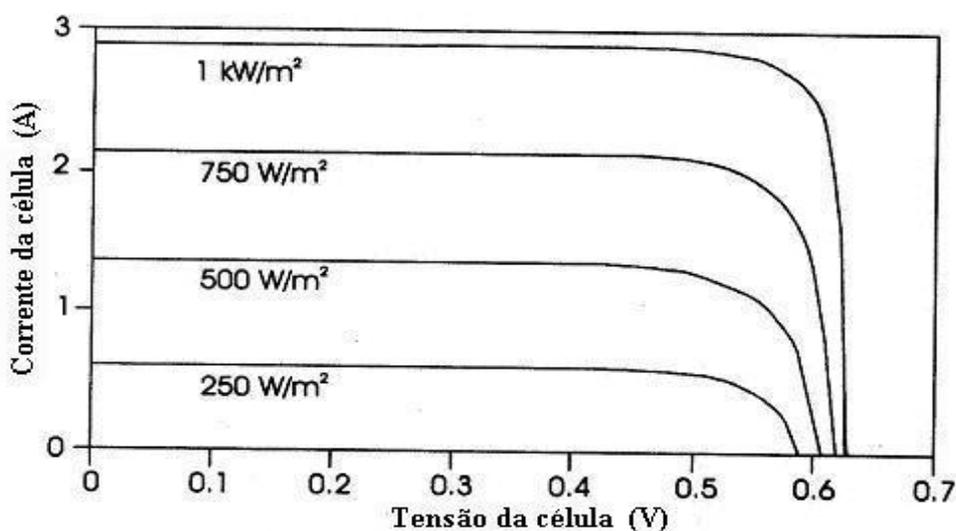
Dentro de uma ampla margem de funcionamento, a fotocorrente das células solares é diretamente proporcional à intensidade da radiação incidente. Esta proporcionalidade permite a seguinte conclusão: Se a fotocorrente, ao nível de iluminação definido como unidade (normalmente 1 Sol AM1 = 100mW/cm<sup>2</sup>) é  $I_{L1}$ , a fotocorrente a um nível de iluminação X (fator de concentração: X sóis) vezes superior é mostrado na Equação 3.17.

$$I_L = XI_{L1} \quad (3.17)$$

Se  $V_{OC1}$  é a tensão de circuito aberto a 1 Sol, a tensão a X sóis se obtêm aplicando a Equação 3.17 resulta na Equação 3.18, supondo-se que  $m$  e  $I_0$  sejam alteradas sensivelmente ao aumentar o nível de iluminação.

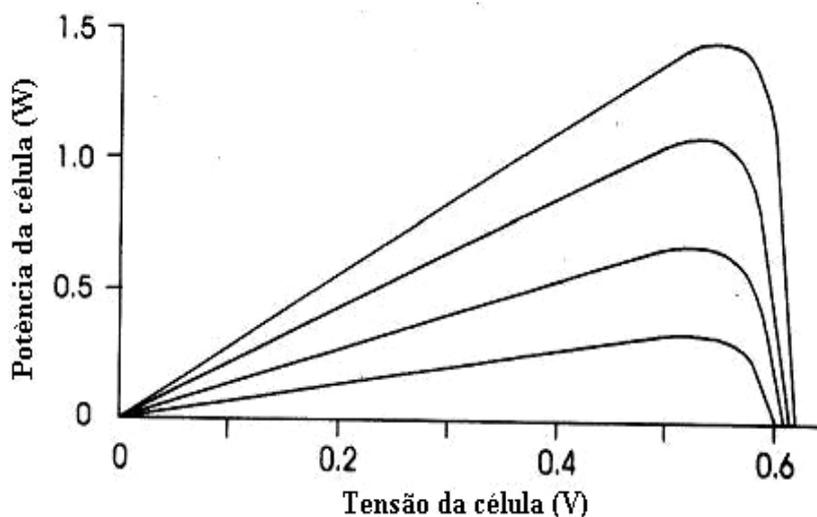
$$V_{OC} = V_{OC1} + m \frac{kT}{e} \ln X \quad (3.18)$$

Assim, como mostrado na Figura 3.9, com o aumento do índice de iluminação a corrente aumenta linearmente e a tensão de circuito aberto aumenta logaritmicamente.



**Figura 3.9. - Características I-V de células fotovoltaicas ideais com diferentes níveis de iluminação**

Observa-se também, através da Figura 3.10 que a potência fornecida pelo módulo fotovoltaico aumenta linearmente com o aumento do índice de iluminação.



*Figura 3.10. - Potência x tensão para uma célula fotovoltaica para quatro níveis de iluminação*

### 3.3. Armazenador de Energia

Os armazenadores ou acumuladores de energia são de extrema importância para os sistemas fotovoltaicos. Os armazenadores se adaptam às diferentes taxas de produção e demanda de energia, se ocorre uma produção superior à demanda de energia há o armazenamento, que poderá ser usado quando a geração é insuficiente para atender as cargas solicitadas a noite ou em dias nublados, de baixa insolação. Em alguns casos, a presença de acumuladores eletroquímicos é dispensável. O sistema fotovoltaico voltado ao bombeamento de água é um exemplo.

A tensão da bateria depende do seu estado de carga, data de fabricação, temperatura, regime de carga e descarga, etc. Esta tensão é imposta a todos os elementos a que ela estão ligados, incluindo o módulo fotovoltaico. A bateria é que determina o ponto de funcionamento do módulo. Sua amplitude de tensão está entre 12 e 14 volts.

As baterias podem ser classificadas como recarregáveis e não recarregáveis. As não recarregáveis são aquelas que apresentam uma constituição química que não admitem reações reversíveis de carga e descarga, ou seja, após o uso de sua energia elas não são reutilizadas, as baterias as recarregáveis são aquelas que admitem ciclos de carga e descarga e, de acordo com sua aplicação, podem ser classificadas conforme a Tabela 3.1 (INDEL).

Não existe um mercado específico para baterias destinadas a sistemas PV. As baterias mais comuns são as baterias de automóveis que são dimensionadas para fornecer elevadas correntes em curtos intervalos de tempo. Estas baterias, embora baratas, não são as mais aconselháveis, para sistemas FV, pois o seu tempo de vida é muito curto quando aplicadas em sistemas com elevadas profundidades de descarga.

***Tabela 3.1- Características dos tipos de baterias***

<b>TIPO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
Automotivas	São baterias indicadas para uso em automóveis uma vez que foram projetadas para operar em condições de descargas rápidas com elevados valores de correntes, e baixa profundidade de descarga.
Tração	São baterias indicadas para uso em equipamentos móveis elétricos (por exemplo, empilhadeiras e carros elétricos) que possuem características de descarga moderada e ciclo de trabalho diário profundo.
Estacionárias	São baterias indicadas para uso em equipamentos de “backup” (por exemplo, no breaks e fontes para telecomunicações) uma vez que são solicitadas ocasionalmente nos ciclos de carga e descarga.
Fotovoltaicas	São baterias específicas destinadas a sistemas FV. Mas na escolha tem que ser analisado se operam em ciclo de trabalho diário raso e ocasionalmente devem suportar descargas profundas.

Não existe um mercado específico para baterias destinadas a sistemas PV. As baterias mais comuns são as baterias de automóveis que são dimensionadas para fornecer elevadas correntes em curtos intervalos de tempo. Estas baterias, embora baratas, não são as mais aconselháveis, para sistemas FV, pois o seu tempo de vida é muito curto quando aplicadas em sistemas com elevadas profundidades de descarga.

As baterias seladas são baterias de ácido desenvolvidas propositalmente para sistemas FV. Estas baterias são mais caras e não suportam temperaturas extremas, como as baterias convencionais, mas tem a vantagem de não ser necessário restabelecer os níveis de eletrólito. As baterias NiCd são baterias robustas, leves, resistentes a temperaturas extremas, tem baixas taxas de auto descarga e agüentam perfeitamente profundidades de descarga que podem chegar abaixo dos 10%, sendo assim mais usadas em locais com condições climáticas adversas ou em locais em que é necessário grande confiabilidade. As principais desvantagens são o fato de diminuir a sua capacidade com o aumento do número de ciclos de descarga e seu elevado preço.

Alguns aspectos além da tensão nominal, devem ser levados em conta na hora de se escolher o tipo de bateria:

- faixa de temperaturas admissíveis (-15 até 50°C);
- taxa de auto descarga (2% por mês à 25°C);
- tempo de vida (1800 ciclos com 80% de profundidade de descarga);
- eficiência de carga desde 20 % descarregada;
- capacidade (Ah) para descargas de 10h;
- frequência requerida para restabelecer os níveis de eletrólito;
- peso;
- resistência à sobrecarga; custo.

Existem inúmeros tipos de baterias no mercado, dentre elas as principais são a de chumbo-ácido e a de níquel-cádmio. A de chumbo-ácido é em geral a escolhida em razão de seu baixo custo e facilidade de aquisição.

Em algumas aplicações específicas, utilizam-se acumuladores de níquel-cádmio. No entanto, o preço do Ah (Âmpere-hora) destes acumuladores é aproximadamente 30 vezes mais elevado que o dos acumuladores automotivos e entre 4 e 5 vezes mais caro que um acumulador de chumbo ácido estacionário. Por esta razão, a utilização de acumuladores de níquel cádmio restringe-se a situações excepcionais, como é o caso de aplicações onde as temperaturas de operação são extremamente baixas (OLIVEIRA,1997).

### **3.3.1. Acumuladores Eletroquímicos**

Os acumuladores eletroquímicos são denominados secundários caso exista a possibilidade de recarregá-los. Caso contrário são chamados de primários. Outros critérios de classificação existentes são a partir de:

- Tipo de eletrodo empregado como Chumbo, Lítio, Níquel, dentre outros.
- Tamanho ou capacidade de armazenamento, 100 Ah, 1,2 kWh.
- Sua aplicação: arranque, tração, entre outras.

Um metal ao ser imerso em uma solução iônica, cria-se uma diferença de potencial na interface metal-solução devido a uma redistribuição das cargas (íons) internas. Esta diferença de potencial, corretamente utilizada, pode gerar uma corrente elétrica capaz de produzir um trabalho qualquer. Cada elemento metálico é capaz de produzir uma tensão devido às características próprias de sua estrutura eletrônica. Um acumulador eletroquímico é formado pela combinação adequada de eletrodos metálicos submersos em soluções específicas, onde os processos de carga e descarga ocorrem por meio de reações químicas reversíveis de óxido-

redução, no caso das baterias secundárias. A diferença de potencial entre os dois pólos, quando não está passando corrente, é denominada de força eletromotriz da bateria e é dada pela diferença dos potenciais de redução ou oxidação dos elementos que constituem os eletrodos.

### 3.3.2. Acumuladores de Chumbo Ácido

Este tipo de bateria é ainda utilizado hoje em algumas aplicações específicas, mas devido às suas características construtivas e aos seus altos custos de produção a sua gama de aplicação é restrita. Essencialmente, a bateria de chumbo ácido possui o ânodo de dióxido de chumbo (eletrodo ou pólo positivo) e o cátodo de chumbo poroso puro (eletrodo ou pólo negativo). Como eletrólito, é usado ácido sulfúrico dissolvido em água a 37%.

No processo de descarregamento da bateria, o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) dissocia-se passando os  $SO_4$  (PB) de ambas as placas (positiva e negativa) formando nelas o sulfato de chumbo ( $PbSO_4$ ); os  $H_2$  roubam o oxigênio do óxido de chumbo ( $PbO_2$ ) da placa positiva, formando água ( $H_2O$ ); que diminui a concentração ácida do eletrólito. A reação química gera a corrente elétrica (elétrons livres que lentamente se reúnem nas placas negativas). Se o processo continuar, o eletrólito pode se transformar em água pura e as placas podem ser cobertas de sulfatação ( $PbSO_4$ ), e então a atividade elétrica dentro da bateria pode ser paralisada.

A carga elétrica fluindo ao contrário faz a sulfatação liberar seu sulfato para a solução eletrolítica. O processo faz a placa e a solução voltarem à sua composição original. Pode se ver bolhas que são formadas de oxigênio e hidrogênio. Estes gases são expelidos pelo respiro. A água é formada pela combinação dos gases oxigênio ( $O_2$ ) e hidrogênio ( $H$ ) = ( $H_2O$ ), razão pela qual só se deve completar o nível com água destilada.

### **3.3.3. Ciclo de Vida Útil**

A vida útil de uma bateria está vinculada aos ciclos de carga descarga. A repetição de ciclos é chamada ciclagem. Se descarregar repetidamente os acumuladores eletroquímicos estes diminuem progressivamente sua capacidade total. Isso é devido ao fato de que com o aumento da superfície dos eletrodos, originados pelas sucessivas recargas, são criadas tensões mecânicas internas, fazendo com que o material ativo se desprenda e caia, ocorrendo assim a perda do material e, conseqüentemente a sua capacidade de acumular energia diminui.

Essa perda na capacidade aumenta com o número de cargas e descargas e, principalmente com o aumento da profundidade de descarga adotada em cada ciclo. Costuma-se assumir como limite de utilização da bateria quando esta tem sua capacidade diminuída para cerca de 80% de seu valor nominal (LORENZO, 1994).

### **3.4. Controladores**

O controlador ou regulador de carga tem como função regular a tensão obtida do painel solar num valor adequado para a recarga das baterias, bem como protegê-las de uma descarga profunda, decorrente de um longo período sem sol, prolongando sua vida útil. Ambas as situações colaboram diretamente no aumento da vida útil das baterias, e diminui o risco de danos nos fios ou fogo provocado por curto-circuito.

Outras denominações podem ser atribuídas aos controladores de carga, de acordo com o nível de sofisticação de cada um, por exemplo, regulador de carga, gerenciador de carga, regulador de tensão, e etc. Entende-se por nível de sofisticação os recursos de controle, proteção e sensores utilizados.

O regulador de carga controla a cada momento a tensão dos acumuladores durante o processo de carga. Quando completa a carga o regulador interrompe a corrente evitando a

perda de eletrólito e um possível aquecimento nos acumuladores. Quando a tensão do acumulador desce o regulador volta a permitir a passagem de corrente. A maioria dos reguladores dispõe de um alarme que informa quando é atingido o nível mínimo de tensão na bateria. Quando atingido o regulador desliga as cargas até que o nível de tensão suba e deixe de ser perigoso para o acumulador.

Os limites de tensão para carga e descarga das baterias estão relacionados com a temperatura. Todos os bons reguladores dispõem de um dispositivo de compensação por temperatura. Com este dispositivo consegue-se controlar corretamente a carga e a descarga de um acumulador a qualquer temperatura, alcançando sempre os 100% de carga e não permitindo perdas desnecessárias de eletrólito.

Existem basicamente dois tipos de reguladores: os que são conectados em paralelo e aqueles que são conectados em série. Os reguladores conectados em paralelo são constituídos de transistores que dissipam a potencia gerada em excesso, quando a tensão nos pólos da bateria atingir um determinado valor. A tensão de corte recomendada é de 2,45V/elemento quando a temperatura for de 25° C. Neste caso, é conveniente instalar um diodo de bloqueio entre a bateria e o transmissor para evitar dissipação de energia das baterias através dos transistores. Este tipo de procedimento é aconselhável para sistemas pequenos, com correntes de carga  $< 10$  [A] (COPETTI, 1993).

Os reguladores conectados em série desconectam os painéis das baterias quando a tensão atinge um determinado valor pré-fixado. O interruptor utilizado pode ser um dispositivo eletromecânico (relê) ou estático (transistor MOS).

Para a proteção de sobrecarga, desconecta-se o gerador fotovoltaico da bateria quando a tensão em seus pólos atinge cerca de 2,45V/elemento, voltando a conectá-la quando a tensão cair para 2,2 V/ elemento. Para proteção da descarga excessiva, desconecta-se a carga

da bateria quando a tensão em seus pólos atingir um valor determinado pela profundidade de descarga máxima estipulada para o subsistema de acumulação em questão. O controlador de carga volta a conectar a carga na bateria quando a tensão nos pólos desta atingir cerca de 2,1 V/elemento. Estes valores de tensão podem variar segundo o tipo e o regime de trabalho dos acumuladores (OLIVEIRA, 1997).

### **3.5. Inversores**

Os inversores de tensão são usados em um sistema solar elétrico para converter voltagem em corrente contínua para voltagem em corrente alternada. Isto se torna necessário quando se usa equipamentos que trabalham apenas em voltagens alternadas (ROBERTS, 1990).

O inversor é um equipamento auxiliar de acondicionamento de potência que objetivo converter a corrente contínua do gerador fotovoltaico e/ou das baterias, em corrente alternada, com a tensão desejada. Normalmente são utilizados para alimentar cargas que consomem energia CA em valor comercial (tensões de 120VCA ou 240VCA, nas frequências de 50 ou 60 Hz) ou aquelas que somente estão disponíveis para este tipo de energia. Esse importante dispositivo vem ampliar o uso final da energia gerada pelo sistema fotovoltaico, e ainda ocupa muito esforço de pesquisa na área de condicionamento de potência, na busca do aumento de desempenho e do barateamento do produto no mercado.

Os inversores de carga de boa qualidade são caros. Também, tornam os sistemas fotovoltaicos mais complicados, pois é adicionada uma outra unidade que pode falhar e ser de difícil reparo. Além disto, ocorre diminuição no rendimento global do sistema, já que existem perdas no processo de inversão de corrente. Sua classificação geralmente é de acordo com o tipo da tensão CA produzida em sua saída. A Tabela 3.2 apresenta os tipos existentes.

*Tabela 3.2 - Comparativo entre Inversores com diferentes formas de Onda.*

TIPO	CARACTERISTICAS
Inversores de onda quadrada	<p>A tensão de onda quadrada é obtida apenas alternando-se a contínua e, por este fato, oferece baixa regulação e uma quantidade de harmônicos alta.</p> <p>Ao se comparar a operação de um motor elétrico com a tensão CA fornecida pelo inversor e a tensão senoidal da rede elétrica comercial, verifica-se que o motor possui apenas 60% do seu torque e aquecimentos indesejáveis.</p> <p>São mais baratos (se comparados aos demais) e adequados para uso com cargas resistivas como, por exemplo, lâmpadas incandescentes.</p> <p>Não são recomendados para cargas indutivas como motores elétricos.</p>
Inversores de onda quadrada modificada	<p>Trata-se de uma versão melhorada dos inversores de onda quadrada, ou seja, chaveamentos adicionais são feitos para que a forma de onda se aproxime de uma senoidal, diminuindo assim a quantidade de harmônicos. São adequados para uso com diversos tipos de cargas tais como, lâmpadas, equipamentos eletrônicos e a maioria dos motores elétricos. Para este último, o inversor permite obter um menor aquecimento e melhor torque de partida/ operação devido a tensão e corrente de pico maiores, entretanto, o valor da tensão não deve ser excessiva.</p>
Inversores PWM (Pulse Width Modulation)	<p>A partir de uma técnica de chaveamento denominada modulação por largura de pulso, estes inversores fornecem uma taxa de distorção harmônica muito baixa na tensão de saída.</p> <p>São adequados para quase todas as cargas CA, exceto equipamentos muito sensíveis.</p>
Inversores PWM senoidal	<p>Utiliza-se da técnica PWM somente que com uma filtragem posterior.</p> <p>São os mais caros, porém, desde que adequadamente dimensionados são os que produzem tensão de saída e desempenho mais adequados para alimentação de qualquer tipo de carga CA.</p>

Um outro uso para os inversores de tensão está em sistemas que cobrem uma grande área. A seção dos cabos para longas distâncias é reduzida quando a operação se dá em voltagens mais elevadas, reduzindo conseqüentemente os custos destes sistemas. Devem trabalhar em regime de 70 a 90% de carga, faixa onde a eficiência está entre 85 a 90 % (ROBERTS, 1991).

Os inversores são dimensionados considerando-se basicamente os seguintes fatores:

- A potência elétrica que deverá ser fornecida em condição normal de operação;
- A potência de pico necessária para partir cargas que requeiram uma energia elétrica momentânea maior do que a nominal, por exemplo, um motor para entrar em funcionamento precisa de 7 a 10 vezes a corrente nominal por um breve período de tempo;
- A tensão de alimentação CC e a faixa de variação admitida.

### **3.6. Fios, Conexões e Suporte**

Parte integrante dos sistemas são responsáveis em transmitir a energia, em fixar e conectar, um com os outros, os diversos componentes que compõem o sistema. É importante tomar cuidado com este aspecto das instalações, em muitos casos deixados de lado por serem, em geral, considerados de menor importância em relação ao sistema como um todo.

A utilização de fios impróprios pode gerar perdas, tornando a energia gerada ainda mais cara. Os suportes e fixações devem ser escolhidos e instalados de forma a garantir um longo período de vida útil (tipicamente 20 anos) sob exposição a duras e diversas condições climáticas [ROBERTS, 1991]. Por isso devem ser equipamentos de qualidade, o que evitará ou diminuirá em muito as falhas ou danos ao sistema. As seções dos fios devem ser escolhidas de modo a evitar perdas significativas de energia no transporte.

Para diminuir as perdas e garantir uma maior vida útil utiliza-se fios de cobre, podendo ser rígidos ou flexíveis de acordo com a utilização. Os rígidos são aconselhados para uso na rede, enquanto que os flexíveis para instalações locais.

É importante observar o código padrão de cores para fios e condutores utilizados internamente em sistemas de corrente contínua: vermelho (+) pólo positivo; preto (-) pólo negativo.

### **3.7. Cargas**

Um sistema fotovoltaico é estruturado de acordo com a carga elétrica que vai abastecer. Conhecer as características da carga, qual a sua magnitude e como ocorre o consumo energético médio permite-nos dimensionar adequadamente o sistema, para apresentar um risco de déficit mínimo a um mínimo custo.

Sobre o ponto de vista do dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, cada carga elétrica individual caracteriza-se por 3 parâmetros:

- tensão - (no caso trabalhamos apenas com corrente contínua)
- corrente
- perfil de consumo.

Para estruturar um sistema fotovoltaico é imprescindível estimar em que momento do dia, mês, ano espera-se que esteja ocorrendo o consumo. Isto permitirá conhecer:

- o consumo energético médio de cada período considerado,
- a simultaneidade entre consumo e geração,
- a demanda de pico de energia e seu período de duração.

### **3.7.1. Iluminação**

Quando se trata de consumidor de baixa renda a aplicação principal do sistema fotovoltaico é para a iluminação. Por isso, alguns aspectos importantes devem ser observados para sua implantação, tais como a eficiência das lâmpadas, intensidade da luz (luminosidade), a potência instalada, requisitos de uso e custo.

Atualmente, as principais aplicações de Sistemas Fotovoltaicos para iluminação são:

- iluminação interna em residências, escolas, postos de saúde etc;
- iluminação externa, em postes de rua (iluminação pública);
- iluminação de placas de publicidade;
- luzes de emergência;
- sinalização marítima, aérea e terrestre.

#### **3.7.1.1. Alguns tipos de lâmpadas**

##### **a) Lâmpadas incandescentes**

As lâmpadas incandescentes possuem características construtivas formadas basicamente por um filamento de tungstênio inserido dentro de um bulbo de vidro com vácuo. A circulação de uma corrente elétrica pelo filamento faz com que este se aqueça e irradie luz por meio de incandescência. As lâmpadas incandescentes possuem baixa eficiência de iluminação pois, grande parte da energia consumida é transformada em calor, sendo assim não adequada aos sistemas fotovoltaicos.

##### **b) Lâmpadas incandescentes halógenas**

Estas lâmpadas possuem características construtivas semelhantes as incandescentes comuns, porém, o bulbo de vidro é substituído pelo material quartzo e o vácuo, por um gás de iodo devido ao maior calor gerado. Elas duram quase duas vezes mais que as lâmpadas

incandescentes convencionais e sua eficiência de iluminação é o dobro e estão disponíveis em uma ampla faixa de potência. Algumas delas podem operar em 12Volts (CC).

c) Lâmpadas fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes possuem características construtivas formadas por um tubo de vidro, cujas extremidades possuem eletrodos de tungstênio recobertos por uma camada de óxidos emissores de elétrons, um gás inerte (argônio) em seu interior para descarga inicial e gotas de mercúrio que serão vaporizadas no período de aquecimento da lâmpada. As descargas elétricas em contato com o gás produzem luz ultravioleta (ou luz invisível) e que são corrigidas por uma substância fosforescente depositada no interior do tubo cilíndrico tornando-as visíveis.

Além das lâmpadas fluorescentes de formato tradicional tem-se à disposição lâmpadas de comprimento reduzido, ou compactas chamadas de PL (Parallel Length). Devido à sua boa eficiência, são muito utilizadas em projetos de iluminação com sistemas fotovoltaicos.

Para efeito de comparação entre lâmpadas incandescentes e fluorescentes PL veja a Tabela 3.3 a seguir.

***Tabela 3.3 – Comparativo entre lâmpadas fluorescente PL e incandescente***

<b>Tipo</b>	<b>Potência consumida (Watts) para iluminação equivalente</b>			
PL	9	11	15	20
Incandescente (127V)	25	40	60	75
Incandescente 220V	40	60	75	100

Encontram-se também no mercado lâmpadas fluorescentes modelo PL, com conversores acoplados, adequados a receber alimentação em 12 Volts ou 24 volts. Se se desejar utilizar PL's comuns de 127 Volts ou 220 Volts, deve-se adquirir inversores para conversão de tensão.

d) Lâmpadas de vapor de sódio de baixa pressão

As lâmpadas de vapor de sódio são constituídas por um tubo de descarga interno (envolto numa camisa a vácuo) que contém uma mistura de neônio e argônio que respondem por sua partida e sódio metálico que no funcionamento produz a luz de tom amarelado. Nas extremidades do tubo existem eletrodos recobertos por óxidos emissores de elétrons.

A composição espectral deste tipo de lâmpada é praticamente monocromática e por este motivo distorce as cores e, portanto, seu uso é recomendado para iluminação de áreas externas.

**3.6.1.2 – Tipos disponíveis no mercado**

Os tipos de lâmpadas incandescentes, halógenas, fluorescentes e fluorescentes compactas atualmente disponíveis no mercado e adequadas em Sistemas Fotovoltaicos CC são apresentados na Tabela 3.4.

*Tabela 3.4 – Potencia disponíveis para os diversos tipos de lâmpadas*

<b>Tipos de Lâmpadas</b>	<b>Potencias disponíveis</b>	<b>Observações</b>
Incandescentes	12V (CC): 5W, 10W, 15W, 25W, 50W, 75W, 100W 24V (CC): 25W, 60W, 100W	Não recomendadas devido a baixa eficiência
Halógenas	12V (CC): 10W, 17W, 20W, 25W, 35W, 50W 24V (CC): 25W, 50W	Produzem 30% mais luz do que as lâmpadas incandescentes convencionais
Fluorescentes	8W, 15W, 20W, 22W, 32W, 40W	Necessitam de reatores para 12V (CC), 24V (CC)
Fluorescentes Compactas	5W, 7W, 9W, 11W, 13W, 18W, 26W	Necessitam de soquetes e reatores para 12V (CC), 24V (CC) dependendo da aplicação

### **3.7.2. Bombeamento**

#### **3.6.2.1 – Bombas Centrífugas**

As bombas centrífugas são em geral adequadas para aplicações que exigem grandes volumes de água e pequenas alturas monométricas (reservatórios superficiais ou cisternas). Possuem pás ou impelidores que giram em alta velocidade, criando pressão e forçando o fluxo de água.

Pequenas mudanças no nível de insolação resultarão em grandes mudanças na saída da bomba, podendo levá-la a não superar a altura monométrica necessária, e em alguns casos o funcionamento será interrompido até o retorno de níveis de insolação mais elevados.

Existem duas classes principais de bombas centrífugas: as submersíveis e as de superfície. As submersíveis trabalham “afogadas” enquanto que as de superfície necessitam de um cano para sucção. Para as bombas de superfície recomenda-se uma altura de sucção máxima de aproximadamente 6 metros, sendo as auto-aspirantes são capazes de superar essa altura.

#### **1.7.2.2 - Bombas Volumétricas**

Também chamadas de bombas de deslocamento positivo, são adequadas quando se deseja grandes alturas manométricas com pequenos ou moderados volumes de água. A eficiência dessas bombas aumentam com a altura manométrica.

As características de operação das bombas volumétricas não se ajustam tão bem com a saída do arranjo fotovoltaico quanto as das centrífugas. Controladores eletrônicos são extremamente necessários. Eles irão ajustar o ponto de operação do arranjo fotovoltaico, de modo a oferecer a máxima corrente para a partida do motor. Muitos controladores apresentam um seguidor do ponto de máxima potência (MPPT). Os seguidores permitem a operação para

uma extensa faixa de níveis de insolação, altura manométrica e vazões de água, solucionam o problema da partida de bombas volumétricas e consomem tipicamente, de 4 a 7% da potencia de saída do arranjo fotovoltaico.

Geralmente as bombas volumétricas são instalados para vazões na faixa de 0,3 – 40 m<sup>3</sup>/dia e altura manométrica de 10 – 500 metros

### **3.7.3. Refrigeração**

Uma das principais aplicações dos refrigeradores em Sistemas Fotovoltaicos é a conservação de vacinas, que devem, em geral, ser mantidas entre 0 e 8°C. Necessitando assim de produção de gelo para o transporte das vacinas.

É recomendado que os refrigeradores tenham alto rendimento, minimizando as perdas de calor através de suas paredes e reduzindo significativamente a quantidade de energia consumida. Os refrigeradores são alimentados em 12V (CC) ou 20V (CC), possuem um grupo compressor hermético de alta confiabilidade, motores em corrente contínua que operam em baixa tensão e são usados para acionar o compressor, e este pode ser diretamente conectado à bateria.

### **3.7.4. Telecomunicação**

Os sistemas de telecomunicações de baixa potência que se encontram instalados em locais remotos de acesso limitado necessitam de equipamentos de alta confiabilidade para o fornecimento de energia elétrica. Os sistemas fotovoltaicos por apresentarem simplicidade e reduzida manutenção são recomendados para esta finalidade.

As aplicações mais comuns para telecomunicações são: Estação remota de rádio, repetidoras de telefone celulares, telefone de emergência em estrada; etc

### **3.7.5. Eletrificação de cercas**

As cercas elétricas são soluções de baixo custo que permitem realizar subdivisões de pastagens cultivadas ou em campo natural, utilizados na criação de animais tais como, bovinos, eqüinos, caprinos, suínos e etc. Em locais de acesso limitado a rede de energia elétrica, o uso de sistema fotovoltaico composto de um pequeno painel solar e bateria pode ser viável.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISE PARA PROJETO

Vários trabalhos sobre metodologias de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos que se utilizam do estabelecimento de relações entre o recurso energético e a carga instalada são encontrados na literatura. [Clark et al., 1984], [Siegel et al., 1981], [Barra et al., 1984], [Imamura, 1991]. Alguns relacionam, de forma breve, o método por eles propostos de modo a garantir o abastecimento, atrelado ao custo do sistema [Groumpos & Papageorgiou, 1987]. Muitos autores, no entanto, vêm atrelando, de forma direta, a garantia de fornecimento energético ao processo do dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos [Egido & Lorenzo, 1992], [Martins, 1994]. Assim, estes autores buscam fornecer mais critérios para a decisão com enfoque na configuração que otimize as necessidades energéticas à disponibilidade financeira.

A fim de garantir um projeto econômico, funcional e eficaz o projetista deve ser criterioso durante a avaliação do processo de escolha das varias combinações possíveis para atender da melhor forma as solicitações de carga.

O conhecimento dos detalhes de funcionamento dos componentes é extremamente importante para que o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos seja feito de forma correta

e cuidadosa, proporcionando um sistema eficiente e durável, sem causar qualquer tipo de risco aos seus usuários, de fácil instalação e manutenção, visto que grande parte dos sistemas são instalados em lugares remotos e inóspitos.

#### **4.1. Legislação em vigor e normas ABNT**

O sistema elétrico brasileiro se encaminha para a condição de mercado livre, com a introdução da figura do produtor independente de energia e também do consumidor livre. A legislação que rege a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil não previa ainda os sistemas fotovoltaicos integrados a edificações urbanas e interligados a rede elétrica convencional. O contexto técnico-político em que tais sistemas se inserem ainda é tema de debate em todo o mundo e mais recentemente inclusive no Brasil [IEE-USP,1998; Oliveira e Zilles, 2002] .

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, órgão público responsável por regular o mercado de energia elétrica, enquadra tais sistemas no contexto do sistema energético brasileira em função de algumas leis como se segue: a lei 8.631/93 dispõe sobre os níveis tarifários e a extinção da remuneração garantida; a lei 8.987/95 dispõe sobre o regime de concessão e permissão de serviço público; a lei 9.074/95 estabelece normas para outorga e prorrogação de concessões e permissões; o decreto 2.003/98 regulamenta a produção de energia elétrica de Produtores Independentes de Energia (PIEs) e Auto Produtores (APs), e o decreto 2.655/98 regulamenta o Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE) e define regras de organização do Operador de Nacional do Sistema Elétrico (ONS). A resolução 112/1999, de 18 de maio de 1999, estabelece os requisitos necessários à obtenção de registro ou autorização para implantação ou repotenciação de centrais geradoras de fontes alternativas

de energia (incluindo as centrais geradoras fotovoltaicas), ver resolução e Ficha Técnica no Anexo 4.

## **4.2. Etapas do Projeto de um Sistema Fotovoltaico**

Na elaboração de um projeto elétrico de um sistema fotovoltaico devem ser seguidos critérios que permitam ao sistema, operar de modo eficiente (sem perdas demasiadas de energia), ser seguro eletricamente e obedecer às normas locais de instalações elétricas como a NBR5410 –Instalações elétricas de baixa tensão.

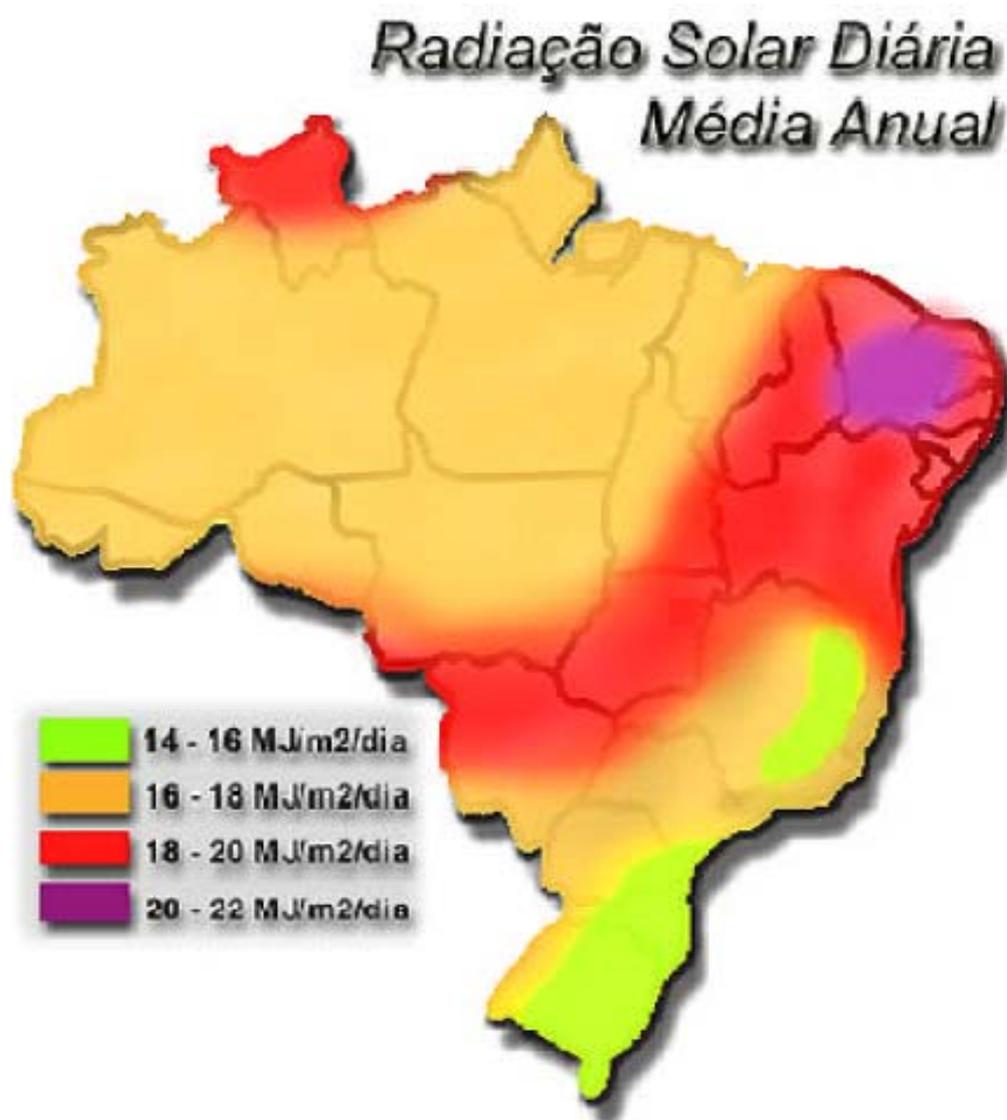
### **4.2.1. Recurso Solar**

Para um bom dimensionamento de um sistema fotovoltaico é importante conhecer o valor da radiação solar existente na localidade de implantação do projeto, assim como a temperatura ambiente, pois a energia gerada é dependente das mesmas (ver Item 3.2.4).

Um modo bastante conveniente de quantificar a energia solar acumulada no período de um dia é através do número de horas de insolação útil (ou sol pleno conforme algumas bibliografias). Esta grandeza reflete a quantidade de horas em que a energia solar irradiada permanece constante em  $1000\text{W}/\text{m}^2$  (valor de referência considerado na determinação dos parâmetros elétricos dos painéis fotovoltaicos), ou seja, a energia total acumulada em um dia pode ser considerada como valor constante. Seja o exemplo em que a energia acumulada num dia é de  $10\text{kWh}/\text{m}^2$ , assim a insolação útil vale 10 horas por dia.

Existem bibliografias que trazem mapas de insolação do Brasil para cada mês do ano, como o Atlas solarimétrico do Brasil, como no exemplo da Figura 4.1 e o Atlas de Irradiação Solar do Brasil, porém, o seu uso é recomendado somente quando não é possível obter dados mais precisos, devendo lembrar da necessidade de séries históricas com no mínimo 3 anos de

registro para redundância. Informações sobre insolação podem também ser obtidas por meio do programa SUNDATA.



*Figura 4.1- Radiação solar média diária. Fonte: Atlas solarimétrico do Brasil*

O desempenho das placas fotovoltaicas é bastante influenciado pela temperatura e pelo índice de radiação solar. Com a elevação do índice de insolação ocorre um aumento linear da

corrente e logarítmico da tensão, os quais influenciam proporcionalmente no aumento da potência máxima. Para a variação da temperatura, ocorre o contrário da insolação, à medida que se tem uma elevação da temperatura ambiente nota-se um decréscimo da potência máxima, devido a corrente permanecer praticamente constante e a tensão diminuir.

Quando o fabricante informa que uma placa fotovoltaica fornece uma determinada potência, é baseado em testes de laboratório para valores fixos de temperatura (25°C) e radiação (1000W/m<sup>2</sup>). Para um melhor dimensionamento se torna necessário uma análise para a região em estudo, baseado na média da temperatura e do índice de insolação locais. Assim pode-se analisar o rendimento do módulo fotovoltaico para valores específicos do local em questão.

#### **4.2.2. Escolha da configuração**

Deve-se escolher a configuração básica de sistema fotovoltaico a ser utilizada uma vez que esta dependerá exclusivamente do tipo de aplicação que se destina. Por exemplo, no caso de iluminação residencial será necessário utilizar-se de baterias visto que, normalmente ela é utilizada no período noturno. No caso de uma bomba d'água utilizada para irrigação não serão necessárias baterias pois os painéis solares podem ser conectados diretamente ao motor elétrico.

Durante a escolha da configuração, as seguintes considerações devem ser levadas em conta:

- sistema de armazenamento (qual o tipo de bateria a ser utilizada, aberta ou seladas, ciclo raso ou profundo, automotiva ou estacionária, autonomia, etc.);
- dimensionamento dos painéis fotovoltaicos;
- necessidade de uso do controlador de carga ou conversor CC-CC;

- necessidade de uso de inversor.

### 4.2.3. Cálculo do consumo das cargas

O consumo das cargas deve ser calculado com base diária considerando a sazonalidade semanal para cargas CA e CC. Para tanto são usados fatores de eficiência para a conversão de potencia, baterias e fiação. Os consumos para cargas de corrente-contínua (Cons1) e corrente alternada (Cons2) são dados por:

$$Cons1 = Pot.h \quad (4.1)$$

$$Cons2 = \frac{Pot.h}{EfCon} \quad (4.2)$$

$$ConsTotal = (Cons1 + Cons2).C1 \quad (4.3)$$

$$PotInst = \frac{ConsTot}{H} \quad (4.4)$$

onde:

Cons1= consumo para cargas de corrente-contínua [Watth];

Cons2= consumo para cargas de corrente alternada [Watth];

h = número de horas de funcionamento do equipamento [h];

EfCon= eficiência do conversor CC-CA [%/100];

ConsTotal= consumo total [Watth];

C1= coeficiente de segurança para perdas [ - ];

H = horas de Máxima radiação solar, gira em torno de 9 às 15hs, por isso utiliza-se na media entre 5 e 6 horas [h].

A eficiência do conversor gira em torno de 90% e segundo [Boily(1998)] para um projeto preliminar de SF utiliza-se coeficiente de segurança de 10% (C1=1.1)

#### 4.2.4. Valor da corrente

Para o calculo da corrente é necessário obter o valor da potência instalada.

$$I1 = \frac{Cons1}{V} \quad (4.5)$$

$$I2 = \frac{Cons2}{V} \quad (4.6)$$

$$I_{total} = \frac{(I1 + I2).C1}{H} \quad (4.7)$$

$$IBat = \frac{(I1 + I2).C1.D}{AmpDesc.EfCon} \quad (4.8)$$

onde:

I1= Corrente das cargas CC [Ah];

I2 = Corrente das cargas CA [Ah];

Itotal = Corrente total em Ah por dia [Ah];

V = Tensão nominal do sistema [V];

ConsTot = consumo total [Watt];

H = horas de Máxima radiação solar [h];

Ibat = Corrente da Bateria [A];

AmpDesc = amplitude de descarga da bateria;

EfCon = eficiência do conversor.

#### 4.2.5. Dimensionamento do Banco de Baterias

Para um bom dimensionamento do banco de baterias é necessário saber a capacidade de armazenamento ou reserva das baterias (Watt) e a amplitude de descarga das mesmas

(%). Para isso é necessário que se conheça e se possa analisar dados de varias baterias. A capacidade da bateria é dada por:

$$\text{Bat} = \frac{\text{ConsTot.D}}{\text{AmpDesc.EfCon}} \quad (4.9)$$

onde:

Bat= reserva ou capacidade da bateria em [Watt];

ConsTot= consumo total [Watt];

D= número de dias independentes [ - ];

AmpDesc= amplitude de descarga [ - ];

EfCon= eficiência do conversor [%/100].

Conhecida a capacidade da bateria esta pode ser convertida em Ah usando-se a Equação 4.10. Para passar para Ah basta:

$$\text{Bat(Ah)} = \frac{\text{Bat}}{V} \quad (4.10)$$

onde:

Bat(Ah)= reserva da bateria em Ah;

V= tensão nominal [V].

O banco de baterias pode ter um arranjo paralelo (Equação 4.11) e em série (Equação 4.12) que fornece o número total de baterias (Equação 4.13).

$$\text{BatPar} = \frac{\text{Bat(Ah)}}{CBS} \quad (4.11)$$

$$\text{BatSer} = \frac{VS}{V\text{Bat}} \quad (4.12)$$

$$\text{NBat} = \text{BatPar} \times \text{BatSer} \quad (4.13)$$

onde:

BatPar= Quantidade de baterias em paralelo;

CBS= Capacidade nominal da bateria selecionada [Ah];

BatSer= Quantidade de baterias em série;

VS= Tensão nominal do sistema [V];

Vbat= Tensão nominal da bateria [V];

Nbat= Número total de baterias.

#### 4.2.6. Determinação dos painéis fotovoltaicos

Para se determinar o número de painéis fotovoltaicos é necessário verificar se os mesmos serão colocados em série ou em paralelo.

Para um arranjo em série o número de painéis ( $M_s$ ) é dado por:

$$M_s = \frac{V_{carga}}{V_{painel}} \quad (4.14)$$

onde:

$M_s$ = número de painéis em série;

$V_{carga}$ = tensão da carga [V];

$V_{painel}$ = tensão do painel [V].

Para um arranjo em paralelo o número de painéis ( $M_p$ ) é dado por:

$$M_p = \frac{I_{carga}}{I_{painel}} \quad (4.15)$$

onde:

$M_p$ = número de painéis em paralelo;

$I_{carga}$ = corrente da carga [A];

$I_{painel}$ = corrente do painel [A].

Assim o número total de módulos ( $M$ ) é dado por:

$$M = M_p.M_s \quad (4.16)$$

onde:

M = número total de painéis;

M<sub>p</sub>= número de painéis em paralelo;

M<sub>s</sub>= número de painéis em série.

A área em m<sup>2</sup> que os módulos vão ocupar é calculada multiplicando-se a área de cada módulo (A<sub>M</sub>) pelo número de módulos.

$$A = A_M.M \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.17)$$

#### **4.2.7. Determinação do Inversor**

O inversor é dimensionado ou escolhido pela potência instalada do sistema, fazendo uma análise do que o mercado oferece; valores relativos a preço e vida útil para suprimento da necessidade em específico.

#### **4.2.8. Determinação do Controlador de carga**

O controlador de carga deve suportar a corrente das cargas e a corrente nominal da placa escolhida.

$$I_{conv} = I_{total} + I_{scMS} \quad (4.18)$$

onde:

I<sub>conv</sub>= corrente do conversor [A];

I<sub>total</sub>= corrente total das cargas [A];

I<sub>scMS</sub>= corrente nominal da placa escolhida [A].

### **4.3. Instalação**

Devem ser observadas algumas recomendações para que a instalação seja realizada adequadamente e se obtenha um melhor resultado. Não é objetivo desta seção atender a sistemas de grande porte, pois, os mesmos devem ser tratados com atenção especial.

#### **4.3.1. Recomendações gerais sobre segurança**

Recomenda-se consultar normas e códigos locais de instalações elétricas convencionais visto que, muitas delas são aplicáveis ao projeto e instalação de sistemas fotovoltaicos. A instalação deve ser feita por um técnico devidamente qualificado e com conhecimento sobre o assunto.

Segue abaixo algumas sugestões de segurança [National Electric Code – NEC]:

- Estabelecer e cumprir os procedimentos de segurança pessoal e manuseio dos equipamentos;
- seguir códigos locais para a instalação elétrica, desde que existente;
- proteger os painéis fotovoltaicos e as cargas (com cercas ou algo similar) em caso de seu fácil acesso por pessoas não treinadas ou capacitadas;
- os equipamentos tais como, baterias, controladores de carga, comandos e etc, devem ser protegidos contra poeira, umidade e insetos;
- fixar em local visível, as instruções de como proceder a desconexão de energia do equipamento antes dos serviços e sua reconexão;
- cobrir os painéis fotovoltaicos com uma manta ou qualquer outro material opaco para reduzir o risco de choque elétrico quando estiver instalando o sistema;
- instalar uma chave seccionadora manual local para permitir a abertura de circuitos com cargas elétricas distantes.

Deve ser observado que algumas configurações dos sistemas fotovoltaicos podem apresentar valores de tensão e corrente letais.

O manuseio das baterias deve ser precedido de cuidados pois, contém elementos químicos perigosos, e alta densidade de energia.

#### **4.3.2. Locação dos painéis fotovoltaicos**

É um aspecto importante a ser considerado, pois, pode haver conflito entre a vontade de colocá-lo mais próximo da bateria/carga e o melhor ponto de recebimento de irradiação solar. Os painéis fotovoltaicos devem ser locados em posições suficientemente distantes de objetos que possam encobrir a luz do sol no período de melhor insolação.

Deve ser levado em consideração o fácil acesso ao painel para uma eventual manutenção e para a limpeza, a qual deve ser feita utilizando água e sabão, esfregando com pano limpo e macio a superfície do painel (de maneira suave) enxaguando-o com água em abundância. Não deixar que árvores cresçam próximas ao painel, pois galhos podem cair e danificar o sistema. Em caso de construção de uma nova edificação é necessário a verificação se essa não irá em nenhum dia do ano sombrear o painel.

#### **4.3.3. Orientação dos painéis fotovoltaicos**

Na orientação do painel fotovoltaico devem ser consideradas, duas condições, para que seja obtida a máxima captação solar o ano inteiro.

A primeira condição é de que o painel solar seja orientado na direção da linha do Equador. No caso do território brasileiro ou aqueles localizados no hemisfério sul, o painel deve ser orientado em direção ao norte verdadeiro, porém, se o clima local variar muito durante um dia típico, esta regra pode não ser válida. Na maioria das regiões, o norte

verdadeiro não coincide com o norte magnético indicado pela bússola devido a desvios provocados por campos magnéticos próximos logo, para uma correta leitura, deve-se aplicar a correção angular obtida em mapas de declinação magnética.

A segunda condição refere-se ao ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos, geralmente, a inclinação deve ser igual à latitude do local de instalação, porém, nunca inferior a 10 graus para favorecer a auto limpeza da superfície. Em locais com alta concentração de poeira, deve-se promover a limpeza periódica a fim de manter as características de desempenho.

Para otimizar a geração de energia, já que esta varia com a época do ano, a inclinação do painel solar deve estar dentro de 15 graus em torno da latitude local, ou seja, se a localidade tem a latitude de 30 graus, a inclinação pode variar entre 15 e 45 graus sem que haja perda significativa em seu desempenho anual [GTES, 1999].

#### **4.3.4. Suporte de sustentação dos painéis fotovoltaicos**

O suporte do painel fotovoltaico deve proporcionar além de uma fixação estável e segura, uma ventilação adequada visto que a eficiência das células diminui com a elevação da temperatura e no extremo dessas os painéis podem falhar. Os suportes podem assumir diversos tipos de estruturas (Figura 4.2) sendo que, cada qual possui vantagens e desvantagens conforme apresentado a seguir:

a) Estrutura para telhado.

- Vantagens: Possui difícil acesso, baixa probabilidade de ser atingido por sombreamento.

- Desvantagens: Necessidade de ser fixado adequadamente para suportar a ação do vento, dificuldade na manutenção, e depende da estrutura do telhado.

b) Estrutura para parede.

- Vantagens: A estrutura é leve, possui difícil acesso, e sofre pequena ação do vento; Adequado para suportar painéis de tamanho reduzido (até 1m<sup>2</sup>).

- Desvantagens: Depende da robustez da parede em que será fixado.

c) Estrutura poste ou mastro.

- Vantagens: Adequado para suportar painéis de tamanho reduzido (até 1m<sup>2</sup>); Montagem fácil e simples.

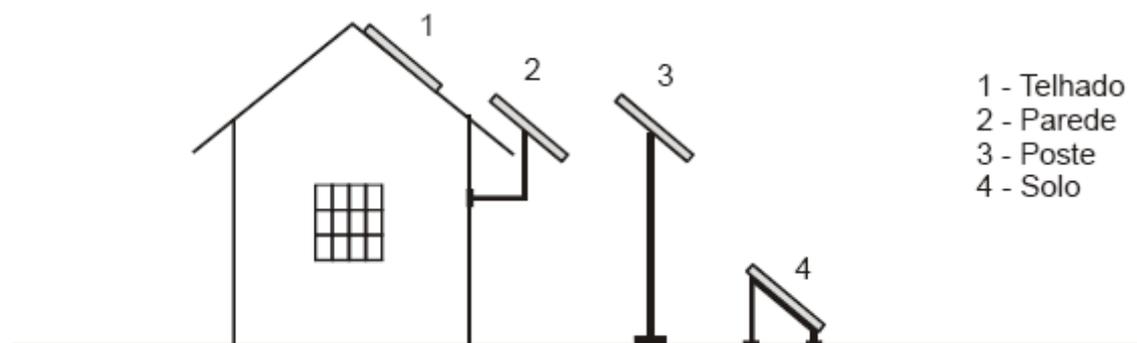
- Desvantagens: Menor resistência mecânica e maior exposição ao vento, e possui cabos de interligações longos.

d) Estrutura para solo.

- Vantagens: Utilizado quando o número de painéis a ser instalado é muito grande e a estrutura é robusta e sofre influência mínima dos ventos. Possui facilidades na montagem e manutenção.

- Desvantagens: Montagens acessíveis, o que aumenta a possibilidade de danos, e maior probabilidade de ser atingido por sombreamento, cabos de interligações longos.

A escolha do tipo de estrutura a ser utilizada, será determinada de acordo com a necessidade do projeto e recursos disponíveis nos locais de instalação.



**Figura 4.2 – Tipos de estruturas para painéis solares**

#### **4.3.5. Montagem do banco de baterias**

As baterias devem receber atenção especial uma vez que se tornam perigosas quando são manuseadas, instaladas e operadas inadequadamente. Assim sendo, é importantíssimo que se esteja familiarizado com medidas de segurança e as particularidades de cada projeto e, como referência, pode-se consultar a Norma ANSI/IEEE std 937/1987 - Práticas recomendadas para instalação de baterias do tipo chumbo ácida em sistemas fotovoltaicos.

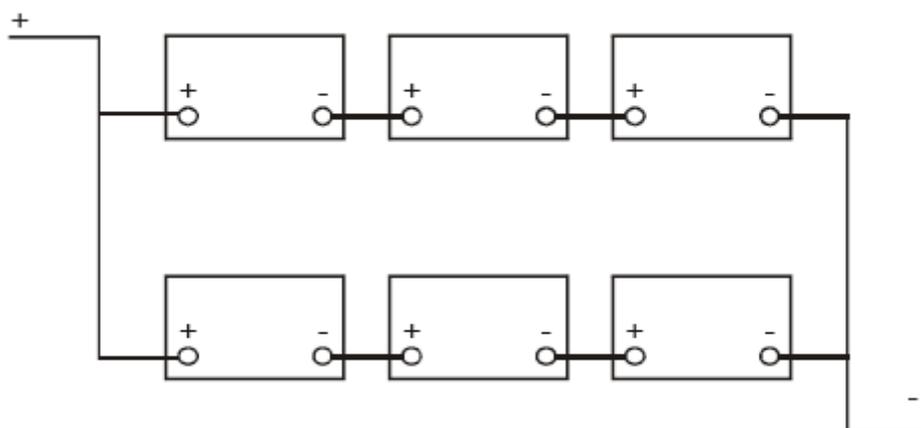
A instalação das baterias deve ser executada de acordo com as instruções contidas no manual do fabricante atendendo também os códigos e regulamentação local. As baterias devem ser condicionadas em local adequado, ou seja, em uma caixa ou sala de fácil acesso (somente para pessoas autorizadas), seguro para manutenção, protegidos de variações extremas de temperatura (recomenda-se que a temperatura local esteja entre 20 e 25°C) e com ventilação adequada. Caso este cuidado não seja tomado, existe sério risco de explosão devido aos gases emanados pela bateria durante sua recarga.

A caixa para o acondicionamento das baterias deve ser construída preferencialmente em material não condutivo, resistente ao ácido, e resistente mecanicamente a impactos.

A montagem das baterias não deve ser feita diretamente sobre o piso de concreto, pois, isto minimiza os efeitos da auto-descarga ocasionada pela umidade do mesmo. Logo, a isolamento entre a bateria e o piso, deve ser feita. Outras considerações na montagem das baterias: estarem totalmente carregadas, serem instaladas próximas dos painéis solares (minimizar perdas), interligações entre baterias com cabos de mesmo comprimento e fiação cruzada (Figura 4.3), atenção com as polaridades para não invertê-las ou curto-circuitá-la, proteger os pólos evitando a sua oxidação e etc.

Alguns cuidados devem ser tomados, como não deixar que o líquido da bateria entre em contato com qualquer parte do corpo, pois é corrosivo e pode causar ferimentos; manter as

baterias e os pólos sempre limpos, retirando sempre as oxidações (zinabre) que venham a se formar nos pólos das baterias; evitar o manuseio com utilização de materiais metálicos evitando riscos de fechar contato entre seus pólos; nunca usar as baterias do sistema de energia solar para carregar outras baterias e nunca deixá-las à umidade.



*Figura 4.3 – Interligações entre baterias (garante a equalização)*

#### **4.3.6. Montagem e posicionamento do painel de controle e proteções**

Os controladores de carga, conversores CC-CC, inversores e proteções, normalmente são instalados em um painel (ou caixa) de controle. O painel deve ser instalado em local seco e arejado, próximo das baterias (porém, isolado destas) e painéis fotovoltaicos, sendo que seu acesso interno deve ser limitado somente às pessoas autorizadas.

Em local cujo ambiente é altamente corrosivo, deve ser previsto o uso de materiais especiais e grau de proteção para o invólucro elevado. As proteções (fusíveis, disjuntores, seccionadoras), o aterramento, os cabos e as conexões devem ser conforme normas e códigos locais aplicáveis.

## *CAPÍTULO V*

### **ESTUDO DE CASOS E APLICAÇÃO DA METODOLOGIA**

#### **5.1. Introdução**

Os programas que realizam os cálculos foram escritos em uma linguagem simples e funcional, o Matlab. Sendo os programas desenvolvidos para melhor compreensão, visualização de alguns dados e para determinar dados que serão usados diretamente no dimensionamento de um sistema fotovoltaico como o programa que calcula a distância entre o Sol e a Terra (Anexo 1), o programa que calcula como varia a constante solar em relação a distância entre o Sol e a Terra (Anexo 2), o programa que faz o cálculo da declinação para todos os dias do ano (Anexo 3), o programa que calcula o índice de irradiação no topo da atmosfera, IRRADIA, (Anexo 6), o programa que calcula a irradiação no topo da atmosfera para todas as latitudes em um determinado dia J, IRRALAT, e na volta do dia para uma latitude em específico, IRRAHORA (Anexo 6), o programa DIMEFOTO faz o dimensionamento de um sistema fotovoltaico, está detalhado no item 5.2 e no item 5.4 tem-se a análise da influência do índice de irradiação e da temperatura no rendimento dos módulos, programa POTPLACA.

## 5.2. Projeto residencial

O método utilizado pelo programa está baseado no critério do pior mês de incidência de irradiação solar, o que acarretará na menor produção energética no período. A capacidade de acumulação é calculada de modo a assegurar um certo número de dias de fornecimento energético sem geração, isso no intuito de garantir que o sistema seja capaz de abastecer a carga instalada mesmo nos períodos em que a incidência de irradiação seja baixa.

Para aumentar a precisão e para que a coleta da irradiação seja a maior possível, o ângulo de inclinação do painel deve ser ajustado com o ângulo de latitude local, acrescido de 15° nos meses de inverno e diminuídos também de 15° nos meses de verão, mantendo-se a inclinação no valor da latitude para os meses de primavera e outono.

O programa foi feito baseado no projeto residencial, sendo que o mesmo pode ser usado para dimensionamento de qualquer tipo de configuração, bastando digitar 0 (zero nos campos em que não há necessidade de cálculo).

È necessário que se tenha um certo conhecimento do mercado dos componentes utilizados no projeto do sistema. Preferencialmente deve-se obter catálogos de fabricantes para ajudar na escolha dos equipamentos e conseqüentemente obter um bom dimensionamento.

### a) Calculo das cargas

Inicialmente é necessário saber quais as cargas que o sistema vai atender, e para facilitar deve-se preencher o quadro de cargas abaixo (Tabela 5.1), onde se descreve o tipo de carga que se terá na residência. Por exemplo, para a carga CC-12V temos 3 lâmpadas de 9W cada funcionando por um período de 3 horas, e para carga CA-110V uma TV de 60W funcionando também por 3 horas.

**Tabela 5.1 - Quadro de cargas solicitadas**

<b>Cargas CC</b>					
Descrição da carga CC	Potencia da carga CC (W)	Tempo de uso (h/dia)	Cons1 (Wh/dia)	Corrente (A)	ICC (Ah/dia)
C1-					
C2-					
C3-					
C4-					
C5-					
Total					
<b>Cargas CA</b>					
Descrição da carga CA	Potencia da carga CA (W)	Tempo de uso (h/dia)	Cons2 (Wh/dia)	Corrente (A)	ICA (Ah/dia)
C1-					
C2-					
C3-					
C4-					
C5-					
Total					

Dados pedidos pelo programa:

- Entre com o valor da potência das cargas em Corrente Contínua em W.
- Entre com o valor da quantidade de cargas para esse tipo de carga.
- Entre como valor do tempo de uso, é o tempo diário que a carga será usada, entrar com as frações de horas na forma decimal, isto é, 2horas e 45 minutos deve ser escrito da forma 2,75h, sendo que no caso de não ter mais carga basta entrar com o número 0 (zero) tanto para CC quanto CA.

- Entrar com o valor da tensão da carga em CC ou tensão nominal do sistema (V). Seus valores usuais são 12, 24, 48 e 120 Volts.
- Entre com o valor da Potência das cargas em Corrente Alternada em W, e com o tempo de uso.
- Entrar com o valor da tensão da carga em CA.
- Entre com a eficiência de conversão CC-CA, este fator está relacionado com a perda de energia, que ocorre nos sistemas que utilizam componentes condicionadores de potência (inversores ou conversores), no geral a eficiência do inversor está na ordem de 90%.
- Entre com o número de horas de máxima radiação solar, nada mais é que o sol pleno (h/dia) que é a média do número de horas diárias em que a insolação é de  $1000\text{W/m}^2$  e gira em torno de 9 da manhã às 15 da tarde, por isso no Brasil a media está entre 5 e 6 horas, para um bom dimensionamento é necessário que se tenha valor exato.
- Entre com o número de dias de independência, é o número de dias consecutivos que o sistema de armazenamento, baterias, terá que atender a solicitação da carga em caso de não geração de energia pelos módulos.
- Entre com a amplitude de descarga máxima, é o valor da profundidade máxima a qual a bateria pode ser solicitada, é dependente do seu tamanho e tipo, recomenda-se consultar os fabricantes para um valor preciso para o tipo a ser usado, caso não seja possível use o valor padrão de 0,6.
- Entre com a tensão nominal da bateria (V), é um dado do fabricante.
- Entre com a corrente nominal da bateria selecionada (A), é dado pelo fabricante.
- Entre com a capacidade da bateria em Ah, dado pelo fabricante.
- Entre com a tensão nominal do módulo (V), dado pelo fabricante.

- Entre com a corrente nominal do módulo (A), dado pelo fabricante.
- Entre com o valor da corrente de curto do módulo (A), dado pelo fabricante.

De acordo com os dados fornecidos o programa fará os cálculos e nos darão os seguintes resultados:

- Consumo das cargas em nível CC [Wh].
- Consumo das cargas em nível CC [Wh].
- Consumo total das cargas [Wh].
- Potencia a ser instalada [W].
- Corrente da carga CC [Ah].
- Corrente da carga CA [Ah].
- Corrente total das cargas [Ah].
- Corrente instalada [A].
- Capacidade da bateria a ser instalada [Wh].
- Capacidade da bateria a ser instalada [Ah].
- Quantidade de baterias em série.
- Quantidade de baterias em paralelo.
- Quantidade total de baterias.
- Numero de módulos em série.
- Numero de módulos em paralelo.
- Número total de módulos.
- Corrente do controlador [A].

A partir desses dados escolhe-se de acordo com o catálogo do fabricante o melhor inversor e/ou conversor assim como, a parte elétrica, e para a instalação e manutenção do sistema (consulte o Capítulo 4).

### 5.3. Cálculo da radiação solar extraterrestre

O programa IRRADIA tem como objetivo final o cálculo do valor da irradiação no plano horizontal incidente ao longo do dia, no dia J, no topo da atmosfera, para uma latitude específica (Anexo 6). O dado que deve ser fornecido para os cálculos em graus é a latitude.

Através desse dado pode-se calcular os seguintes valores:

- O valor da declinação, que depende do dia do ano (J).
- Ângulo Horário em graus.
- Número de horas de sol por dia [h]
- O horário que o sol nasce[h]

### 5.4. Influência do índice de irradiação e da temperatura no rendimento dos módulos

Foi feita uma análise da influência do índice de irradiação e da temperatura no rendimento dos módulos. Para isso é preciso saber alguns dados de placa para que seja informado ao programa, tais como:

a- Variando a temperatura

- Corrente de curto do módulo [A].
- A tensão em circuito aberto [V].
- A variação da corrente de curto com o aumento da temperatura, caso não seja possível use valor médio de  $-1,4 \text{ mA}/^{\circ}\text{C}$ .
- A variação da tensão em circuito aberto com o aumento da temperatura, caso não seja possível use valor de  $-161\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ .
- O índice de irradiação no qual quer calcular [W].

b- Variando o índice de irradiação:

- A temperatura na qual quer fazer o cálculo para a variação da irradiação [K].

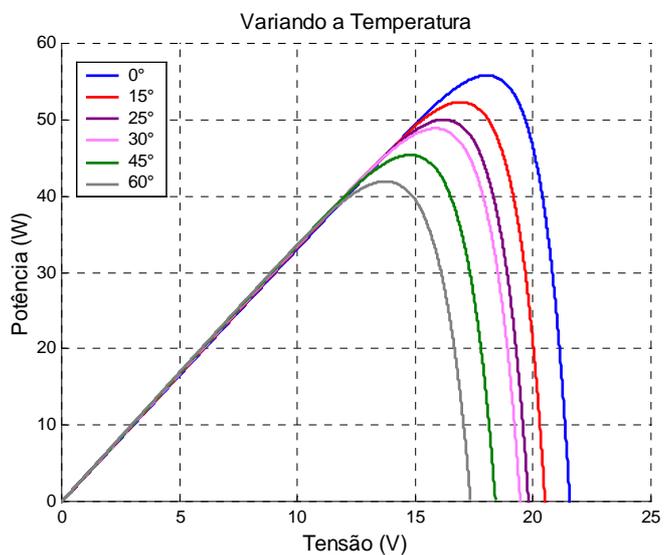
- Para qual índice ou variação do índice de irradiação deve ser feito o cálculo.

Como solução o programa traçará os gráficos com essas variações, de onde podem ser extraídas as informações necessárias para análise, tais como corrente, tensão e potência para uma determinada temperatura e um índice de irradiação especificado.

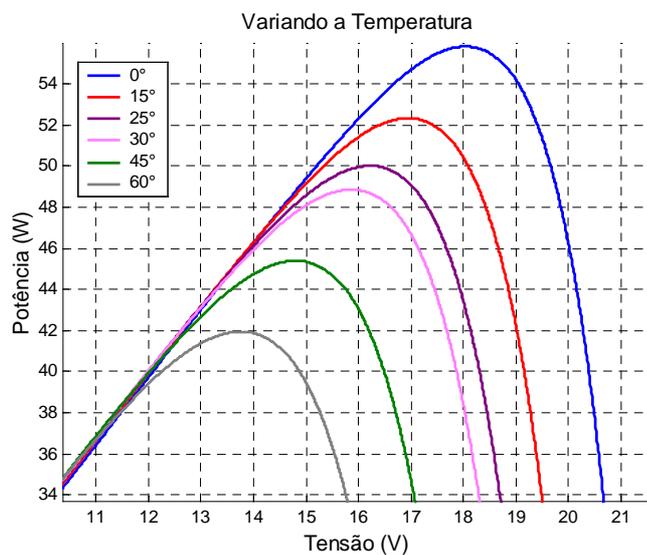
Para exemplificar foi feita uma análise qualitativa da influência da temperatura e do índice de irradiação na produção de energia foi utilizado dados da placa SM50-H da Shell Solar.

#### a) Análise para a Temperatura

Mantendo constante o Índice de Irradiação em  $1000\text{W/m}^2$  e variando a temperatura para os seguintes valores:  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ\text{C}$  foram obtidos os gráficos abaixo, dos quais pode-se verificar que a temperatura influencia sim no desempenho da placa, porém com um valor muito pequeno, pois a tensão da bateria é limitadora. Da Figura 5.1 pode se verificar que para um determinado valor de potência um aumento na temperatura acarreta uma diminuição da tensão e um aumento da corrente, que pode ser observado na Figura 5.2, sendo que esse aumento é proporcionalmente menor, acarretando numa diminuição da potência da placa. Para a tensão de 12V a diferença da potência a uma temperatura de  $0^\circ$  para  $60^\circ$  é de apenas 1,366%, já para a potência de pico temos uma diferença de 33,05%. Na Tabela 5.2 mostra alguns dados da oscilação dos parâmetros de uma placa fotovoltaica com variação da temperatura, cujos valores poderão ser utilizados para o dimensionamento do sistema fotovoltaico.

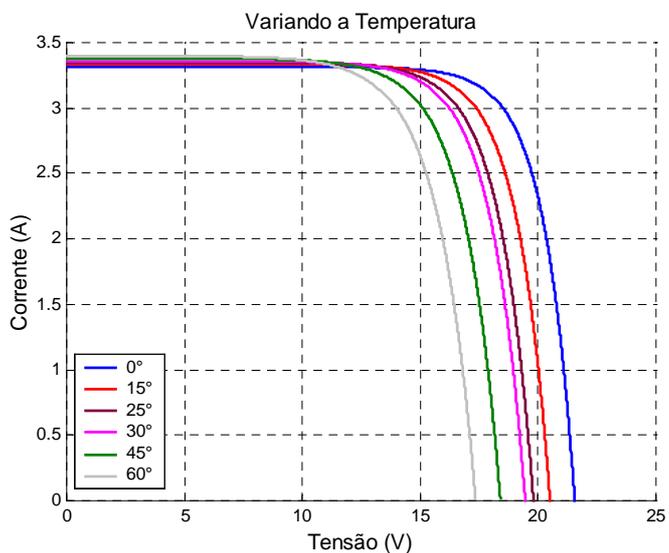


(a)

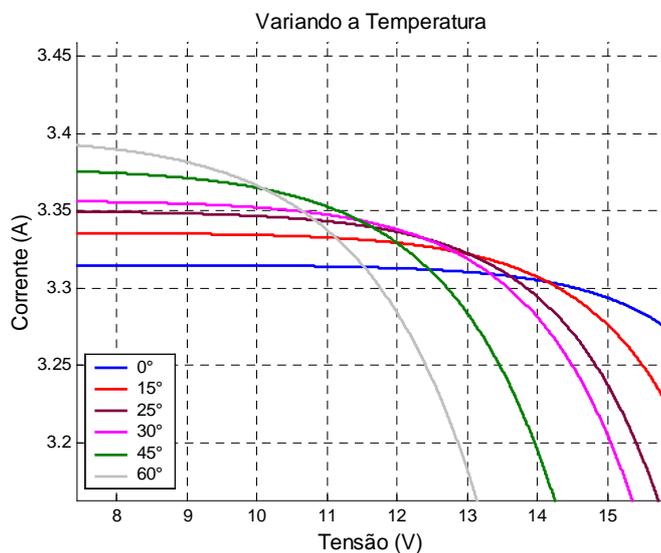


(b)

Figura 5.1 – (a) Variação da potência do módulo com a variação da temperatura, (b) zoom de (a)



(a)



(b)

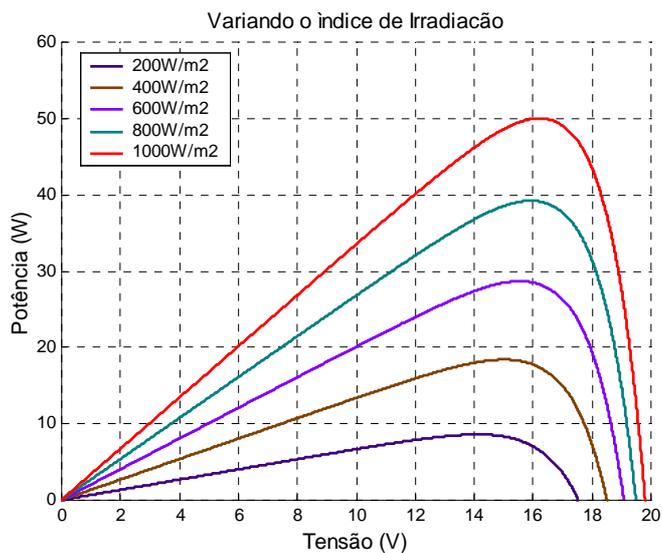
Figura 5.2 – (a) Variação da corrente e da tensão do módulo com a variação da temperatura, (b) zoom de (a)

**Tabela 5.2 - Oscilação dos parâmetros das placas fotovoltaicas com a variação da temperatura**

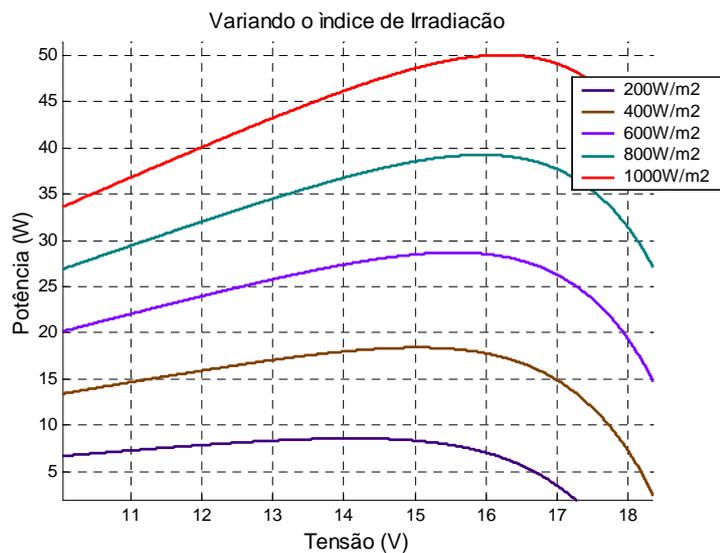
Temperatura	V = Vbat = 12 [V]					
	Potência [W]	Corrente [A]	Ics [A]	Voc [V]	Vpico [V]	Ppico [W]
0°	39,4065	3,3129	3,315	21,55	18,05	55,8190
15°	39,7549	3,3294	3,336	20,50	16,95	52,3332
25°	40,038	3,3365	3,350	19,80	16,22	50,0100
30°	40,0574	3,3381	3,357	19,45	15,87	48,8561
45°	39,9523	3,3293	3,378	18,40	14,81	45,3920
60°	39,9522	3,2839	3,399	17,35	13,76	41,9461

b) Análise para Índice de Irradiação

Mantendo constante a temperatura em 25° C e variando o índice de irradiação para os valores 200W/m<sup>2</sup>, 400W/m<sup>2</sup>, 600W/m<sup>2</sup>, 800W/m<sup>2</sup>, 1000W/m<sup>2</sup> foram obtidos os gráficos abaixo, dos quais podemos verificar que a tensão aumentou logarithmicamente (Figura 5.4) e a corrente linearmente (Figura 5.5), o que acarreta num aumento significativo da potência. O índice de irradiação de 200W/m<sup>2</sup> para tensão de 12V equivale a 19,676% da potencia com Índice de 1000W/m<sup>2</sup>, ou seja uma diferença de 80,324%. E em relação a potencia de pico a diferença é de 82,787%. Na Tabela 5.3 mostra alguns dados da oscilação dos parâmetros de uma placa fotovoltaica com variação do índice de irradiação, cujos valores poderão ser utilizados para o dimensionamento do sistema fotovoltaico.

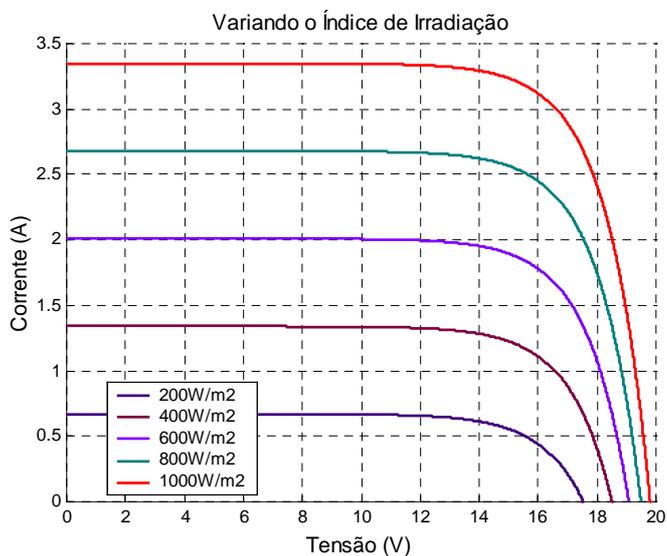


(a)

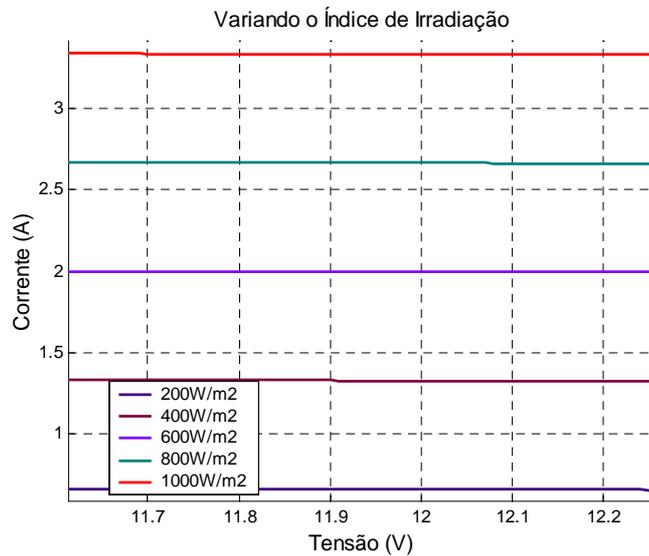


(b)

**Figura 5.3 – (a) Variação da potência do módulo com a variação do índice de irradiação, (b) zoom de (a)**



(a)



(b)

**Figura 5.4 – (a) Variação da corrente e da tensão do módulo com a variação do índice de Irradiação, (b) zoom de (a)**

**Tabela 5.3 – Oscilação dos parâmetros da placa fotovoltaica com a variação do índice de irradiação**

Irradiação (W/m <sup>2</sup> )	V = Vbat = 12					
	Potência [W]	Corrente[A]	Ics [A]	Voc [V]	Vpico [V]	Ppico [W]
200	7,878	0,6565	0,67	17,53	14,13	8,6078
400	15,9181	1,3265	1,34	18,50	15,03	18,4131
600	23,9581	1,9965	2,01	19,07	15,56	28,6748
800	31,9981	2,6665	2,68	19,48	15,94	39,2336
1000	40,0381	3,3365	3,35	19,80	16,22	50,0100

## 5.5. Exemplo de Dimensionamento

Para o dimensionamento é necessário verificar quais são as cargas a serem atendidas. Ter em mãos alguns catálogos de fabricantes para obtenção de dados adequados e precisos, alguns estão no Anexo 5. Dos quais foram tiradas as informações de fabricantes e fornecidas ao programa “DIMEFOTO”.

### 5.5.1. Exemplo1

Para o exemplo 1 usou-se as cargas descritas na Tabela 5.4, a bateria para calculo inicial é a Delphi modelo DF100 12V/100Ah e o modulo solar escolhido é da , modelo Shell SQ160-C e modelo Shell SQ140-C dos quais verificar-se-á qual a melhor placa levando-se em consideração a potencia que ela fornece e o preço da mesma.

Tendo em mãos os catálogos dos fabricantes contidos no Anexo5 verifica-se ainda o melhor inversor e o melhor controlador, assim como pode escolher outra bateria ou outro painel, de modo a verificar realmente qual o melhor equipamento que deverá ser utilizado, levando sempre em consideração a relação custo-benefício.

**Tabela 5.4 - Exemplo1 de cargas solicitadas**

<b><u>CARGAS CC</u></b>					
Descrição da carga CC	Potencia da carga CC (W)	Tempo de uso (h/dia)	Cons1 (Wh/dia)	Corrente (A)	ICC (Ah/dia)
C1- 3 lâmpadas de 12V	9	3			
C2- 2 lâmpadas de 12V	11	2			
Total					
<b><u>CARGAS CA</u></b>					
Descrição da carga CA	Potencia da carga CA (W)	Tempo de uso (h/dia)	Cons2 (Wh/dia)	Corrente (A)	ICA (Ah/dia)
C1- 1 TV (110V)	60	3			
C2- 1 Som 110V	30	4			
C3- 1 liquidificador 110V	200	0.1			
Total					

Teremos o seguinte no programa:

a) Para a placa Shell SQ160-C

Entre com o valor das cargas em Corrente Contínua (W), a quantidade dessa carga e a quantidade de hora de funcionamento diário (h)

CargaCC1= 9  
 Q1= 3  
 HCC1= 3

CargaCC2= 11  
 Q2= 2  
 HCC2= 1

CargaCC3= 0  
 Q3= 0  
 HCC3= 0

CargaCC4= 0

Q4= 0

HCC4= 0

CargaCC5= 0

Q5= 0

HCC5= 0

Entre com o valor da tensão em que o sistema vai operar - tensão de operação da carga (V)

VS= 12

Entre com o valor das cargas em Corrente Alternada (W) e a quantidade de hora de funcionamento diário (h)

CargaCA1= 60

Q6= 1

HCA1= 3

CargaCA2= 30

Q7= 1

HCA2= 4

CargaCA3= 200

Q8= 1

HCA3= 0.1

CargaCA4= 0

Q9= 0

HCA4= 0

CargaCA5= 0

Q10= 0

HCA5= 0

Entre com o valor tensão das cargas nível CA (V)

VCA= 110

Entre com a eficiência do inversor CC-CA, em média varia de 0.8 a 0.9

Eficiência do Inversor= 0.9

Entre com o número de horas de máxima radiação solar

h= 5

- Para o cálculo do Banco de Baterias

Entre com o número de dias de independência - sem sol

$$D= 5$$

Entre com a amplitude de descarga da bateria

$$\text{AmpDesc}= 0.6$$

Entre com a tensão nominal da bateria selecionada V

$$\text{VnBatS}= 12$$

Entre com a capacidade de carga da bateria selecionada Ah

$$\text{CBS}= 100$$

Entre com valor da eficiência da fiação, dado padrão de 0.98

$$\text{EfF}= 0.98$$

Entre com valor da eficiência da bateria, dado padrão de 0.95

$$\text{EfB}= 0.95$$

- Para o cálculo do módulo

Entre com a tensão nominal do módulo selecionado V

$$\text{VnMS}= 35$$

Entre com a corrente nominal do módulo selecionado A

$$\text{InMS}= 4.58$$

$$\text{VocMS}= 43.5$$

Entre com a corrente de curto do módulo selecionado A

$$\text{IscMS}= 4.9$$

- Cálculo do consumo de cargas CC Wh

$$\text{ConsCC} = 81$$

- Calculo do consumo de cargas CA Wh

$$\text{ConsCA} = 3.5555555555555555e+002$$

- Cálculo do consumo total de cargas Wh

$$\text{ConsTotal} = 5.238666666666667e+002$$

- Potencia a ser instalada em W  
 $P_{inst} = 1.0477333333333333e+002$

- Cálculo da corrente CC em Ah

$$I_1 = 8.100000000000000$$

- Cálculo da corrente CA em Ah

$$I_2 = 3.887878787878788$$

- Cálculo da corrente Total em Ah

$$I_{total} = 11.97878787878788$$

- Cálculo da corrente de projeto em A

$$I_{proj} = 2.57331640790287$$

- Banco de Baterias em W

$$Bat = 4.850617283950617e+003$$

- Banco de Baterias em Ah

$$BatAh = 4.042181069958847e+002$$

- Numero de baterias em paralelo

$$BatPar = 4.04218106995885$$

- Número de baterias em série

Considera o valor valores inteiros e se necessário aproximados.

$$BatSer = 1$$

- Numero total de baterias em paralelo

Considera o valor valores inteiros e se necessário aproximados.

$$NBat = 4.04218106995885 = 4$$

- Módulos em paralelo

Considera o valor valores inteiros e se necessário aproximados.

$$NMPar = 2.61545586873098 = 3$$

- Módulos em série

Considera o valor valores inteiros e se necessário aproximados.

$$NMSer = 0.34285714285714 = 1$$

$$NM = 3$$

- Corrente do conversor

$$Iconv = 16.878787878788$$

b) Para a placa Shell SQ140-C obtivemos uma diferença no cálculo do número de módulos e da corrente do conversor.

- Módulos em paralelo

$$NMPar = 2.81853832442068$$

- Módulos em série

$$NMSer = 0.36363636363636$$

- Corrente do conversor

$$Iconv = 16.678787878788$$

Fazendo análise para duas placas, uma de 140W e a outra de 160W obtivemos valores próximos. Que, porém nos dá a disposição de usar uma placa de menor potência, conseqüentemente de menor valor, que é a de 140W. Portanto o sistema será composto dos seguintes equipamentos:

- Controlador da Steca GmbH modelo SR 20A - 12V/24V.
- Módulo modelo Shell SQ140-C.
- Bateria Delphi modelo DF100 12V/100Ah.

- Inversor da Stapower, modelo Portawattz 600 W - PWZ 600, 12 Vcc/110 Vca

### 5.5.2. Exemplo 2

No exemplo 2 é feito uma comparação utilizando todas as cargas em CC (Tabela 5.5) e todas em CA (Tabela 5.6) para que se possa fazer uma análise financeira de qual seria mais adequada instalação do sistema fotovoltaico.

Através do programa PLOTPLACA é feito uma simulação para vários índices de irradiação, cujos resultados podem ser vistos na Tabela 5.7 e Tabela 5.14, e esses dados serão usados para dimensionamento do sistema através do programa DIMEFOTO, sendo que na Tabela 5.8 encontram-se os dados obtidos da simulação do sistema 1 e do sistema 2 está na Tabela 5.9. A partir desses dados faz-se a análise financeira, obtendo-se valores e especificações dos equipamentos com os fabricantes, essa análise financeira pode ser verificada na Tabela 5.10, que mostra dados gerais dos equipamentos escolhidos em primeira instância e os preços de cada equipamento, assim como o valor necessário para implantação desse sistema, na Tabela 5.11 analisa-se para o sistema 1, que financeiramente foi o mais viável, a diferença de preço que se teria se escolhesse outro tipo de bateria.

Verificando como também afeta financeiramente o índice de irradiação que incide em um sistema fotovoltaico na Tabela 5.12 tem-se resultado de simulação do sistema para uma placa SM50 com variação da irradiação em 3 valores e a bateria escolhida é DF3000, na Tabela 5.13 estão os resultados do dimensionamento considerando o índice de irradiação de  $1000\text{W/m}^2$  e na Tabela 5.14 encontra-se a diferença de valores para cada um dos 3 índices de irradiação.

**Tabela 5.5 - Cargas CC - Sistema 1**

	CC		
	Potência	Quantidade	Horas de Funcionamento
Liquidificador	300	1	0.1
Lâmpada	9	5	3
Ventilador	28	1	6
TV	48	1	4
Refrigerador	36	1	24

**Tabela 5.6 - Cargas CA - Sistema 2**

	CA		
	Potência	Quantidade	Horas de Funcionamento
Liquidificador	400	1	0.1
Lâmpada	9	5	3
Ventilador	80	1	6
TV	37	1	4
Refrigerador	28.05	1	24

**Tabela 5.7 - Dados de Placa SM50 obtidos do programa POTPLACA com variação do índice de irradiação**

Irradiação (W/m <sup>2</sup> )	Ics	Voc	Ipico	Vpico	Ppico
200	0,67	17,53	0,6091	14,13	8,6078
400	1,34	18,50	1,2250	15,03	18,4131
600	2,01	19,07	1,8428	15,56	28,6748
750	2,5125	19,39	2,3065	15,85	36,5595
800	2,68	19,48	2,4613	15,94	39,2336
850	2,8475	19,56	2,6159	16,016	41,8976
900	3,015	19,65	2,7710	16,09	44,5865
1000	3,35	19,80	3,0832	16,22	50,0100

**Tabela 5.8 - Resultados Simulação Sistema 1**

CC			
	CBS= 100	CBS= 115	CBS= 185
Consumo CC	1389	1389	1389
Consumo Total	1666,8	1666,8	1666,8
Pinst	333,36	333,36	333,36
ICC	138,90	138,90	138,90
Iproj	29,84	29,84	29,84
Bat	13890	13890	13890
BatAh	1157,50	1157,50	1157,50
BatPar	11,57	10,06	6,25
BatSer	1	1	1
NBat	12	10	6
NMPar	6,30	6,30	5,82
NMSer	0,71	0,71	0,71
NM	6	6	6

**Tabela 5.9 - Resultados Simulação Sistema 2**

CA			
	CBS= 100	CBS= 115	CBS= 185
Consumo CA	1640,22	1640,22	1640,22
Consumo Total	1968,26	1968,26	1968,26
Pinst	393,65	393,65	393,65
ICA	164,22	164,22	164,22
Iproj	35,2357	35,2357	35,2357
Bat	18224,69	18224,69	18224,69
BatAh	1518,73	1518,73	1518,73
BatPar	15,18	13,3029	8,269
BatSer	1	1	1
NBat	15	14	9
NMPar	7,45	7,45	7,45
NMSer	0,7100	0,7100	0,7100
NM	8	8	8

**Tabela 5.10 -Resultados Dimensionamento Sistemas 1 e 2**

Cargas CC					
	Característica	Quantidade	Valor (un)	Valor Total	
Baterias	Bateria DF 100: 12 V / 100 Ah - Automotiva, caixa branca. Delphi	12	320,00	3840,00	
Placas	Placas Kyocera – KC80 -Japones (80W)	6	1.580,00	9.480,00	
	Área ocupada		0,636m <sup>2</sup>	3,82m <sup>2</sup>	
	Peso		8Kg	48Kg	
Controlador	ProStar 30 – Morningstar , 30A	1	915,00	915,00	
Lampadas	9W compacta	5	16,00	80,00	
Refrigerador	120 litros - RE-120	1	2.429,00	2.429,00	
Liquidificador	02 Velocidades e pulso Copo 1,8 litros Garantia 12 mese	1	140,00	140,00	
TV	Tv 14”poleg. CCE 110V/12V/24V Colorida c/ controle Remoto	1	750,00	750,00	
Ventilador	de 8” polegadas 12V ou 24V	1	90,00	90,00	
14235,00 + 3489,00			Valor do Sistema		17.724,00
Cargas CA					
	Característica	Quantidade	Valor (un)	Valor Total	
Baterias	Bateria DF 100: 12 V / 100 Ah - Automotiva, caixa branca. Delphi	15	320,00	4800,00	
Placas	Placas Kyocera – KC80 -Japones (80W)	8	1580,00	12640,00	
	Área ocupada		0,636m <sup>2</sup>	5,10m <sup>2</sup>	
	Peso		8Kg	64Kg	
Inversor	Portawattz600 – Statpower, 600W	1	1132,00	1132,00	
Controlador	Tristar TS 45 – Morningstar, 45A		1490,00	1490,00	
Lampadas	9W compacta	5	10,00	50,00	
Refrigerador	Compacto 120 Litros Cônsul CRC12ABBNA	1	759,00	759,00	
Liquidificador	Liquidificador Black & Decker IB 890 2 velocidades + pulsar Copo plástico com capacidade para 1,5 litros Garantia de 01 ano	1	60,00	60,00	
TV	TV CCE 37 Watts Garantia de 3 anos	1	379,00	379,00	
Ventilador	Ventilador de mesa NV32 – Arno 80 Watts	1	60,00	60,00	
20062,00 + 1308			Valor do Sistema		21.370,00

**Tabela 5.11 - Resultados Comparando valores com baterias diferentes para o Sistema 1**

	Características	Nº	Valor (un)	Valor Total	Valor do Sistema
100Ah	Bateria DF 100: 12 V / 100 Ah - Automotiva, caixa branca. Delphi	12	320,00	3840,00	17.724,00
115Ah	Bateria DF 2000: 12 V / 115 Ah - Estacionária, caixa preta	10	450,00	4500,00	18.384,00
185Ah	Bateria DF 3000: 12 V / 185 Ah - Estacionária, caixa preta	6	610,00	3660,00	17.544,00

**Tabela 5.12 - Resultado de Simulação do Sistema 1 Placa SM50 com variação da Irradiação e Bateria DF3000**

	CC		
	1000W/m <sup>2</sup>	850W/m <sup>2</sup>	750 W/m <sup>2</sup>
Consumo CC	1389	1389	1389
Consumo Total	1666,8	1666,8	1666,8
Pinst	333,36	333,36	333,36
ICA	138,90	138,90	138,90
Iproj	29,84	29,84	29,84
Bat	13890	13890	13890
BatAh	1157,50	1157,50	1157,50
BatPar	6,25	6,25	6,25
BatSer	1	1	1
NBat	6	6	6
NMPar	9,68	11,04	12,93
NMSer	0,74	0,75	0,76
NM	10	11	13

**Tabela 5.13 - Dimensionamento para o Sistema 1 Placa SM50 com irradiação de  $1000W/m^2$**

Cargas CC				
	Característica	Quantidade	Valor (un)	Valor Total
Baterias	Bateria DF 3000: 12 V / 185 Ah - Delphi	6	610,00	3660,00
Placas	Placa SM50H – Shell Solar	10	1011,00	10110,00
	Área ocupada		0,43m <sup>2</sup>	4,26 m <sup>2</sup>
	Peso		5,5Kg	55Kg
Controlador	ProStar 30 – Morningstar , 30A	1	915,00	915,00
Lampadas	9W compacta	5	16,00	80,00
Refrigerador	120 litros - RE-120	1	2.429,00	2.429,00
Liquidificador	02 Velocidades e pulso Copo 1,8 litros Garantia 12 mese	1	140,00	140,00
TV	Tv 14”poleg. CCE 110V/12V/24V Colorida c/ controle Remoto	1	750,00	750,00
Ventilador	de 8” polegadas 12V ou 24V	1	90,00	90,00
14685,00 + 3489,00			Valor do Sistema (1000W/m <sup>2</sup> )	
				<b>18.174,00</b>

**Tabela 5.14 - Valor do Sistema utilizando Placa SM50 com variação da Irradiação**

	Nº de Paineis	Valor Painel (un)	Valor Painel	Valor Sistema
1000W/m <sup>2</sup>	10	1011,00	10110,00	18.174,00
850 W/m <sup>2</sup>	11	1011,00	11121,00	19.185,00
750W/m <sup>2</sup>	13	1011,00	13143,00	21.207,00

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSÕES E SUJESTÕES PARA PROJETOS FUTUROS**

#### **6.1. Conclusões**

Inúmeros são os benefícios sociais que a energia solar fotovoltaica traz às comunidades isoladas, destacando-se a iluminação, o lazer através do rádio e televisão, melhoria nas condições de saúde, principalmente conservando-se vacinas e medicamentos e na utilização de sistemas de radiocomunicação, aproximando assim o campo da cidade.

O Brasil tem uma posição geográfica privilegiada geograficamente, sendo ‘bombardeado’ por altos índices de radiação luminosa. Este cenário oferece um atrativo sob o ponto de vista técnico para a implantação de sistemas fotovoltaicos no atendimento às necessidades da maioria das comunidades isoladas que possuem níveis de carga semelhantes às analisadas neste trabalho e que estão localizadas a grandes distâncias da rede elétrica, sendo pois pouco atrativo às concessionárias.

Elaborados na linguagem Matlab, os programas são de fácil utilização por pessoas que não possuam amplo conhecimento técnico sobre a tecnologia fotovoltaica, tornando-o acessível a todos aqueles que necessitem de um dimensionamento rápido e funcional de sistemas fotovoltaicos. Os programas possuem detalhes de utilização e explicações sobre os

resultados obtidos. O único cuidado que o usuário deve ter é inserir corretamente os dados solicitados.

Os programas computacionais apresentam resultados confiáveis para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, dando a possibilidade de análise de vários modelos de equipamentos para que se possa obter o melhor projeto do ponto de vista econômico e confiável possível.

Os resultados nas simulações foram condizentes com a teoria, pois de acordo com os gráficos obtidos notou-se que, com a elevação do índice de insolação, ocorreu um aumento linear da corrente e logarítmico da tensão, os quais influenciaram proporcionalmente no aumento da potência máxima. Para a variação da temperatura, os resultados obtidos também foram satisfatórios, pois, ao contrário da insolação, à medida que se tem uma elevação da temperatura ambiente ocorre um decréscimo da potência máxima, devido a corrente permanecer praticamente constante e a tensão diminuir.

Desta forma, para que o dimensionamento de um sistema fotovoltaico seja mais preciso é necessário não somente avaliar o índice de radiação solar, mas também levar em consideração a temperatura do local, o que ainda não tem sido analisado na maioria dos projetos. Tendo o conhecimento da temperatura e do índice de irradiação é possível através do programa “POTPLACA” fazer uma análise e obter a corrente e a tensão nominal que deve ser utilizada para cálculo do número de placas.

O projetista deve ser criterioso na especificação dos equipamentos para garantir um projeto econômico e funcional. O desenvolvimento matemático e critérios de avaliação desenvolvidos irão auxiliar o projetista na verificação da viabilidade de se implantar em um determinado local um sistema fotovoltaico, baseando no índice de radiação e da temperatura local, cujos dados podem ser coletados por aparelhos de medição ou obtidos em mapas de

insolação, obtendo-se assim características do desempenho das placas, assim como efetuar cálculos para dimensionar os equipamentos à serem utilizados, baseado no tipo de configuração e da carga solicitada pelo consumidor.

## **6.2. Sugestões para trabalhos futuros**

- Utilizar dos Algoritmos Genéticos para otimização de sistemas fotovoltaicos;
- Determinação do circuito equivalente estático e dinâmico de células fotovoltaicas através das equações eletroquímicas dos materiais componentes;
- Resposta dinâmica de sistemas fotovoltaicos com inversor em regime de carga variável;
- Resposta transitória de sistemas fotovoltaicos equipados com inversor (onda quadrada, seis pulsos, doze pulsos, pwm e pwm senoidal).

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] AGUIAR, R. J., COLLARES, P. M., CONDE, J. P. *A Simple Procedure for the Generation of Sequences of Daily Radiation Values Using Markov Transition Matrices*, *Solar Energy*, 40, 3, pp 269 - 279, 1988.
- [2] AGUIAR, R. J., COLLARES, P. M., CONDE, J. P. *A Time-Dependent, Autoregressive, Gaussian Model for Generating Synthetic Hourly Radiation*, *Solar Energy*, 49, 3, pp 167 - 174, 1992.
- [3] AMATO, U., ANDRETTA, A., BARTOLI, B., COLLUZZI, B., CUOMO, V. *Markov Processes and Analysis as a Tool to Simulate Daily Solar Irradiance*, *Solar Energy*, 37, 3, pp 179 - 194, 1986.
- [4] ARAUJO, G. L., SANCHEZ, E. *Analytical Expressions for the Determination of the Maximum Power Point and the Fill Factor of a Solar Cell*, *Solar Cells*, 5, pp 377 - 386, 1982.
- [5] BARBOSA, E. M. S., FRAIDENRAICH, N., FRAGA, A. N. S., TIBA, C. *Photovoltaic Electrification - Social and Technical Diagnostic of Systems Installed in the Northeast of Brasil after one Operating year*, Proc. 13 th European C. Photovoltaic Solar Energy Conference, pp 1088 - 1091, Nice - France, Oct - 1995.
- [6] BARRA, L., CATALANOTTI, S., FONTANA, F., LAVORANTE, F. *An Analytical Method to Determine the Optimal Size of a Photovoltaic Plant*, *Solar Energy*, 33, 6, pp 509 - 514, 1984.
- [7] BAZZO, E., RUTHER, R., MARTINS, D.C. *Análise de Viabilidade Técnica e Econômica de um Sistema Isolado Híbrido Diesel/Fotovoltaico*. In: COBEM 99 – XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999, Águas de Lindóia, Anais do Cobem 99 – XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. 1999.
- [8] BOILY, R., SAWADOGO, A., ROSSI, L.A. *Desenho de sistemas fotovoltaicos para comunidades rurais*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 27, 1998. Poços de Caldas – MG, Anais... Poços de Caldas, 1998.

## Bibliografia

---

- [9] CAMARGO, J. C. *Medidas do potencial fotovoltaico na região das bacias dos rios Piracicaba e Capivari*, 108p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas, 2000.
- [10] CEMIG – *Eletricidade para o meio rural com energia solar, projeto uso racional de energia na agricultura*. Belo Horizonte, MG. < [www.cemig.com.br](http://www.cemig.com.br) > Acesso em 24 de janeiro de 2004.
- [11] CESP - *Projetos na Área de Energia Solar*. In: Workshop da Escola de Energia Fotovoltaica. 1992, Rio de Janeiro. Anais ... Rio de Janeiro, CEPEL, 1992.
- [12] CLARK, D. R., KLEIN, S. A., BECKMAN, W. A., *A Method for Estimating Performance of Photovoltaic Systems*, Solar Energy, **33**, 6, pp 551 - 555, 1984.
- [13] COCIAN, Luis F. E., SANTOS, João C. V. *Sistemas Fotovoltaicos: Uma alternativa para a geração de energia elétrica*, Revista Lumière, julho de 2000.
- [14] COMETTA, E. *Energia Solar: Utilização e Empregos Práticos*, Hemus livraria editora limitada.
- [15] COPETTI, J. B., LORENZO, E., CHENLO, F., *A General Battery Model for PV System simulation*, Progress in Photovoltaics, 1, 4, pp 283 - 292, 1993.
- [16] COSTA, H. S., COSTA, R.A.L. & ECK, M. *Análise econômica comparativa da eletrificação rural comercial e fotovoltaica* In: Encontro de Energia no Meio Rural, 3, 2000, Campinas. Anais ... Campinas, CD-Rom, 2000.
- [17] COSTA, H.S. & ECK, M. *Modelo sustentável de difusão da tecnologia fotovoltaica para uso residencial* In: Encontro de Energia no Meio Rural, 3, 2000, Campinas. Anais ... Campinas, CD-Rom, 2000.
- [18] CRESESB, *Programa SUNDATA*, traz informações sobre insolação, <[www.cresesb.cepel.br/sundatn.htm](http://www.cresesb.cepel.br/sundatn.htm)>. Acesso em 27 de janeiro de 2004.
- [19] CPTEC – INPE, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.< [www.cptec-inpe](http://www.cptec-inpe) >, acesso em 18 de Maio de 2004.
- [20] DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, New York - USA, John Wiley & Sons, 2nd ed., 1991.
- [21] DUNCAN, C. H., WILSON, R. C., KENDALL, J. M., HARRISON, R. G., HICKEY, J. R., *Latest Rocket Measurements of the Solar Constant*, Solar Energy, 28, pp 385, 1982.
- [22] EGIDO, M. A., LORENZO, E. *Optimal Number of Solar Cells in Photovoltaic Modules for Eletrobrás*, Plano Nacional de Energia Elétrica 1993 - 2015, 1994.
- [23] EGIDO, M. A., LORENZO, E. *The Sizing of Stand Alone PV-Systems: a Review and a Proposed New Method*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 26, pp 51 - 69, 1992.

## Bibliografia

---

- [24] ERGE T., HOFFMANN V. V., KIEFER K.; *The German Experience With Grid-Connected PV Systems - Solar Energy*, vol. 70, nº 6 pp 479-487, 2001.
- [25] FADIGAS, Eliane A. F.A. *Dimensionamento de fontes fotovoltaicas e eólicas com base no índice de perda de suprimento e sua aplicação para o atendimento a localidades isoladas*. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica -Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- [26] FAE / Universidade Federal de Pernambuco, parceria com o CEPEL, *Atlas solarimétrico do Brasil* - feito com base em medições terrestres, 1997.
- [27] FRAIDENRAICH, N., LYRA, F. *Energia Solar - Fundamentos e Tecnologia de Conversão Heliotermoelétrica e Fotovoltaica*. Recife - PE, Ed. Universitária da UFPE, 1995.
- [28] GREEN, M. A. et al, *Present Status of Buried Contact Solar Cells*, 22 th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, pp 511 - 514, 1991.
- [29] GREEN, M. A., *Solar Cells, Operating Principles, Technology and systems Applications*, Prentice- Hall Inc, 1992.
- [30] GROSSI, H. G. *A Importância da Solarimetria para Projetos Solares* Notas de Aula do III Curso de Energia, Solar Solarimetria e Estatística da Radiação Solar, Recife, Brasil, 6 - 10 de nov 1995.
- [31] GROUMPOS, P. P.,PAPAGEORGIOU, G., *An Optimal Sizing Method for Stand Alone Photovoltaic Power Systems*, Solar Energy, 38, 5, pp 341 - 351, 1987.
- [32] GTES Grupo de Trabalho de Energia Solar, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*, 1999.
- [33] ECKTEUR,L., 2001. *Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos*, Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre.
- [34] HELIODINÂMICA, Tecnologia solar Brasil, *Catálogo Técnico* <http://www.heliodinâmica.com.br>> Acesso em 12 de Dezembro de 2004.
- [35] IMAMURA, M. S. *A simplified Method for Determining the Available Power and Energy of a Photovoltaic Array*, Int. J. Solar Energy, 10, pp 205 - 210, 1991.
- [36] IQBAL, M., *Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, Toronto, 1983.
- [37] ISTOÉ - *GUIA DA SAÚDE FAMILIAR* - volume 12 - dezembro/2001.
- [38] JOHNSON, F. S., *The Solar Constant*, of *Meteorology*, 11, pp 431, 1954.

## Bibliografia

---

- [39] LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. *Desenvolvimento de Software para o dimensionamento de fontes alternativas geradoras de eletricidade*. <<http://www.Labsolar.ufsc.br>>. Acesso em 18 de Fevereiro de 2004
- [40] LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. *Desenvolvimento de Software para o dimensionamento de fontes alternativas geradoras de eletricidade*. <<http://www.labsolar.ufsc.br>> Acesso em 01 de março de 2003.
- [41] LABORATÓRIO DE ENGENHARIA MECÂNICA, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa SolarCad. <<ftp://ftp.mecanica.ufrgs.br/solar/>>/ Acesso em 05 de junho de 2003.
- [42] LABSOLAR, Co-autoria do INPE Patrocínio INMET, *Atlas de Irradiação Solar de Brasil*, (1995/98).
- [43] LEVA, Flávia F., e SALERNO, Carlos H., *Análise da influencia da Temperatura e do Índice de Radiação Solar no Desempenho dos Módulos Fotovoltaicos*, Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica – CEEL, 2003.
- [44] LEVA, Flávia F., SALERNO, Carlos H., GUIMARÃES JÚNIOR, Sebastião C., CAMACHO, José R. *Modelo de um projeto de um Sistema Fotovoltaico*. 5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída, Outubro, 2004, Campinas.
- [45] LEVA, Flávia F., SALERNO, Carlos H., GUIMARÃES JÚNIOR, Sebastião C., CAMACHO, José R. *Mathematical Modeling and Elements for the Design of a Photovoltaic System*. VI Induscon, Outubro, 2004, Joinville.
- [46] LIRA, F.J.M. *Simulação numérica de uma central fotovoltaica interligada com a rede elétrica*. 236p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1991.
- [47] LORENZO, E. *Electricidad Solar: Ingenieria de Los Sistemas Fotovoltaicos*, Espanha, Artes Gráficas Gala, S.L. 1994.
- [48] LUI, B. H. Y., JORDAN, R. C. *Daily Insolation on Surfaces Tilted Toward the Equator*, ASHRAE Journal, 3, 10, pp 53 - 59, 1962.
- [49] LUI, B. H. Y., JORDAN, R. C. *The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation*. Solar Energy, 4, 3, pp 1 - 18, 1960.
- [50] MACIEL, W. J., *Astronomia e Astrofísica*, IAG/USP, São Paulo, Brasil, 1991.
- [54] MARTINS, J. M. V. *Uma Análise da Confiabilidade de Sistemas de Conversão Fotovoltaica*, 5ª Conferência Regional da IUAPPA, São Paulo, Brasil, 28/fev a 4/mar, 1994.

## Bibliografia

---

- [52] NASA SP - 8055, National Aeronautics and Space Administration, *Solar Electromagnetic*.
- [53] OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., PLANA FATTORI, A., SOARES, J., SANTOS P. M. *Medidas de Radiação Solar na Cidade de São Paulo: Calibrações de Piranômetros e Aplicações Meteorológicas*, Revista Brasileira de Geofísica, **14**, 2, pp 203 - 216, 1996.
- [54] OLIVEIRA, S.H.F. *Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos: ênfase na eletrificação de residências de baixo consumo*, 240p, Dissertação (Mestrado em Energia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- [55] 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.
- [56] PALZ, W. *Energia solar e fontes alternativas*. São Paulo: Hemus - Livraria, 1981.
- [57] ROSSI, L.A. *Modelo avançado para planejamento de sistemas energéticos integrados usando recursos renováveis*. Tese de Doutorado, p. 180. Escola Politécnica – USP. São Paulo, 1995.
- [58] RÜTHER, R. *Sistema Solar Fotovoltaico Integrado à Arquitetura de Edificação Urbana e Interligado à Rede Elétrica Pública*, XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE). Foz do Iguaçu – Paraná, 17 à 22 de outubro de 1999.
- [59] SANTOS, R. R. *Examining the use os Solar Electric Pumping Systems for Small scale Electricity Generation*, CIGR IV - Energy and Agriculture, Paper 36, pp 25-28, Stutgard, Germany, 1995.
- [60] SANTOS, R. R.; Mercedes, S. S. P.; Sauer, I. L. *A reestruturação do setor elétrico brasileiro e a universalização do acesso ao serviço de energia elétrica*. Revista Brasileira de Energia, Vol. 7, nº 2, 2º sem./1999.
- [61] SHELL SOLAR,. *Photovoltaic Solar Module: Shell SM50-H*. <[www.shell.com/solar](http://www.shell.com/solar)> Acesso em 01 de Fevereiro de 2005.
- [62] SIEGEL, M. D., KLEIN, S. A., BECKMAN, W. A. *A Simplified Method for Estimating the Monthly-Average Performance of Photovoltaic Systems*, Solar Energy, 26, pp 413 - 418, 1981.
- [63] SILVA, C. D., *Avaliação do potencial eólico e solar para acionamento de pequenos sistemas de bombeamento na Fazenda Lageado*. 90 p. Dissertação (Mestrado em Energia). Faculdade de Ciências Agrônômicas-UNESP, Botucatu, 2000.
- [64] SOL & VENTO, Catálogos de fabricantes, <<http://www.energia-alternativa.com.br>> Acesso em 08 de Fevereiro de 2005.

## Bibliografia

---

- [65] ZILLES, R. Workshop *Geração Distribuída de Eletricidade com Energia Solar na USP e Proposta da Secretaria de Estado de Energia para Difusão e Disseminação da Energia Solar no Estado*, 6 de Dezembro de 2001 Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo - IEE/USP, São Paulo.
- [66] ZILLES, R., Oliveira, S. H. F. & Burani, G. F. *Distributed Power Generation with Photovoltaic Systems at USP*, IEEE/PES T&D 2002 Latin America Conference. 18 - 22 de Março de 2002 Centro de Convenções Anhembi, São Paulo.
- [67] ZILLES, R., OLIVEIRA, S. H. F. *O Preço do Wp e o custo do kWh Fornecido por Sistemas Interligados à Rede Elétrica*, VIII Congresso Brasileiro de Energia Elétrica Anais. Rio de Janeiro, SBPE/COPPE-UFRJ/Clube de Engenharia, 1999. p. v.2 743-748.

## **ANEXOS**

ANEXO I

**Programa para cálculo da distância entre o Sol e a Terra**

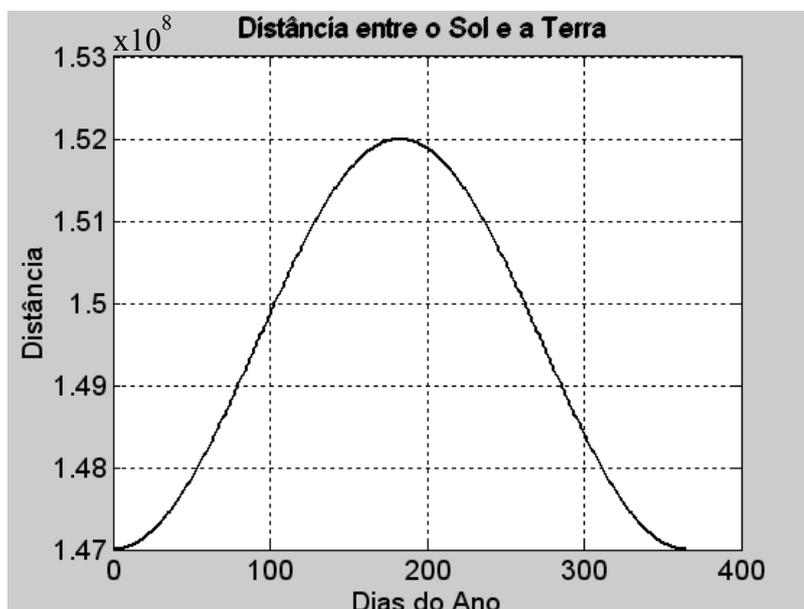
O cálculo da distância entre o Sol e a Terra foi feito usando-se o Matlab com os seguintes dados:

$$R=R_0*[1-(0.0167*\cos(360*J/365))][Km] \quad I.1$$

*J = dia Juliano: 1-365, onde 1 é primeiro de Janeiro e 365 é 31 de Dezembro.*

$R_0 = 1,495 \times 10^8$  [Km], é a distância média.

Obtemos o seguinte Resultado:



**Figura I.1 – Distância entre o Sol e a Terra**

- A distância menor se dá no final de Junho e início de Julho  $1,47 \times 10^8$  [Km].
- A distância maior se dá no final de Dezembro e início de Janeiro  $1,52 \times 10^8$  [Km].

**Variação da distância:**

$$V = 1,52 - 1,47 = 0,05$$

0,05 equivale a 3,3% referindo a maior distância e 3,4% da menor distância.

I.2

## ANEXO II

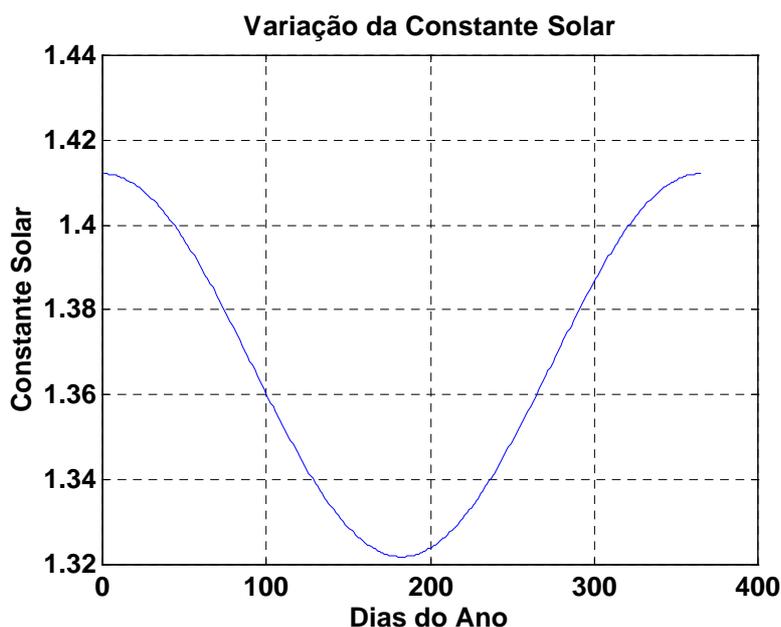
### Programa para cálculo da variação em função da distância entre o Sol e a Terra

Como a constante solar varia em relação a distancia entre o sol e a terra, provocado pelo movimento de translação, em função do dia do ano ( J ) e a essa variação se dá pela

expressão  $\left[ 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360 * J}{365}\right) \right]$ , pode der calculado esses valores. O programa foi feito

no Matlab usando a seguinte formula:

$$G_{SC}(j) = G_{SC} \left[ 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360 * J}{365}\right) \right] \quad \text{II.1}$$



**Figura II.1 - Variação da Constante Solar**

O maior valor da constante é de 1,412111 no dia 31 de Dezembro e o menor valor é de 1,32189 no dia 1 de Julho.

A média verificada pela expressão:

$$\text{Media} = \text{Soma}(G_{SC}(j)) / 365 = 4.989549999999998e+002 / 365 = 1,367 \quad \text{II.2}$$

### Anexo III

#### Programa para cálculo da declinação

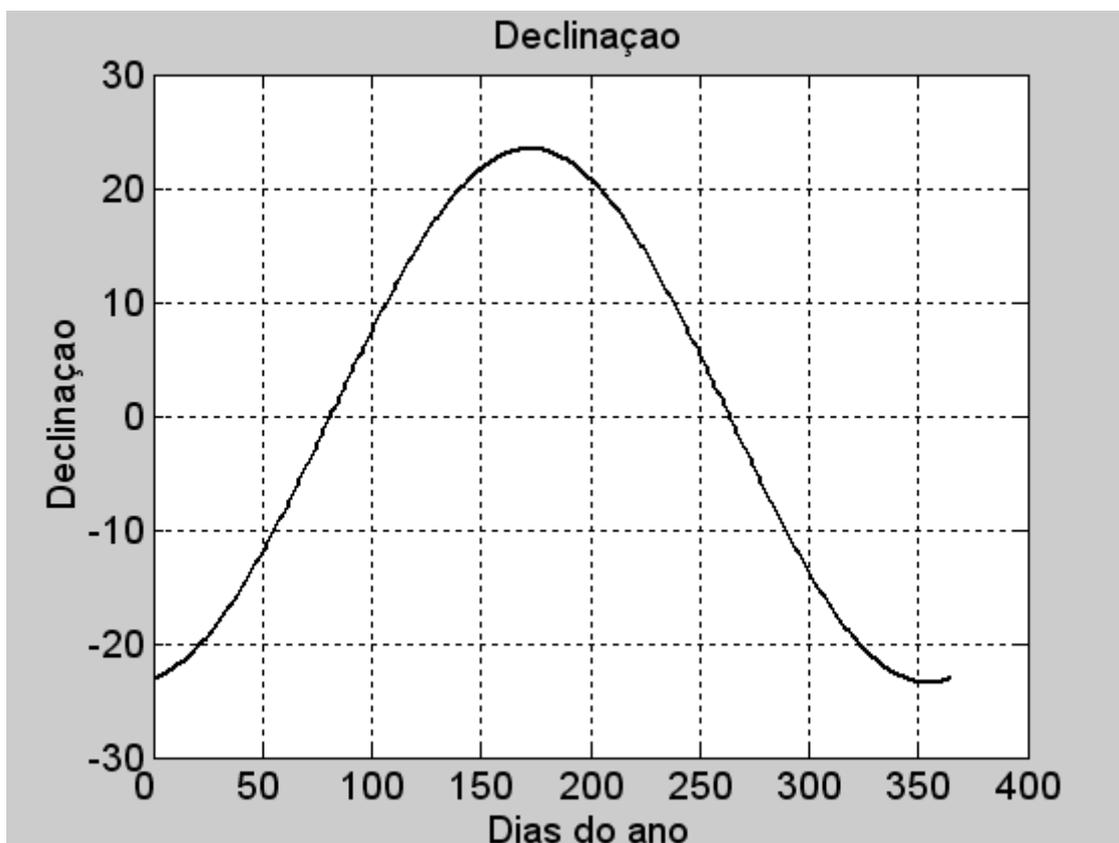
O calculo da declinação foi feito no Matlab com seguintes dados:

$$\delta(^{\circ}) = 23,45 \times \text{sen}[360 \times (284 + j) / 365]$$

III.1

onde ,

- $23,45 = 23^{\circ}27'$
- J é o dia juliano, sendo 1 o 1º de Janeiro e 365 o 31 de Dezembro



*Figura III.1 - Declinação*

Assim temos os seguintes resultados para o ângulo de inclinação para cada dia do ano:

**Tabela III.1 – Ângulo de declinação**

Janeiro		
n	Dia	Angulo
1	1	-23.0116
2	2	-22.9305
3	3	-22.8427
4	4	-22.7480
5	5	-22.6466
6	6	-22.5385
7	7	-22.4237
8	8	-22.3023
9	9	-22.1742
10	10	-22.0396
11	11	-21.8985
12	12	-21.7509
13	13	-21.5968
14	14	-21.4363
15	15	-21.2695
16	16	-21.0963
17	17	-20.9170
18	18	-20.7314
19	19	-20.5397
20	20	-20.3419
21	21	-20.1380
22	22	-19.9282
23	23	-19.7125
24	24	-19.4910
25	25	-19.2636
26	26	-19.0306
27	27	-18.7919
28	28	-18.5477
29	29	-18.2979
30	30	-18.0428
31	31	-17.7823

Fevereiro		
n	Dia	Angulo
32	1	-17.5165
33	2	-17.2455
34	3	-16.9695
35	4	-16.6883
36	5	-16.4023
37	6	-16.1114
38	7	-15.8157
39	8	-15.5153
40	9	-15.2104
41	10	-14.9009
42	11	-14.5870
43	12	-14.2688
44	13	-13.9463
45	14	-13.6198
46	15	-13.2892
47	16	-12.9546
48	17	-12.6162
49	18	-12.2741
50	19	-11.9283
51	20	-11.5790
52	21	-11.2263
53	22	-10.8703
54	23	-10.5110
55	24	-10.1486
56	25	-9.7832
57	26	-9.4149
58	27	-9.0438
59	28	-8.6700

Março		
n	Dia	Angulo
60	1	-8.2937
61	2	-7.9149
62	3	-7.5338
63	4	-7.1504
64	5	-6.7649
65	6	-6.3774
66	7	-5.9880
67	8	-5.5969
68	9	-5.2041
69	10	-4.8097
70	11	-4.4139
71	12	-4.0168
72	13	-3.6185
73	14	-3.2192
74	15	-2.8189
75	16	-2.4177
76	17	-2.0159
77	18	-1.6134
78	19	-1.2105
79	20	-0.8072
80	21	-0.4037
81	22	-0.0000
82	23	0.4037
83	24	0.8072
84	25	1,2105
85	26	1,6134
86	27	2,0159
87	28	2,4177
88	29	2,8189
89	30	3,2192
90	31	3,6185

Anexo III – Cálculo da declinação

---

Abril		
n	Dia	Angulo
91	1	4.0168
92	2	4.4139
93	3	4.8097
94	4	5.2041
95	5	5.5969
96	6	5.9880
97	7	6.3774
98	8	6.7649
99	9	7.1504
100	10	7.5338
101	11	7.9149
102	12	8.2937
103	13	8.6700
104	14	9.0438
105	15	9.4149
106	16	9.7832
107	17	10.1486
108	18	10.5110
109	19	10.8703
110	20	11.2263
111	21	11.5790
112	22	11.9283
113	23	12.2741
114	24	12.6162
115	25	12.9546
116	26	13.2892
117	27	13.6198
118	28	13.9463
119	29	14.2688
120	30	14.5870

Maio		
n	Dia	Angulo
121	1	14.9009
122	2	15.2104
123	3	15.5153
124	4	15.8157
125	5	16.1114
126	6	16.4023
127	7	16.6883
128	8	16.9695
129	9	17.2455
130	10	17.5165
131	11	17.7823
132	12	18.0428
133	13	18.2979
134	14	18.5477
135	15	18.7919
136	16	19.0306
137	17	19.2636
138	18	19.4910
139	19	19.7125
140	20	19.9282
141	21	20.1380
142	22	20.3419
143	23	20.5397
144	24	20.7314
145	25	20.9170
146	26	21.0963
147	27	21.2695
148	28	21.4363
149	29	21.5968
150	30	21.7509
151	31	21.8985

Junho		
n	Dia	Angulo
152	1	22.0396
153	2	22.1742
154	3	22.3023
155	4	22.4237
153	5	22.5385
157	6	22.6466
158	7	22.7480
159	8	22.8427
160	9	22.9305
161	10	23.0116
162	11	23.0859
163	12	23.1533
164	13	23.2139
165	14	23.2676
166	15	23.3144
167	16	23.3543
168	17	23.3873
169	18	23.4133
170	19	23.4324
171	20	23.4446
172	21	23.4498
173	22	23.4480
174	23	23.4394
175	24	23.4237
176	25	23.4012
177	26	23.3717
178	27	23.3352
179	28	23.2919
180	29	23.2416
181	30	23.1845

Anexo III – Cálculo da declinação

---

Julho		
n	Dia	Angulo
182	1	23.1205
183	2	23.0496
184	3	22.9719
185	4	22.8874
186	5	22.7962
187	6	22.6981
188	7	22.5934
189	8	22.4819
190	9	22.3638
191	10	22.2391
192	11	22.1077
193	12	21.9699
194	13	21.8255
195	14	21.6746
196	15	21.5173
197	16	21.3537
198	17	21.1837
199	18	21.0074
200	19	20.8249
201	20	20.6363
202	21	20.4415
203	22	20.2407
204	23	20.0339
205	24	19.8211
206	25	19.6025
207	26	19.3780
208	27	19.1478
209	28	18.9120
210	29	18.6705
211	30	18.4235
212	31	18.1710

Agosto		
n	Dia	Angulo
213	1	17.9132
214	2	17.6500
215	3	17.3817
216	4	17.1081
217	5	16.8295
218	6	16.5459
219	7	16.2574
220	8	15.9641
221	9	15.6661
222	10	15.3634
223	11	15.0562
224	12	14.7445
225	13	14.4284
226	14	14.1081
227	15	13.7836
228	16	13.4550
229	17	13.1224
230	18	12.7859
231	19	12.4456
232	20	12.1017
233	21	11.7541
234	22	11.4031
235	23	11.0487
236	24	10.6910
237	25	10.3302
238	26	9.9663
239	27	9.5994
240	28	9.2297
241	29	8.8573
242	30	8.4822
243	31	8.1046

Setembro		
n	Dia	Angulo
244	1	7.7246
245	2	7.3424
246	3	6.9579
247	4	6.5714
248	5	6.1830
249	6	5.7927
250	7	5.4007
251	8	5.0071
252	9	4.6120
253	10	4.2155
254	11	3.8178
255	12	3.4190
256	13	3.0191
257	14	2.6184
258	15	2.2169
259	16	1.8147
260	17	1.4120
261	18	1.0089
262	19	0.6054
263	20	0.2018
264	21	-0.2018
265	22	-0.6054
266	23	-1.0089
267	24	-1.4120
268	25	-1.8147
269	26	-2.2169
270	27	-2.6184
271	28	-3.0191
272	29	-3.4190
273	30	-3.8178

Anexo III – Cálculo da declinação

Outubro		
n	Dia	Angulo
274	1	-4.2155
275	2	-4.6120
276	3	-5.0071
277	4	-5.4007
278	5	-5.7927
279	6	-6.1830
280	7	-6.5714
281	8	-6.9579
282	9	-7.3424
283	10	-7.7246
284	11	-8.1046
285	12	-8.4822
286	13	-8.8573
287	14	-9.2297
288	15	-9.5994
289	16	-9.9663
290	17	-10.3302
291	18	-10.6910
292	19	-11.0487
293	20	-11.4031
294	21	-11.7541
295	22	-12.1017
296	23	-12.4456
297	24	-12.7859
298	25	-13.1224
299	26	-13.4550
300	27	-13.7836
301	28	-14.1081
302	29	-14.4284
303	30	-14.7445
304	31	-15.0562

Novembro		
n	Dia	Angulo
305	1	-15.3634
306	2	-15.6661
307	3	-15.9641
308	4	-16.2574
309	5	-16.5459
310	6	-16.8295
311	7	-17.1081
312	8	-17.3817
313	9	-17.6500
314	10	-17.9132
315	11	-18.1710
316	12	-18.4235
317	13	-18.6705
318	14	-18.9120
319	15	-19.1478
320	16	-19.3780
321	17	-19.6025
322	18	-19.8211
323	19	-20.0339
324	20	-20.2407
325	21	-20.4415
326	22	-20.6363
327	23	-20.8249
328	24	-21.0074
329	25	-21.1837
330	26	-21.3537
331	27	-21.5173
332	28	-21.6746
333	29	-21.8255
334	30	-21.9699

Dezembro		
n	Dia	Angulo
335	1	-22.1077
336	2	-22.2391
337	3	-22.3638
338	4	-22.4819
339	5	-22.5934
340	6	-22.6981
341	7	-22.7962
342	8	-22.8874
343	9	-22.9719
344	10	-23.0496
345	11	-23.1205
346	12	-23.1845
347	13	-23.2416
348	14	-23.2919
349	15	-23.3352
350	16	-23.3717
351	17	-23.4012
352	18	-23.4237
353	19	-23.4394
354	20	-23.4480
355	21	-23.4498
356	22	-23.4446
357	23	-23.4324
358	24	-23.4133
359	25	-23.3873
360	26	-23.3543
361	27	-23.3144
362	28	-23.2676
363	29	-23.2139
364	30	-23.1533
365	31	-23.0859

## ANEXO IV

### AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA – ANEEL

Resolução nº 112, de 18 de maio de 1999.

Estabelece os requisitos necessários à obtenção de Registro ou Autorização para a implantação, ampliação ou repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia.

O DIRETOR-GERAL DA AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA – ANEEL, no uso de suas atribuições regimentais, de acordo com Deliberação da Diretoria, tendo em vista o disposto nos incisos IV e XXXI do art. 4º do Anexo I do Decreto nº 2.335, de 6 de outubro de 1997, no art. 6º, no inciso I do art. 7º, no art. 8º e no § 3º do art. 17 da Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995, com nova redação dada pela Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998, no inciso I do art. 4º e no art. 5º do Decreto nº 2.003, de 10 de setembro de 1996, no art. 4º do Decreto nº 2.665, de 2 de julho de 1998, e considerando:

a necessidade de atualizar os procedimentos contidos nas Normas DNAEE nº 10 a 13 para Apresentação e Aprovação de Estudos e Projetos de Usinas Termelétricas, aprovadas pela Portaria DNAEE nº 187, de 21 de outubro de 1988, e de estabelecer procedimentos para as

centrais geradoras eólicas e de outras fontes alternativas de energia, no que se refere a solicitação de registro ou Autorização para a sua implantação ou ampliação;

as mudanças estruturais e institucionais do setor de energia elétrica brasileiro, resolvem:

#### DO OBJETO

Art. 1º Estabelecer os requisitos necessários à obtenção de Registro ou Autorização, junto à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, para a implantação, ampliação ou repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia.

#### DA APLICAÇÃO

Art. 2º O disposto nesta Resolução aplica-se a:

I – pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio interessadas em produzir energia elétrica destinada à comercialização sob forma de produção independente:

II – pessoa física e jurídica ou empresas reunidas em consórcio interessadas em produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo;

III – registro de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia, de potência até 5.000 kW, destinadas à execução de serviço público; e

IV – ampliação e repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia destinada à execução de serviço público.

Parágrafo único. As centrais geradoras referidas nesta Resolução não compreendem aquelas cuja fonte de energia primária seja hidráulica.

## DO REGISTRO

Art 3º O Registro de implantação, ampliação ou repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia, com potência igual ou inferior a 5.000 kW, deverá ser solicitado à ANEEL mediante requerimento, acompanhado de Ficha Técnica preenchida, na forma dos modelos anexos, conforme o caso.

## DOS ESTUDOS DE VIABILIDADE

Art 4º A realização de estudos de viabilidade de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia não necessita de prévia autorização,. Entretanto, facultativamente, a mesma poderá ser solicitada à ANEEL, mediante requerimento contendo dados e informações a seguir indicados, não gerando, porém, direito de preferência, exclusividade ou garantia de obtenção da Autorização para implantação da respectiva central geradora:

I – nome ou razão social, número de inscrição no Cadastro de Pessoas Físicas – CPF ou número do registro no Cadastro Nacional de Pessoas Jurídicas – CNPJ do Ministério da Fazenda – MF, endereço da empresa ou empreendedor e o nome do representante legal da empresa;

II – denominação, potência e localização da central geradora, com indicação do Município e do Estado da Federação;

III – características técnicas gerais da central geradora;

IV – finalidade a que se destina a energia elétrica;

V – finalidades previstas além de geração de energia elétrica;

VI – combustíveis previstos; e

VII – prazo previsto para conclusão dos estudos e projetos;

## DA AUTORIZAÇÃO

Art. 5º A Autorização para implantação, ampliação ou repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia, com potência superior a 5.000 kW, deverá ser solicitada à ANEEL, mediante requerimento, acompanhado de relatório contendo os seguintes requisitos:

### I - Requisitos Legais:

- a) nome ou razão social, número de inscrição no Cadastro de Pessoas Físicas – CPF ou número do registro no Cadastro Nacional de Pessoas Jurídicas – CNPJ do Ministério da Fazenda – MF, endereço da empresa ou empreendedor e o nome do representante legal da empresa;
- b) contrato ou estatuto social da empresa, com indicação da composição acionária;
- c) denominação e localização da central geradora, com indicação do Município e do Estado da Federação;
- d) prova de propriedade da área ou do direito de dispor livremente do terreno, onde será implantada a central geradora;
- e) acordo de fornecimento comprovando, quando for o caso, a disponibilidade do combustível a ser utilizado; e
- f) certificados de regularidade perante a Seguridade Social e o FGTS, e certidões de regularidade para com as Fazendas Federal, Estadual e Municipal do domicílio ou sede do interessado.

### II – Requisitos Técnicos:

- a) arranjo geral e memorial descritivo da central geradora contendo suas características técnicas principais, incluindo a respectiva subestação e as demais instalações de conexão ao sistema de transmissão, à rede de distribuição e/ou diretamente a outros consumidores;
- b) finalidade a que se destina a energia elétrica;

- c) finalidades previstas além da geração de energia elétrica;
- d) estudo comprovando a disponibilidade dos combustíveis previstos;
- e) fluxograma simplificado do processo;
- f) diagrama elétrico unifilar feral;
- g) balanço térmico da planta para as condições de operação com cem, setenta e cinco e cinqüenta por cento de carga, onde aplicável;
- h) fluxograma do sistema de resfriamento da central geradora, contendo vazões e temperatura, onde aplicável;
- i) ficha técnica preenchida na forma dos modelos anexos, conforme o caso; e
- j) cronograma geral de implantação da central geradora destacando as datas de elaboração do projeto básico, elaboração do projeto executivo, obtenção das licenças ambientais, início da construção, implementação da subestação e respectivo sistema de transmissão associado, conclusão da montagem eletromecânica, comissionamentos e início da operação comercial de cada unidade geradora.

Art. 6º A não apresentação de qualquer dos dados, informações e documentos, referidos nos arts. 3º, 4º e 5º desta Resolução, acarretará a sustação do respectivo requerimento até o integral cumprimento de todas as exigências.

Art. 7º A ANEEL examinará o histórico do interessado, quanto ao comportamento e penalidades acaso imputadas, no desenvolvimento de outros processos de autorização e concessão dos serviços de energia elétrica.

#### DAS DISPOSIÇÕES GERAIS

Art. 8º Toda documentação a ser apresentada deverá estar no idioma português;

Art. 9º Os desenhos, mapas, plantas e gráficos deverão ser numerados e apresentados obedecendo às correspondentes normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, em escalas gráficas, de tal forma que se permita identificar claramente os seus elementos, em todas as folhas, abrangendo a identificação e o local do empreendimento, sua área de influência e outros detalhes imprescindíveis à sua localização e inserção na região.

Art. 10. Toda documentação técnica a ser apresentada deverá ser assinada pelo Engenheiro Responsável Técnico (RT), não sendo aceitas cópias de Arquitetura e Agronomia – CREA.

§ 1º A Autorizada será responsável pelas Anotações de Responsabilidade Técnica (AET's) do empreendimento perante o Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia – CREA.

§ 2º Para cada responsável Técnico (RT), deverá ser indicada a região e o número de seu registro no respectivo Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia – CREA.

Art. 11. Toda documentação técnica a ser apresentada, conforme listado nos arts. 4º e 5º desta Resolução, poderá também ser apresentada, em igual teor, em meio digital, em CD – ROM, informando o software utilizado.

Art. 12. Quaisquer modificações dos dados apresentados na solicitação de Registro ou Autorização, que impliquem alterações significativas nas características do empreendimento, deverão ser informadas à ANEEL, imediatamente.

Art. 13. A ANEEL poderá solicitar outros dados e informações correlatos, ou a complementação daqueles já apresentados, para melhor instrução e análise do requerimento de Autorização.

Art. 14. A Autorizada deverá submeter-se aos “Procedimentos de Rede”, elaborados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – NOS e aprovados pela ANEEL, nos requisitos de planejamento, implantação, conexão, operação e de todas as responsabilidades relacionadas ao seu sistema de transmissão.

Parágrafo único. A Autorizada deverá, após o início de operação da central geradora, pagar os encargos de uso dos sistemas de distribuição e transmissão de acordo com a regulamentação específica.

Art. 15. A Autorizada deverá atender e cumprir a legislação relativa aos recursos hídricos, no que se refere à captação e lançamento de água de uso na central geradora.

Art. 16. Para fins de início das obras de implementação e início de operação a Autorizada deverá remeter à ANEEL, obrigatoriamente, previamente ao início da construção da central geradora bem assim de sua operação, cópia das Licenças de Instalação (LI) e de Operação (LO), respectivamente, emitidas pelo Órgão Licenciador Ambiental.

Art. 17. A Autorizada, além de atender ao disposto no art. 5º desta Resolução, deverá manter em seu arquivo, à disposição da ANEEL, os seguintes documentos:

I – Estudo de Impacto Ambiental (EIA), Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) ou estudo ambiental formalmente requerido pelo órgão ambiental conforme legislação específica de meio ambiente.

II –Projeto Básico; e

III – resultados dos ensaios de comissionamento.

Art. 18. Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação revogando-se a portaria DNAEE nº 187, de 21 de outubro de 1988, e demais disposições em contrário.

JOSÉ MÁRIO MIRANDA ABDO

## ANEXO V

Estão descritos nesse anexo algumas características dos equipamentos que são fornecidas pelos fabricantes. Esses dados foram retirados da Sol & Vento Energia Alternativa no site <[www.energia-alternativa.com.br/](http://www.energia-alternativa.com.br/)> acesso em 08/02/2005, que é uma das revendedora desses produtos.

### a) Placas Solares

Nas tabelas V.1 até V.5 tem-se características e preços de varias marcas de placas solares.

***Tabela V.1 – Características placas Shell Solar***

<b>Tipo</b>	<b>SM50</b>	<b>SM46</b>	<b>SP65</b>	<b>SP70</b>	<b>SP75</b>	<b>ST40</b>	<b>ST20</b>	<b>ST10</b>	<b>ST5</b>
Potência (Wp)	50	46	65	70	75	40	20	10	5
Tensão (V)	16,2	14,6	16,5	16,5	17	16,6	15,6	15,6	15,6
Corrente (A)	3,08	3,15	3,95	4,25	4,4	2,29	1,29	0,64	0,32
Geração diária (Ah/dia)	15,25	15,75	19,75	21,5	22	11,45	6,45	3,2	1,6
Altura (mm)	1293	1083	1200	1200	1200	1293	748	387	328
Largura (mm)	329	329	527	527	527	329	328	328	206
Espessura (mm)	34	36	56	56	56	36	35	35	35
Peso (Kg)	5,5	4,60	7,6	7,6	7,6	7,02	4,1	2,4	1,4
Precisa de Controlador de Carga	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

Tabela V.2 – Preços de placas

Potência de Pico	Modelos	Fabricante	Preço (R)
Classe 5 W	<u>KS-5A</u>	Kyocera	325, <sup>00</sup>
	<u>ST 5</u>	Shell Solar	320, <sup>00</sup>
	<u>I-05</u>	Isofoton	312, <sup>00</sup>
Classe 10 W	<u>KS-10A</u>	Kyocera	430, <sup>00</sup>
	<u>ST10</u>	Shell Solar	458, <sup>00</sup>
	<u>S10</u>	Shell Solar	443, <sup>00</sup>
	<u>SX 10U</u>	BP Solar	476, <sup>00</sup>
	<u>I-10</u>	Isofoton	480, <sup>00</sup>
Classe 20 W	<b>S25 Novo</b>	Shell Solar	625, <sup>00</sup>
	<u>ST20</u>	Shell Solar	895, <sup>00</sup>
	<u>KS-20A</u>	Kyocera	725, <sup>00</sup>
	<u>SX 20M</u>	BP Solar	700, <sup>00</sup>
	<u>I-22</u>	Isofoton	754, <sup>00</sup>
Classe 30 W	<u>SX 30U</u>	BP Solar	698, <sup>00</sup>
	<u>KC35</u>	Kyocera	780, <sup>00</sup>
	<b>S36 Novo</b>	Shell Solar	850, <sup>00</sup>
Classe 40 W	<u>SM 46</u>	Shell Solar	979, <sup>00</sup>
	<u>SX 40 U</u>	BP Solar	930, <sup>00</sup>
	<u>KC 45</u>	Kyocera	1.060, <sup>00</sup>
	<u>I-47</u>	Isofoton	1.073, <sup>00</sup>
Classe 50 W	<u>KC 50</u>	Kyocera	1.110, <sup>00</sup>
	<u>SM50H</u>	Shell Solar	1.011, <sup>00</sup>
	<u>SX 50U</u>	BP Solar	1.160, <sup>00</sup>
	<u>SX 55U</u>	BP Solar	1.278, <sup>00</sup>
	<u>I-50</u>	Isofoton	1.050, <sup>00</sup>
	<u>I-55</u>	Isofoton	1.359, <sup>00</sup>
Classe 60 W	<u>SX 60U</u>	BP Solar	1.290, <sup>00</sup>
	<u>SP 65</u>	Shell Solar	1.349, <sup>00</sup>
Classe 70 W	<b>SQ 70 Novo</b>	Shell Solar	1.416, <sup>00</sup>
	<b>BP 275</b>	BP Solar	1.495, <sup>00</sup>
	<b>SQ 75 Novo</b>	Shell Solar	1.484, <sup>00</sup>
Classe 80 W	<b>SQ 80 Novo</b>	Shell Solar	1.551, <sup>00</sup>
	<u>KC 80</u>	Kyocera	1.580, <sup>00</sup>
	<u>SX 80U</u>	BP Solar	1.680, <sup>00</sup>
Classe 90 W	<u>I-94</u>	Isofoton	1.963, <sup>00</sup>
Classe 100 W	<b>SM 100 Novo</b>	Shell Solar	2.293, <sup>00</sup>
Classe 110 W	<b>SM 110 Novo</b>	Shell Solar	2.293, <sup>00</sup>
Classe 120 W	<u>SX 120U</u>	BP Solar	2.845, <sup>00</sup>
Classe 160 W	<b>SQ 160 Novo</b>	Shell Solar	2.920, <sup>00</sup>

Tabela V.3 – Características de Placas BP Solar

Modelo	SX 5U	SX 10U	SX 20U	SX 30U	SX 40U	SX 50U	SX 60U	SX 80U	SX 120U
Potência - Pmax (Wp)	5 W	10 W	20 W	30 W	40 W	50 W	60 W	80 W	120 W
Tensão à Pmax (V)	16,5	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	33,7
Corrente à Pmax (A)	0,27	0,59	1,19	1,78	2,37	2,97	3,56	4,75	3,56
Corrente Curto-Circuito (A)	0,3	0,65	1,29	1,94	2,58	3,23	3,87	5,17	3,87
Tensão à circuito aberto (V)	20,5	21	21	21	21	21	21	21	42,1
Geração diária p/ 5 horas (Ah/dia)	1,35	2,95	5,95	8,90	11,85	14,85	17,8	23,75	17,80
Altura (mm)	245	416	419	589	762	934	1105	1456	1456
Largura (mm)	269	269	502	502	502	502	502	502	731
Espessura (mm)	22,6	22,6	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	50	26,9
Peso (Kg)	0,8	1,9	3,0	3,9	3,0	3,9	7,2	9,5	12,8

Os painéis solares são fabricados sob exigentes padrões de qualidade das normais ISO 9001. Na cor natural, com molduras em alumínio anodizado e parafusos em aço inoxidável, resistentes à corrosão, suportando ventos de até 220 Km/h.

A Série SX é fabricada com células poli-cristalinas, que geram energia, mesmo em dias nublados. Devido a máxima uniformidade dos painéis, estes podem ser configurados individualmente, ou através de múltiplas unidades, podendo ser ligados em série, ou em paralelo, para produzirem as correntes e a tensões desejadas.

Cada módulo possui uma caixa de ligação em sua face posterior, à prova de intempéries (IP54), de construção termoplástica com múltiplas entradas tamanho padrão (até 21 mm<sup>2</sup>).

Tabela V.4 – Placas Kyocera Tecnologia Japonesa 25 Anos de Garantia

Modelo	KS5A	KS10A	KS20A	KC35	KC40	KC45	KC50	KC60	KC80
Potência de pico (W)	5	10	24	35	40	45	50	60	80
Tensão (Vmaxp)	16,9	16,9	16,9	15	16,9	15	16,7	16,9	16,9
Corrente (Amaxp)	0,25	0,60	1,20	2,33	2,34	3,00	3,00	3,55	4,73
Tensão circuito aberto	21,5	21,5	21,5	18,8		19,2	21,5	21,5	21,5
Corrente curto	0.31	0.62	1.24	2.5		3.1	3,1	3,73	4,75
Geração diária (Ah/dia)	1,50	3,20	6,45	11,65	11,70	15,00	15,00	17,75	23,65
Altura (mm)	352	340	635	471	526	652	659	751	976
Largura (mm)	205	352	352	652	652	573	652	652	652
Espessura (mm)	22	22	22	52	52	54	54	52	52
Peso (Kg)	1,2	2,1	2,8	4	6	4,5	5	7,8	8

**Tabela V.5 – Características de Placas ISOFOTON**

<b>Modelos</b>	<b>I-5</b>	<b>I-10</b>	<b>I-22</b>	<b>I-47</b>	<b>I-50</b>	<b>I-55</b>	<b>I-94</b>	<b>I-100</b>
Potência (Wp)	5	12	24	35	40	45	60	80
Tensão (Vmaxp)	15,5	17,4	17,4	16	17,4	17,4	16,0	17,4
Corrente (Amaxp)	0,32	0,58	1,26	2,94	2,87	3,16	5,88	5,74
Geração diária (Ah/dia)	1,60	2,90	6,30	14,70	14,35	15,80	29,40	28,70
Altura (mm)	272	373	586	1.216	1.290	1.310	751	976
Largura (mm)	272	338	436	328	328	651	652	652
Espessura (mm)	34	34	34	34	34	34	52	52
Peso (Kg)	1	1,7	3	5,5	5,7	11	7,80	8
Necessidade de Controlador de Carga	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Características Construtivas:

- Células quadradas de silício mono-cristalino.
- Células texturizadas quimicamente com cobertura anti-reflexiva.
- Contato múltiplos e redundantes em cada célula.
- Circuitos laminados entre camadas de EVA (Etileno-Vinil-Acetato).
- Moldura em alumínio Anodizado.
- Face frontal, protegida com vidro temperado de alta transmissividade.
- Face posterior protegida com Tedlar de várias camadas.
- Caixa de conexão, incluindo diodo de by-pass.
- Garantia de 20 anos

b) Baterias

Nas tabelas V.6 e V.7 tem-se características e preços de marcas de baterias.

**Tabela V.6 – Baterias Moura**

<b>MODELOS</b>		12MF36 12MC36	12MF45 12MC45	12MF63 12MC63	12MF105 12MC105	12MF150 12MC150	12MF175 12MC175	12MF220 12MC220
<b>PREÇO</b>		190,00	238,00	346,00	568,00	740,00	845,00	1157,00
<b>Ah</b>		36	45	63	105	150	175	220
Tensão Nominal		12 Vcc						
Capacidade a 25°C (Ah)	10h- 1,75V/Elem	32	41	57	94	135	156	195
	20h- 1,75V/Elem	36	45	63	105	150	175	220
	100h- 1,75V/Elem	40	50	69	115	165	194	244
Dimensões (mm)	Comprimento	212	212	277	330	512	517	517
	Largura	175	175	175	172	211	290	290
	Altura	175	175	175	254	233	240	240
Peso (Kg)		10,5	11,5	16,4	25,5	43,8	51,0	56,2
Tipos dos Terminais		Tipo "L"						
Acessórios		Parafusos, arruelas e porcas sextavadas em aço inox						
Tensão de Flutuação (V)		13,20 - 13,38 a 25°C						
Tensão de Equalização (V)		14,20 -14,40 a 25°C						
Compensação de Temperatura		-0,33 V para cada 10°C acima de 25°C						
		+0,33 V para cada 10°C abaixo de 25°C						

***Tabela V.7 – Baterias Estacionárias Delphi***

<b>Modelo</b>	<b>Capacidade</b>	<b>Preço</b>	<b>Características</b>
DF 2000	115 Ah - 12V	450,00	Tensão nominal: 12V Capacidade nominal: 115Ah em 100h a 25°C até 10,5V 100Ah em 20h a 25°C até 10,5V Dimensões: Comprimento: 330mm Largura: 172mm Altura: 240mm Peso: 27,3Kg
DF 3000	185 Ah - 12V	620,00	Tensão nominal: 12V Capacidade nominal: 185Ah em 100h a 25°C até 10,5V 170Ah em 20h a 25°C até 10,5V 160Ah em 10h a 25°C até 10,5V Dimensões: Comprimento: 510 mm Largura: 213 mm Altura: 230 mm Peso: 46 Kg

c) Controladores

Na tabela V.8 tem-se características e preços de varias marcas de conversores

*Tabela V.8 – Preços e Características de Controladores*

<b>Modelo</b>	<b>Corrente</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Preço (R\$)</b>	<b>Observações</b>
<b>Tristar TS 45 e TS 60</b>	45 A	Morningstar	1.490, <sup>00</sup>	Importado
<b>C40 - 12V/24V/48V</b>	40 A	Trace	1.050, <sup>00</sup>	Importado
<b>Módulo CM</b> Medidor, totalizador e mostrador digital para o C40	-	Trace	548, <sup>00</sup>	Acessório do C40
<b>Solsum 8.8 - 12V</b>	8 A	Steca GmbH	265, <sup>00</sup>	Importado
<b>SR 12 A - 12V/24V</b>	12 A	Steca GmbH	325, <sup>00</sup>	Importado
<b>SR 20A - 12V/24V</b>	20 A	Steca GmbH	404, <sup>00</sup>	Importado
<b>SR 30A - 12V/24V</b>	30 A	Steca GmbH	525, <sup>00</sup>	Importado
<b>SunSaver-SS10 - 12V (LVD)</b>	10 A	Morningstar	280, <sup>00</sup>	Importado
<b>Sunlight-SL10 - 12V,</b> com função de foto-célula e temporizador	10 A	Morningstar	410, <sup>00</sup>	Importado
<b>Prostar 15 - 12V/24V</b>	15 A	Morningstar	640, <sup>00</sup>	Importado
<b>ProStar 15 - medidor e mostrador digital</b>	15 A	Morningstar	consulte	Importado
<b>ProStar 30 - 12V/24V,</b> Uma excelente escolha para um sistema solar desassistido. Muito confiável, com recuperação automática, no caso de falhas e fácil de usar	30 A	Morningstar	915, <sup>00</sup>	Importado.
<b>ProStar 30 - medidor e mostrador digital</b>	30 A	Morningstar	1.100, <sup>00</sup>	Importado

## d) Inversores

Nas tabelas V.9 até V.14 tem-se características e preços de marcas de inversores

**Tabela V.9 – Preços de Inversores**

Potência	Modelos	Fabricante	Tensão Entrada	Tensão Saída	Preço (R\$)	Forma Onda
150W	<u>HT-E-150</u>	izzyPower	12Vcc	120Vca	180, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
300W	<u>HT-E-300</u>	izzyPower	12Vcc	120Vca 220Vca	267, <sup>00</sup> 297, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
600W	<u>HT-E-600</u>	izzyPower	12Vcc	120Vca 220Vca	577, <sup>00</sup> 607, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
1200W	<u>HT-P-1200</u>	izzyPower	12Vcc	120Vca	1.215, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
2300W	<u>HT-P-2300</u>	izzyPower	12Vcc	120Vca	2.525, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
300W	<u>HT-S-300</u>	izzyPower	12Vcc	120Vca	Esgotado	Senóide PURA Importado
600W	<u>HT-S-600</u>	izzyPower	12Vcc	120Vca	Esgotado	Senóide PURA Importado
150W	Portawattz 150	Xantrex	12Vcc	110Vca	220, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
240	<u>Jazz 300</u>	Xantrex	12Vcc	110Vca	600, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
400	<u>Jazz 500</u>	Xantrex	12Vcc	110Vca	750, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
300	<u>Portawattz 300</u>	Xantrex	12Vcc	110Vca	595, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
600	<u>Portawattz 600</u>	Statpower	12Vcc	110Vca	Esgotado	Senóide Modificada Importado
1.200	Xpower 1200+ Com display	Xantrex	12Vcc	110Vca	1.430, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
1.200	<u>Jazz 1200</u>	Xantrex	12Vcc	115Vca	2.070, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
1.750	<u>Portawattz PWZ 1750</u>	Statpower	12Vcc	110Vca	4.900, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
1.750	<u>Jazz 1750</u>	Xantrex	12Vcc	115	2.790, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
3.000	<u>Portawattz PWZ 3000</u>	Statpower	12Vcc	110Vca	5.640, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
250	PROwatt 250	Statpower	12Vcc	110Vca	805, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado
250	PROwatt 250	Statpower	24Vcc	110Vca	1.040, <sup>00</sup>	Senóide Modificada Importado

Continuação da Tabela V.9 – Preços de Inversores

Potência	Modelos	Fabricante	Tensão Entrada	Tensão Saída	Preço (R\$)	Forma Onda
<b>1.000</b>	PROwatt 800	Statpower	12Vcc	110Vca	<b>1.380,00</b>	Senóide Modificada Importado
<b>1.500</b>	PROwatt 1500	Statpower	12Vcc	110Vca	<b>5.695,00</b>	Senóide Modificada Importado
<b>1.000</b> <b>1.000</b>	Prosine 1.000 Prosine 1.000i	Statpower	12Vcc 12Vcc	110Vca 230Vca	<b>5.765,00</b>	Senóide PURA Importado
<b>1.000</b> <b>1.000</b>	Prosine 1.000 Prosine 1.000i	Statpower	24Vcc 24Vcc	110Vca 230Vca	<b>6.350,00</b>	Senóide PURA Importado
<b>1.800</b> <b>1.800</b>	Prosine 1.800 Prosine 1.800i	Statpower	12Vcc 12Vcc	110Vca 230Vca	<b>8.380,00</b>	Senóide PURA Importado
<b>1.800</b> <b>1.800</b>	Prosine 1.800 Prosine 1.800i	Statpower	24Vcc 24Vcc	110Vca 230Vca	<b>9.285,00</b>	Senóide PURA Importado
<b>2.400 VA</b>	DR2412, Inversor e Carregador	Trace	12Vcc	120Vca	<b>5.650,00</b>	Senóide Modificada Importado
<b>2.500 VA</b>	PS 2512	Trace	12Vcc	120Vca	<b>14.300,00</b>	Senóide PURA Importado

Tabela V.10 – Inversores Jazz - Xantrex

Especificações Técnicas	Jazz 1750	Jazz 1200
Potência de saída uso contínuo	1500 W	1000 W
Potência Máxima (5 minutos)	1750 W	1200 W
Potência de Surto (Surge Power)	3000 W	2000 W
Consumo sem carga	< 0,4 A	< 0,4 A
Tensão de Alarme Baixa Tensão na Bateria	10,7 Vcc	10,7 Vcc
Desligamento por Tensão Baixa na Bateria	10,0 Vcc	10,0 Vcc
Desligamento por Alta Tensão na Bateria	15,0 Vcc	15,0 Vcc
Tensão de Entrada	10 a 15 Vcc	10 a 15 Vcc
Tensão de Saída	115 Vca +/- 5%	115 Vca +/- 5%
Faixa de Temperatura	0 a 40 graus C <sup>0</sup>	0 a 40 graus C <sup>0</sup>
Frequência de Saída	60 +/- 4 Hz	60 +/- 4 Hz
Forma de Onda	Senoidal Modificada	Senoidal Modificada
Eficiência (Máxima)	90%	90%
Tomada CA	Tripla	Tripla
Dimensões (A x L x C)	83 x 240 x 440 mm	83 x 240 x 290 mm
Peso	4,3 Kg	2,9 Kg
Garantia	1 ano	1 ano

**Tabela V.11 – Inversores Jazz - Xantrex**

Especificações Técnicas	Jazz 150	Jazz 300	Jazz 500
Tensão de entrada	12 Vcc	12 Vcc	12 Vcc
Tensão de saída	110 Vca	110 Vca	110 Vca
Potência de saída uso contínuo	120 W	240 W	400 W
Potência Máxima (30 minutos)	150 W	300 W	500 W
Potência de Surto (Surge Power)	300 W	600 W	1000 W
Consumo sem carga	0,15 A	0,20 A	0,25 A
Tensão de Alarme Baixa Tensão na Bateria	10,7 Vcc		
Desligamento por Tensão Baixa na Bateria	10,0 Vcc		
Desligamento por Alta Tensão na Bateria	15,0 Vcc		
Tensão de Saída Nominal	110 Vca		
Faixa de Temperatura (Celsius)	90%		

**Tabela V.12 – Inversores PortaWattz**

Especificações Técnicas	PWZ 300	PWZ 600	PWZ 1000	PWZ 1750	PWZ 3000
Potência de saída uso contínuo	300 W	600 W	1000 W	1750 W	3000 W
Potência de pico	500 W	1200 W	2000 W	3000 W	5000 W
Rendimento médio	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %
Consumo sem carga	0,1 A	0,3 A	0,3 A	0,6 A	0,6 A
Forma das ondas	senóide modificada				
Tensão de entrada	10 a 15 Vcc				
Tensão de saída	115 Vca RMS ±5%				
Alarme de tensão baixa	sim (10,6 V)				
Auto-desligamento: baixa tensão	sim (10 V)				
Tomadas CA	duplo	triplo	triplo	triplo	duplo c/ disj. 15A
Peso	0,8 Kg	2 Kg	2,4 Kg	3,8 Kg	9 Kg
Dimensões (C x L x A) cm <sup>3</sup>	15,2x12x4	28x16x6,5	26x24x8	41x24x8	49,5x21,5x15,9

**Tabela V.13 – Características Inversores IZZY POWER**

<b>Especificações Técnicas</b>	<b>HT-E-150</b>	<b>HT-E-300</b>	<b>HT-S-300</b>	<b>HT-S-600</b>	<b>HT-P-1200</b>	<b>HT-P-2500</b>
Potência Contínua	150 W	270 W	300 W	600 W	1200 W	2000 W
Tensão de Saída	120 Vca	120 Vca	120 Vca	120 Vca	120 Vca	120 Vca
Regulação	± 10%	± 10%	± 10%	± 10%	± 10%	± 10%
Forma Onda Saída	Senóide Modificada	Senóide Modificada	Senóide Pura	Senóide Pura	Senóide Modificada	Senóide Modificada
Tensão de Entrada	10 a 15 Vcc	10 a 15 Vcc	10 a 15 Vcc	12 Vcc	10 a 15 Vcc	10 a 15 Vcc
Alarme Baixa Tensão Entrada	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Frequência	60 Hz ± 4%	60 Hz ± 4%	60 Hz ± 4%	60 Hz ± 2%	60 Hz ± 2 Hz	60 Hz ± 2 Hz
Rendimento	> 85 %	> 85 %	> 75 %	80 ~ 86 %	> 85 %	> 85 %
Corrente Vazio	< 0,2 A	< 0,25 A	< 0,8 A	< 0,9 A	< 0,8 A	< 0,8 A
Distorção	-	-	-	± 3%	-	-
Proteção Baixa Tensão de Entrada	Sim	Sim	Sim	Sim (alarme e corte por baixa tensão da bateria)	Sim	Sim
Proteção Alta Tensão de Entrada	-	-	Sim	Sim	Sim	Sim
Proteção Alta Temperatura	55° ± 5°	55° ± 5°	55° ± 5°	55° ± 5°	Sim	Sim
Ventilador			Sim	Sim	80mm x 1	80 mm x 2
Proteção Sobre-Carga	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Proteção Polaridade Invertida Entrada	Sim	Sim	Sim (Entrada)	Sim (Entrada)	Sim	Sim
Acessórios	Cabos e conector tipo isqueiro	Cabos, conectores para bateria e conector tipo isqueiro	Cabos, conectores para bateria	Cabos, conectores para bateria	Cabos de força com garras do tipo jacaré, nas cores vermelho e preto	Cabos de força com garras do tipo jacaré, nas cores vermelho e preto
Dimensões ( C x L x A ) mm	130 x 100 x 65	180 x 101 x 66	220 x 153 x 77	300 x 80 x 240	360 x 274 x 105	510 x 274 x 105
Peso Líquido	0,65 Kg	1,01 Kg	1,84Kg	3,52 Kg	5,6 Kg (6,8 Kg com cabos de força)	8,4 Kg (11,8 Kg com cabos de força)

e) Refrigeradores

Nas tabelas V.14 e V.17 tem-se características e preços de marcas de refrigeradores.

**Tabela V.14 – Geladeiras e Freezers**

<b>Equipamentos para Operação com Baterias 12Vcc ou 24 Vcc</b>	<b>Modelo</b>	<b>Preço (R\$)</b>
Geladeira 80 litros	RE-080	2.390, <sup>00</sup>
Geladeira 120 litros	RE-120	2.429, <sup>00</sup>
Geladeira 240 litros	RE-240	2.755, <sup>00</sup>
Freezer horizontal 150 litros	HFR-150	3.234, <sup>00</sup>
Freezer horizontal 260 litros	HFR-260	4.506, <sup>00</sup>

**Tabela V.15 – Refrigerador - Modelo RE 080:**

Aplicação:	Geladeira com refrigerador para ônibus, trailers e energia solar.
Volume útil interno útil total:	80 litros.
Temperatura do congelador:	-11 graus (negativo) - posicionar o termostato na posição de 6 a 7.
Temperatura do refrigerador:	+2 graus (positivo) - posicionar o termostato na posição 5.
Controle de Temperatura:	Regulável por termostato
Consumo bateria:	O consumo da bateria será reduzido em 40 %, quando o freezer estiver gelado (o termostato desligará o compressor). Consumo médio em 12 Vcc: 2,9 A por hora (69,6 Ah por dia).
Funcionamento:	Este sistema de compressor não gera pico de consumo de energia na partida. Evitar instalá-la em local onde tenha sol.
Medidas:	Profundidade: 594 mm Largura: 476 mm Altura: 630 mm
Peso:	41 Kg (embalagem: + 4 kg).

**Tabela V.16 – Refrigerador - Modelo RE 120**

Aplicação:	Geladeira com refrigerador para ônibus, trailers e energia solar.		
Capacidade Total:	120 L	Congelador: 7,6 L	Refrigerador: 112,4 L
Volume Útil:	120 L		
Temperatura do congelador:	-11 graus (negativo) - posicionar o termostato na posição de 6 a 7.		
Temperatura do refrigerador:	+2 graus (positivo) - posicionar o termostato na posição 5.		
Controle de Temperatura:	Regulável por termostato		
Funcionamento:	Este sistema de compressor não gera pico de consumo de energia na partida. Evitar instalá-la em local onde tenha sol.		
Consumo bateria:	O consumo da bateria será reduzido em 40 %, quando o freezer estiver gelado (o termostato desligará o compressor). Consumo médio em 12 Vcc: 3,0 A por hora (72 Ah por dia). Consumo médio em 24 Vcc: 1,4 A por hora.		
Funcionamento:	Este sistema de compressor não gera pico de consumo de energia na partida. Evitar instalá-la em local onde tenha sol.		
Medidas:	Profundidade: 594 mm Largura: 482 mm Altura: 864 mm		
Peso:	25 Kg (embalagem = + 4 Kg)		

**Tabela V.17 – Refrigerador Vertical - RE 240:**

Aplicação:	Geladeira com refrigerador para aplicação automotiva e energia solar.		
Capacidade total:	231 L	Congelador: 22 L	Refrigerador: 209 L
Volume Útil	229 L		
Temperatura do congelador:	-11 graus (negativo) - posicionar o termostato na posição de 6 a 7.		
Temperatura do refrigerador:	+2 graus (positivo) - posicionar o termostato na posição 5.		
Controle de temperatura:	Regulável por termostato		
Consumo bateria:	O consumo da bateria será reduzido em 40 %, quando o freezer estiver gelado (o termostato desligará o compressor). Consumo médio em 12 Vcc: 3,1 A por hora ( <b>74,4 Ah por dia</b> ). Consumo médio em 24 Vcc: 1,4 A por hora		
Funcionamento:	Este sistema de compressor não gera pico de consumo de energia na partida. Evitar instalá-la em local onde tenha sol.		
Medidas:	Profundidade: 670 mm Largura: 476 mm Altura: 1.485 mm		
Peso:	41 Kg (embalagem: + 4 kg).		

A Tabela V.18 apresenta o consumo de alguns aparelhos elétricos em 12 volts mais comuns, usados nas residências. Com estes dados torna-se possível o cálculo de quantos painéis são necessários para utilização dos aparelhos.

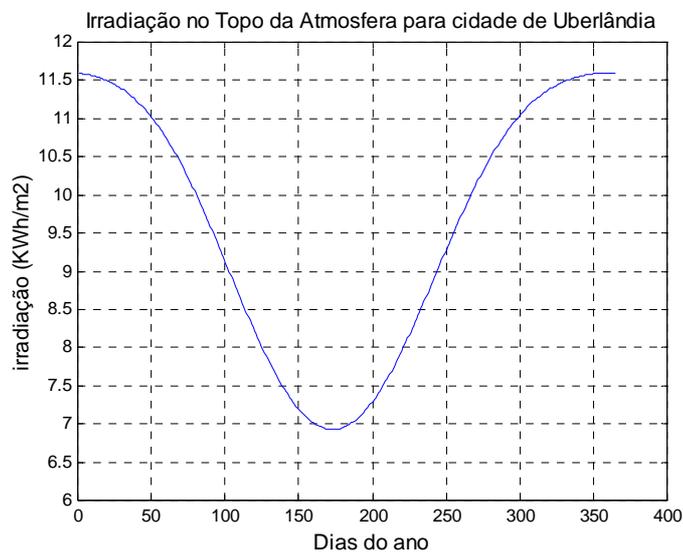
*Tabela V.18 – Consumo de aparelhos*

<b>APARELHO</b>	<b>CORRENTE</b>
TV preto e branco 12” (12 volts)	2,00 Ah
TV colorida 14” (12 volts)	4,00 Ah
Rádio AM FM (12 volts)	1,50 Ah
Rádio receptores (12 volts)	2,00 Ah
Rádio transmissor (transmitindo) (12 volts)	10,00 Ah
Rádio Standbay (12 volts)	0,50 Ah
Rádio telefone Standbay (12 volts)	0,50 Ah
Rádio telefone (transmitindo) (12 volts)	3,00 Ah
Rádio toca-fitas - CD. (12 volts)	3,00 Ah
Antena parabólica (12 volts)	2,50 Ah
Computador	8,00 Ah
Impressora	8,00 Ah
Batedeira	10,00 Ah
Liquidificador	25,00 Ah
Microondas	120,00 Ah
Ventilador teto	4,00 Ah
Ventilador mesa	2,00 Ah

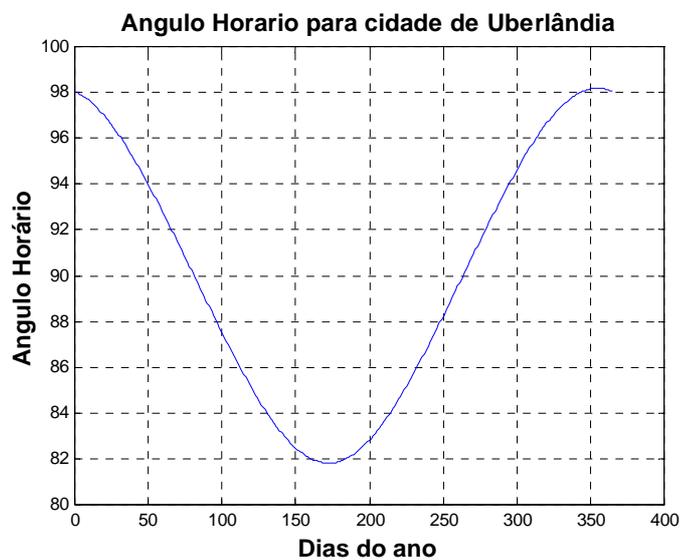
## ANEXO VI

Cálculo do valor da irradiação no plano horizontal incidente no topo da atmosfera.

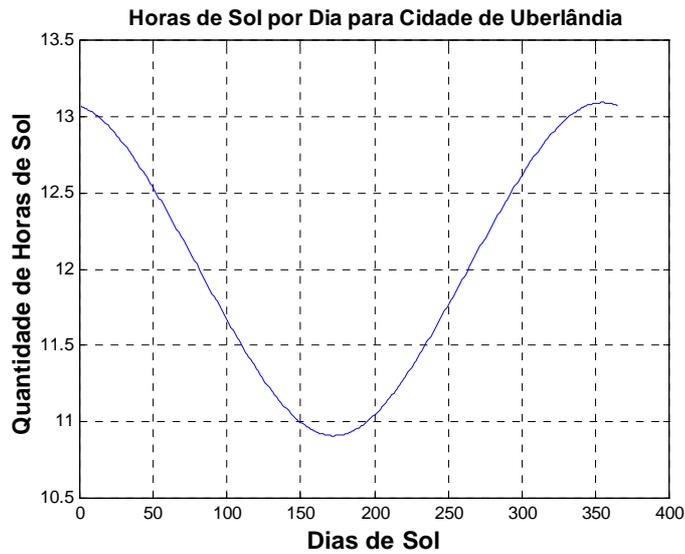
- a) Para o cálculo do Índice de Irradiação no topo da atmosfera para a Cidade de Uberlândia utilizamos o programa IRRADIA. Do qual obtivemos os gráficos a seguir:



*Figura VI.1 - Irradiação no Topo da Atmosfera para cidade de Uberlândia*



*Figura VI.2 - Ângulo Horário para cidade de Uberlândia*



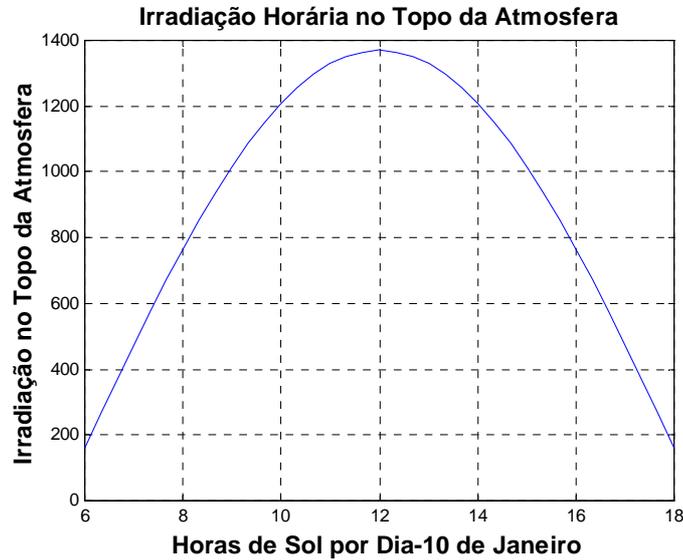
*Figura VI.3 - Horas de sol por dia para cidade de Uberlândia*

- b) O programa IRRALAT calcula a Irradiação no topo da atmosfera para todas as latitudes em um determinado dia (J). Sendo obtido gráfico abaixo, onde se observa que para Uberlândia latitude  $-18.171$  temos a irradiação de 7.4317, no dia 205, 24 de Julho.



*Figura VI.4 – Irradiação para todas as latitudes no dia 205*

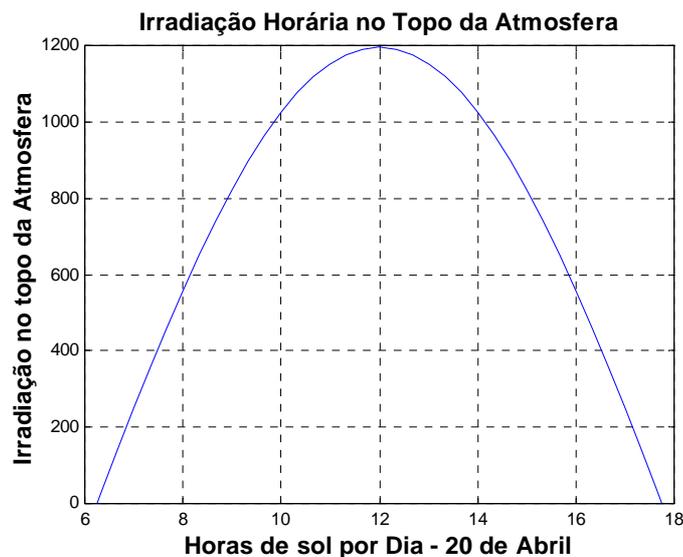
- c) O programa IRRAHORA calcula o valor da Irradiação Horária no Topo da Atmosfera para cidade de Uberlândia.



**Figura VI.5 – Irradiação Horária no Topo da Atmosfera para cidade de Uberlândia no dia 10**

**Tabela VI.1 – Dados da Figura VI.5**

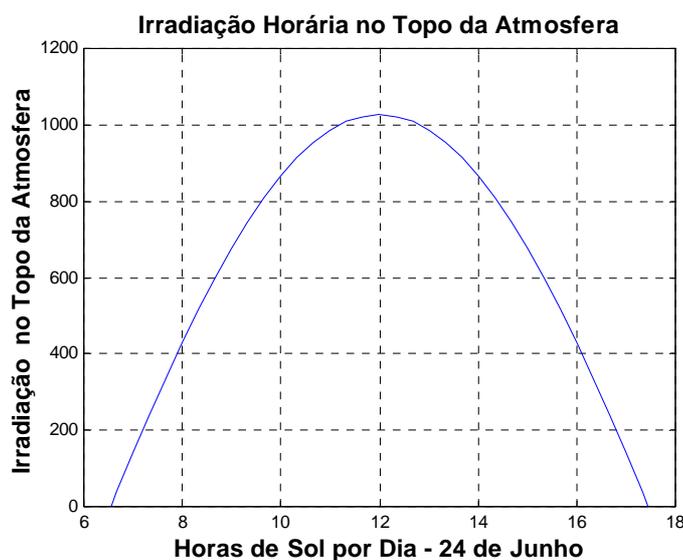
Cidade	Uberlândia
Latitude	-18,171
Dia	10 de janeiro - J =10
Horas de Sol	$h(10)= 13,01809830910066$
Horário do Nascer do Sol	$H_{nas}(10)= 5,49095084544967$
Horário do pôr do Sol	$H_{por}(10) = 18,50904915455033$



**Figura VI.6 – Irradiação Horária no Topo da Atmosfera para cidade de Uberlândia no dia 110 - 20 Abril**

**Tabela VI.2 – Dados da Figura VI.6**

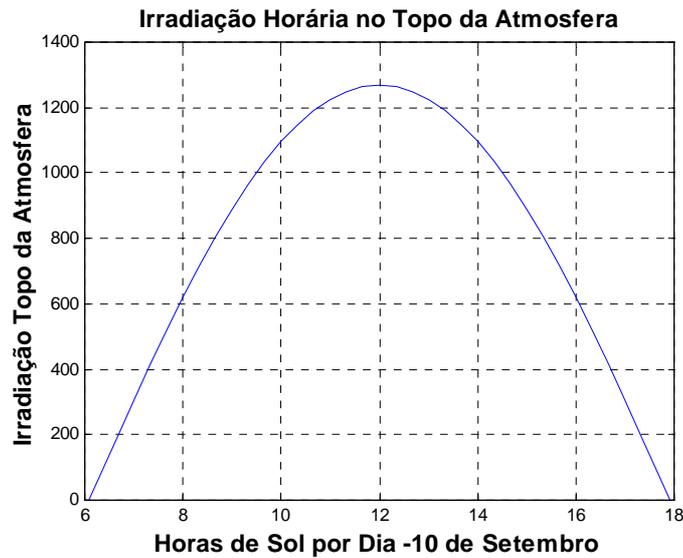
Cidade	Uberlândia
Latitude	-18,171
Dia	20 Abril – J =110
Horas de Sol	$h(110)= 11,50196515728612$
Horário do Nascer do Sol	$H_{nas}(110)=6,24901742135694$
Horário do pôr do Sol	$H_{por}(110)= 17,75098257864306$



**Figura VI.7 – Irradiação Horária no Topo da Atmosfera para cidade de Uberlândia no dia 175 - 24 de Junho**

**Tabela VI.3 – Dados da Figura VI.7**

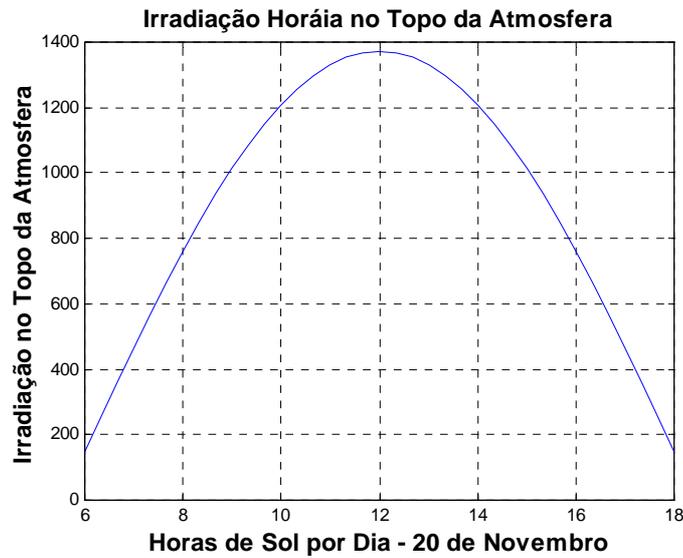
Cidade	Uberlândia
Latitude	-18,171
Dia	24 de Junho - J =175
Horas de Sol	$h(175)= 10,91000824283735$
Horário do Nascer do Sol	$H_{nas}(175)= 6,54499587858132$
Horário do pôr do Sol	$H_{por}(175)= 17,45500412141868$



*Figura VI.8 – Irradiação Horária no Topo da Atmosfera para cidade de Uberlândia no dia 253 - 10 de Setembro*

*Tabela VI.4 – Dados da Figura VI.8*

Cidade	Uberlândia
Latitude	-18,171
Dia	10 de Setembro - J =253
Horas de Sol	$h(253)= 11,81516427174206$
Horário do Nascer do Sol	$H_{nas}(253)= 6,09241786412897$
Horário do pôr do Sol	$H_{por}(253)= 17,90758213587103$



**Figura VI.9 – Irradiação Horária no Topo da Atmosfera para cidade de Uberlândia no dia 324 - 20 de Novembro**

**Tabela VI.5 – Dados da Figura VI.9**

Cidade	Uberlândia
Latitude	-18.171
Dia	20 de Novembro - J =324
Horas de Sol	12,93692235801817
Horário do Nascer do Sol	Hnas(325) = 5,53153882099091
Horário do pôr do Sol	Hpor(325) =18,46846117900909

# Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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