



# RETC

Revista Eletrônica de Tecnologia e Cultura  
www.revista-fatecjd.com.br

## MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO NO SOFTWARE SCILAB

José Airton Azevedo dos SANTOS  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UFPR  
airton@utfpr.edu.br

Roger Nabeyama MICHELS  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UFPR  
rogermmichels@utfpr.edu.br

### RESUMO

Os sistemas convencionais de fornecimento de energia elétrica nem sempre se apresentam como a melhor opção para satisfazer as necessidades do setor rural, por isso, há necessidade de pesquisas envolvendo a utilização de fontes alternativas de energia, dentre elas a solar fotovoltaica. Atendendo a essa necessidade, este trabalho estabeleceu como objetivo implementar, no software SCILAB (software livre), dois modelos matemáticos utilizados na simulação de células fotovoltaicas. Um painel fotovoltaico de 56W foi simulado e os resultados obtidos dos modelos foram comparados com valores de campo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Simulação, Painéis fotovoltaicos, Modelos matemáticos.

### ABSTRACT

Conventional systems for the supply of electricity is not always present themselves as the best option to meet the needs of the rural sector, so there is need for research involving the use of alternative sources of electricity, including solar photovoltaic. Given this need, this work has established

the objective to implement, in SCILAB software (free software), two mathematical models used in the simulation of photovoltaic cells. A photovoltaic panel of 56W was simulated and the results of the models were compared with field values.

**KEYWORDS:** Simulation, Photovoltaic panels, Mathematical models.

### INTRODUÇÃO

Muitas comunidades em razão de viverem em locais de difícil acesso e muitas vezes em áreas de proteção ambiental (APA), têm dificuldades de serem atendidas pelos serviços convencionais de eletricidade, como as redes de distribuição (COSTA, 1998; SERPA, 2001; TREBLE, 1991). Para Abade (1996) e Ribeiro (2010), a geração de eletricidade por energia solar fotovoltaica, através de Sistemas Individuais de Geração com Fontes Intermitentes (SIGFI), é um recurso estratégico capaz de trazer contribuição à sustentabilidade de demandas energéticas em locais distantes da rede elétrica, evitando custos marginais superiores, além de poder prover o desenvolvimento socioeconômico e preservar o meio ambiente em zonas isoladas.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser utilizados em aplicações sociais, tais como: iluminação pública, bombeamento de água, energização de escolas, postos de saúde, centros comunitário, postos telefônicos, produção de gelo e dessalinização da água (CAMUS, 2006; CEPEL/CRESESB, 1999; MERSTEN, 1996; CARDONA, 1999).

Os modelos matemáticos, para simulação de painéis fotovoltaicos, têm sido criados a mais de quatro décadas (NAWATA, 2006). Contudo, a grande maioria dos modelos matemáticos, são implementados em plataformas de simulação comerciais.

Atualmente, pode-se constatar o grande desenvolvimento e a aplicabilidade dos chamados softwares livre, ou *Free Open Source Software*, nas mais distintas áreas. O SCILAB é um software livre de código aberto para computação numérica que inclui centenas de funções matemáticas. Ele tem

uma linguagem de programação de alto nível que permite o acesso às estruturas de dados avançados e funções gráficas 2D e 3D (BARRETO, 2008).

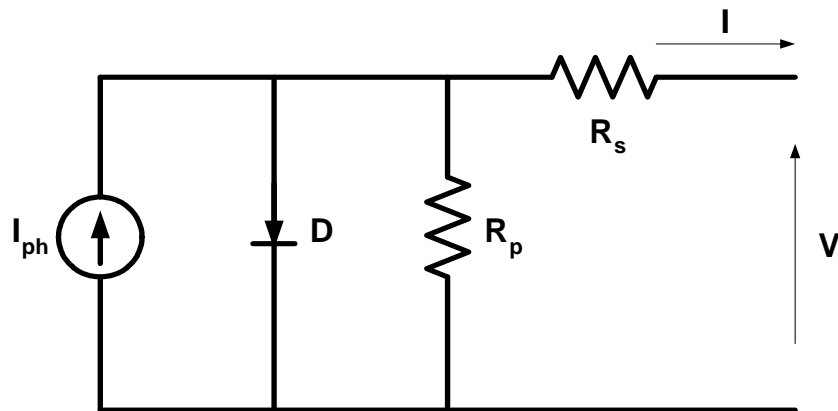
O objetivo deste trabalho é implementardois modelos matemáticos, para simulação de painéis fotovoltaicos, num software livre. Este software deverá ser utilizado nas disciplinas, que tratam sobre energias alternativas, dos cursos de engenharia do Campus Medianeira da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Modelo 1

O primeiro modelo, implementado no software SCILAB, para descrever uma célula solar, foi baseado no seu circuito equivalente (modelo de um diodo), mostrado na Figura 1.

**Figura 1 – Circuito equivalente de uma célula**



A relação entre a tensão (V) e a corrente (I), para o modelo de um diodo, é dada pela equação (BELARBI, 2006):

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\left( \frac{q(V + R_s I)}{n k T} \right)} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1)$$

Onde  $R_s$  é a resistência série ( $\Omega$ ),  $R_p$  é a resistência paralela ( $\Omega$ ),  $n$  é o parâmetro do diodo (usualmente 1.2),  $T$  é a temperatura da célula (K),  $q$  é a carga do elétron

( $1.6021 \times 10^{-19}$  C),  $k$  é a constante de Boltzmann's ( $1.3845 \times 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>),  $I_{ph}$  é a corrente gerada pela radiação luminosa e  $I_s$  é a corrente de saturação.

A corrente  $I_{ph}$  é dada por:

$$I_{ph} = (C_0 + C_1 T) \frac{G}{G^*} \quad (2)$$

Onde  $C_0$  é um coeficiente que relaciona  $I_{ph}$  com a irradiação (A),  $C_1$  é o coeficiente

que expressa a relação entre  $I_{ph}$  e a temperatura ( $AK^{-1}$ ), e  $G^*$  é a irradiação para as condições de referência ( $Wm^{-2}$ ). As constantes  $C_0$  e  $C_1$  são obtidas através seguintes expressões:

$$C_0 = \frac{I_{sc1}T_2 - I_{sc2}T_1}{T_2 - T_1} \quad (3)$$

$$C_1 = \frac{I_{sc1} - I_{sc2}}{T_2 - T_1} \quad (4)$$

Onde  $I_{sc1}$  e  $I_{sc2}$  são as correntes de curto-circuito relativas às temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ . A dependência da corrente de saturação em relação à temperatura é dada por:

$$I_s = C_3 T^3 e^{\left(\frac{-C_2}{T}\right)} \quad (5)$$

Onde as constantes  $C_2$  e  $C_3$  são expressas por:

$$C_2 = \frac{qE_g}{k} \quad (6)$$

$$C_3 = \frac{I_{sc1} e^{\left(\frac{1.12q}{nkT_1}\right)}}{T_1^3 \left( e^{\left(\frac{qV_{oc1}}{nkT_1}\right)} - 1 \right)} \quad (7)$$

A obtenção dos parâmetros  $I_{ph}$  e  $I_s$  através das equações 2 e 5, e as resistências  $R_s$  e  $R_p$ , através do Método de Newton-Raphson, permitem traçar as curvas características, do

painel fotovoltaico, para diferentes valores de irradiação solar e temperaturas.

## Modelo 2

O segundo modelo, apresentado neste trabalho, foi proposto por El-Tayyan (2006). Neste modelo, a relação entre a tensão (V) e a corrente (I) é dada por:

$$I = I_{sc} - C_1 e^{-\frac{V_{oc}}{C_2} \left( e^{\frac{V}{C_2}} - 1 \right)} \quad (8)$$

Onde as constantes  $C_1$  e  $C_2$  são obtidas através das seguintes equações:

$$C_1 = \frac{I_{sc} - I_m}{e^{\left(\frac{V_m - V_{oc}}{C_2}\right)}} \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{V_m - V_{oc}}{\ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right)} \quad (10)$$

## O Sistema Fotovoltaico

O sistema fotovoltaico (Figura 2), com dez painéis, foi montado na cidade de Medianeira, mais especificamente, nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O município está localizado na Região Oeste Paranaense com 25° 17' 43" latitude Sul, 54° 05' 38" longitude Oeste e apresenta uma altitude de 500,7 metros. Dez painéis fotovoltaicos foram instalados, mas somente dois foram utilizados neste trabalho.

**Figura 2 – Sistema fotovoltaico**



O posicionamento do conjunto fotovoltaico foi realizado por meio de uma haste vertical projetada sobre um plano horizontal, pela localização do norte geográfico utilizando o valor do meio-dia real (12 horas, 43 minutos, 44 segundos). O ângulo de inclinação do conjunto fotovoltaico em relação ao plano horizontal foi mantido constante e idêntico à latitude do local (GNOATTO, 2005).

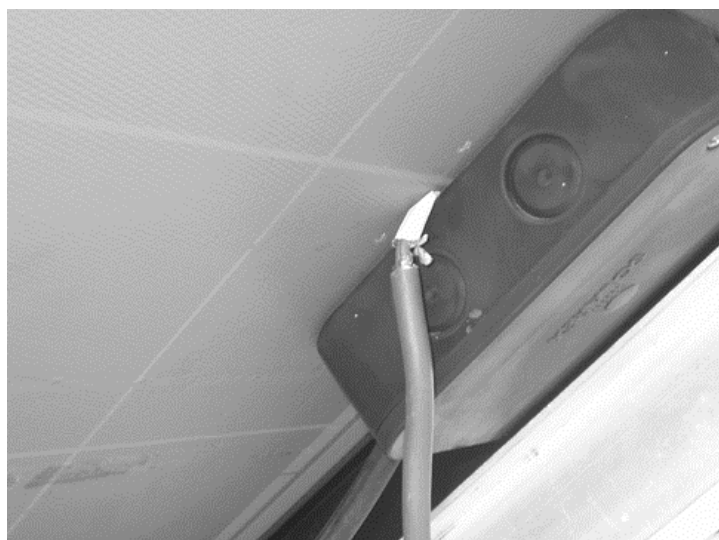
Para a montagem do sistema fotovoltaico foram necessários os seguintes equipamentos:

- Dois painéis solares, fabricante Solarex, modelo MSX 56, tensão padrão de 12 V, corrente padrão de 3,35 A e potência de 56 W;
- Um micrologger da marca CampbellScientific-INC, modelo CD23X;

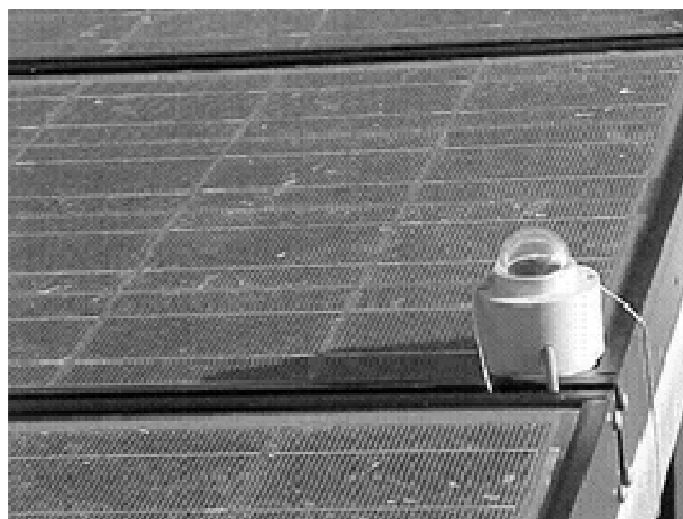
- Um termopar do tipo K (cromo/alumínio) aferido para a aquisição de dados;
- Um microcomputador;
- Um piranômetro Kipp&Zonen CM3.

Os dados utilizados na construção das curvas características do painel fotovoltaico são obtidos através da aplicação de uma carga variável ao painel (variando de curto-circuito a circuito aberto). Sendo que a corrente é medida através de um resistor de precisão ligado em série com a carga. A tensão na carga é obtida por medida direta em paralelo com a mesma e a temperatura através de um termopar, tipo K (Figura 3), acoplado diretamente ao painel. A radiação solar global foi obtida através de um piranômetro colocado na mesma inclinação do painel (Figura 4).

**Figura 3 – Localização do Termopar**



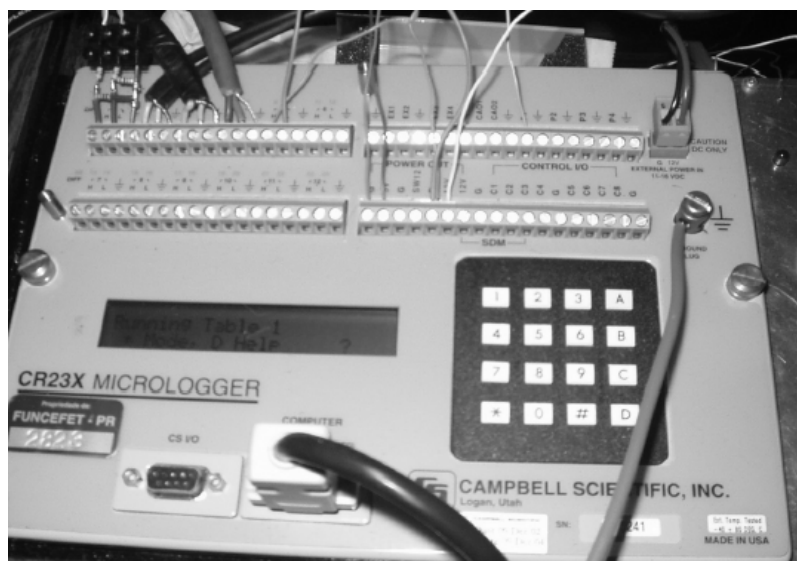
**Figura 4 – Piranômetro Kipp & Zonen**



Na aquisição, de dados, utilizou-se um datalogger da CAMPBELL SCIENTIFIC (Figura 5), programado para realizar leituras com frequência de 1Hz e armazenar a média aritmética a cada dez segundos. Os dados

para a plotagem da curva característica foram coletados em dia de céu limpo com irradiância de  $1000 \text{ W.m}^{-2}$  e, como carga, foi utilizado um resistor variável do tipo toroidal, marca ELETELE (  $25 \Omega$ , 100 W).

**Figura 5 – Datalogger da Campbell**



Os parâmetros de entrada do painel fotovoltaico, utilizados nos modelos, são obtidos dos catálogos de fabricantes de painéis fotovoltaicos. Os parâmetros mais importantes para descrever a performance elétrica da célula fotovoltaica são a corrente

de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) e a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ). Neste trabalho utilizou-se, como exemplo, o painel MSX-56 fabricado pela Solarex. Na Tabela 1 apresentam-se os parâmetros de entrada do modelo.

**Tabela 1 – Parâmetros de entrada**

Variável	Valor
$P_m$	56W
$V_m$	17,7V
$I_m$	3,16A
$I_{sc}$	3,46A
$V_{oc}$	21,2V
$\alpha$	$(0,065 \pm 0,015)\% / ^\circ C$
$\beta$	$-(80 \pm 20)mV / ^\circ C$
$\gamma$	$-(0,5 \pm 0,05)\% / ^\circ C$

Fonte: O autor.

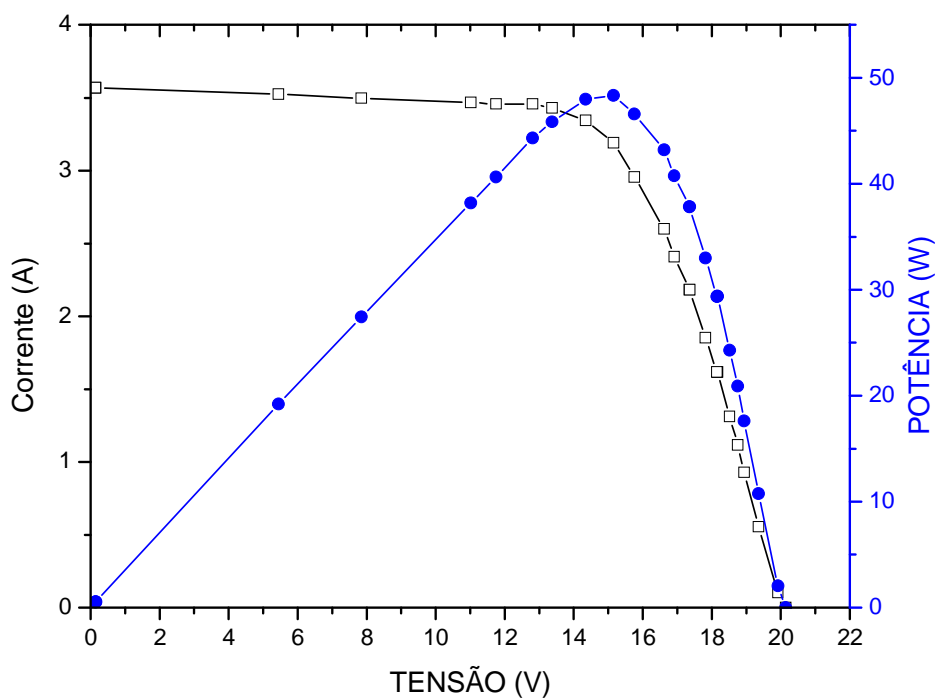
Onde  $P_m$  é a potência máxima;  $V_m$  e  $I_m$  são a tensão e a corrente de potência máxima;  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são os coeficiente de temperatura de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  e  $P_m$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

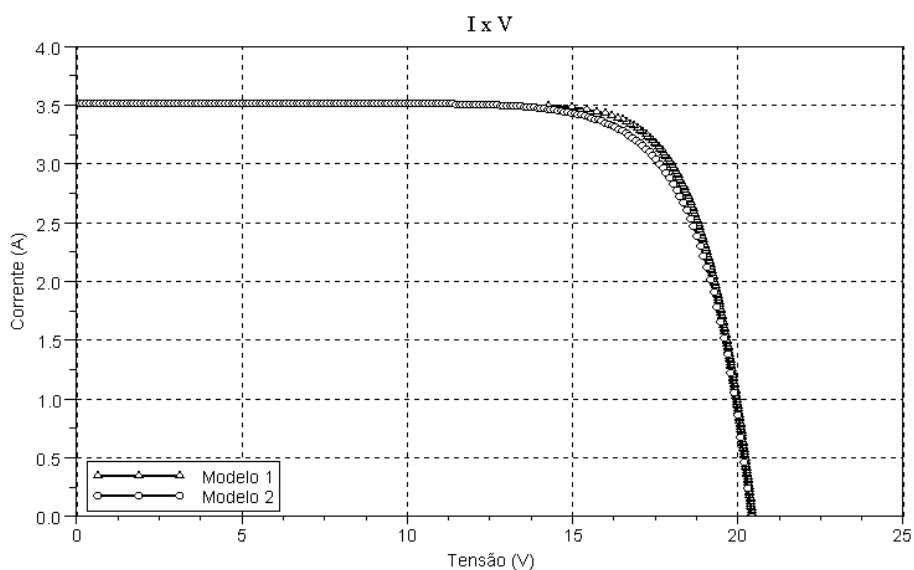
A Figura 6 apresenta as curvas I x V e P x V, obtidas de campo na cidade de Medianeira/PR, para  $T=35^{\circ}\text{C}$  e  $G=1000$

$\text{Wm}^{-2}$ . Nas Figuras 7 e 8 tem-se as curvas I x V e P x V, obtidas de simulação, através dos modelos matemáticos apresentados neste trabalho, para os mesmos valores de temperatura e irradiação solar.

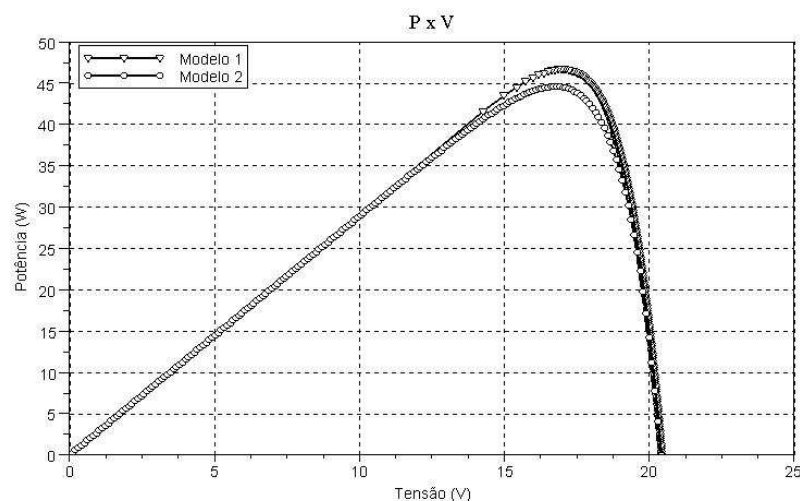
**Figura 6 – Curvas I x V e P x V**



**Figura 7 – Curva I x V - Simulação**



**Figura 8– Curva P x V - Simulação**



Observou-se, através dos gráficos das Figuras 6, 7 e 8, que existe uma boa concordância entre os valores obtidos de campo e de simulação para as curvas I x V. Sendo que a curva P x V do Modelo 1 tem uma maior aproximação com a curva de campo que a curva fornecida pelo Modelo 2.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho apresentaram-se resultados de campo e de simulação de um gerador fotovoltaico, de silício policristalino, da marca Solarex, modelo MSX-56. Concluiu-se que a diferença entre os valores obtidos de simulação e de campo, para as condições avaliadas, estão dentro de uma faixa de valores aceitáveis. Portanto, os dois modelos obtiveram curvas que representam de forma fiel o comportamento do painel fotovoltaico em estudo.

Observou-se, também, que a simulação pode ser utilizada na redução de custos, de projetos de sistemas fotovoltaicos, já que situações das mais diversas podem ser supostas e avaliadas.

## REFERÊNCIAS

ABADE, A. K. **Energia solar fotovoltaica no Brasil: projetos pilotos ou um grande**

**mercado?** In: **Congresso Brasileiro de Energia**, 7,1996. Rio de Janeiro. Anais...,UFRJ, 1996.

BARRETO, L. S. **Iniciação ao Scilab**. Lisboa: Edição do Autor, 2008.

BELARBI, M. **Modélisationet simulation d'un système de pompagephotovoltaïque**.Magister – Université des Sciences de la Technologie D'Oran, D'Oran, 2006

CARDONA, M. S. **Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system** **Energy**.New York: 1999.

CAMUS, C. **Gestão de Energia: energia solar**. Lisboa: Departamento de Engenharia Eletrotécnica e Automação, 2006.

CEPEL/CRESESB **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: 1999.

COSTA, S. H. **Modelo sustentável de difusão da tecnologia fotovoltaica para uso residencial**. In: Conferência Latino-Americana de Eletrificação Rura, 17, 1998. Recife. Anais..., 1998.

EL-TAYYAN A.**An Emperical model for generating the IV Characteristics for a photovoltaic System**.J. al-AqsaUniv: 2006.

GNOATTO, E. etall**Determinação da curva característica de um painel fotovoltaico em**



**condições reais de trabalho.** Acta Sci. Technol., Maringá: 2005.

MERTENS, R. P. **Physics, technology and use of photovoltaics.** London: Modern Energy Studies, 1996.

NAWATA, Y. **Prediction of photovoltaic (PV) power output considering weather effects.** Colorado: Solar, 2006.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas.** São Paulo: Hemus, 1995.

RIBEIRO, T B. **S.A eletrificação rural com sistemas individuais de geração com fontes intermitentes em comunidades tradicionais:**

**caracterização dos entraves para o desenvolvimento local.** Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia), São Paulo: USP, 2010.

SERPA, P. **Eletrificação Fotovoltaica em Comunidades Caiçaras e seus Impactos Socioculturais. Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo.** Tese de Doutorado. São Paulo: USP, 2001.

TREBLE, F. C. (1991) **Generating electricity from the sun.** New York: Pergamon Press, 1991.