



**GRUPO II**  
**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT**

**A EXPERIÊNCIA DE DOIS ANOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE DO CEPEL**

**Marco Antonio Galdino \***  
**CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica**

**RESUMO**

O presente informe técnico descreve a experiência do CEPEL na operação de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, em sua sede na Ilha do Fundão (Rio de Janeiro, RJ) por um período de aproximadamente dois anos. Este sistema foi instalado em dezembro de 2002 e o trabalho apresenta uma análise de seu desempenho, comparando-o com outros do Brasil e de outros locais do Mundo. Os resultados obtidos demonstram que a tecnologia é totalmente operacional e bastante confiável, porém a viabilidade econômica deste tipo de sistema ainda está longe de ser alcançada, apesar dos países desenvolvidos estarem investindo maciçamente neste tipo de tecnologia, numa visão a longo prazo.

**PALAVRAS-CHAVE**

Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede; Sistemas Fotovoltaicos; Energia Solar Fotovoltaica;

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (*grid-connected PV systems, grid-tied PV systems*) constituem a aplicação de energia solar fotovoltaica que vem apresentando a maior taxa de crescimento anual no mundo. Segundo publicações (1) (2) da Agência Internacional de Energia (IEA – *International Energy Agency*) datadas de 2004 e referentes somente a seus países membros<sup>(1)</sup>, mais de 77% da potência de pico fotovoltaica total instalada nestes países já é conectada à rede, perfazendo um valor de 1401.7MWp (dentro de um total de 1808.9MWp) e suplantando todas as demais aplicações terrestres da tecnologia fotovoltaica reunidas, o que já vem ocorrendo desde 1999.

A Figura 1 abaixo apresenta um gráfico do crescimento no período 1998-2003 da potência instalada de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em 5 países selecionados (JP- Japão, AL – Alemanha; EU – Estados Unidos; HL – Holanda; SU – Suíça), também segundo dados da Agência Internacional de Energia.

Os dados da IEA também indicam que desde 1997 o crescimento médio anual da potência FV instalada conectada à rede tem sido superior a 30% no conjunto de seus países membros. Os dados ainda mostram que, no ano de 2003, 90% da potência fotovoltaica instalada no mundo foi conectada à rede.

Este significativo crescimento, porém, tem sido localizado basicamente nos países desenvolvidos e é alavancado principalmente pelos grandes programas governamentais do Japão, da Alemanha e dos EUA, que, juntos, detêm 85% da potência fotovoltaica instalada, além de outros países, como Holanda, Suíça, Itália e Espanha. Estes e outros países aplicam inúmeras formas de subsídios e incentivos para a energia solar fotovoltaica.

Entendemos que estes fatos representam uma importante mudança de paradigma, pois até bem recentemente a maioria dos especialistas acreditava que a principal aplicação dos sistemas fotovoltaicos seria sob forma de sistemas autônomos, para a eletrificação rural e o atendimento a cargas em locais isolados, distantes da rede elétrica convencional

<sup>1</sup> Países importantes no cenário mundial das energias renováveis, como Índia e China, não são contabilizados nos dados da IEA.

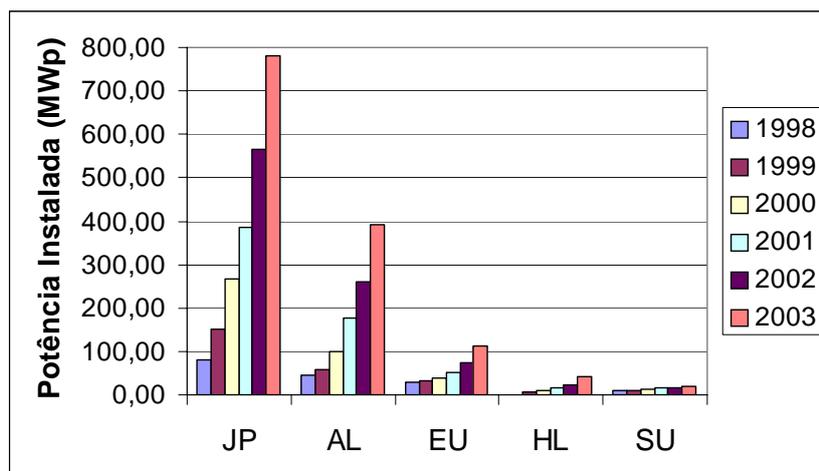


FIGURA 1 – potência FV conectada à rede 1998-2003 (JP-Japão; AL-Alemanha; EU-Estados Unidos; HL-Holanda; SU-Suíça)

Contudo, apesar do já mencionado acentuado crescimento verificado nos últimos anos, a instalação dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede realmente em larga escala e com impacto na matriz energética nacional ainda não foi alcançada em nenhuma nação. Todavia, caso a atual tendência de crescimento se mantenha, isto irá acontecer a médio prazo. A Tabela 1 abaixo transcreve uma previsão apresentada em um relatório da Comunidade Européia (9), datado de 2003, bastante otimista neste sentido, segundo a qual, já no ano de 2010 o mundo terá um total de 25GWp de potência fotovoltaica instalada.

TABELA 1 – Previsão de evolução da capacidade de geração fotovoltaica (MWp)

Área\Ano	2010	2020	2030
EUA	3000	15000	25000
Europa	3000	15000	30000
Japão	5000	30000	72000
Restante do Mundo	14000	70000	140000

## 2.0 - EXPERIÊNCIA BRASILEIRA

O primeiro sistema fotovoltaico conectado à rede do Brasil foi instalado em 1995 pela CHESF em sua sede no Recife. Este sistema pioneiro encontra-se atualmente desativado, mas existem planos na empresa para sua reativação.

A Tabela 2 apresenta algumas informações sobre os sistemas conectados à rede de que temos conhecimento atualmente em operação no Brasil (6).

TABELA 2 – Sistemas conectados à rede no Brasil

Local	Instituição	Potência/ Tecnologia	Tecnologia	Instalação
Recife - PE	CHESF	11kWp	multi-Si	1995
Florianópolis - SC	UFSC – LabSolar	2kWp	a-Si	1997
São Paulo – SP	LSF/ IEE-USP	0.7kWp	mono-Si	1998
Rio de Janeiro - RJ	UFRJ	0.85kWp	mono-Si	1999
Florianópolis - SC	UFSC – LabSolar	1kWp	a-Si	2000
São Paulo – SP	LSF/ IEE-USP	6kWp	multi-Si	2001
Rio de Janeiro – RJ	CEPEL	16.3kWp	mono-Si	2002
São Paulo – SP	LSF/ IEE-USP	6kWp	nd	2004

Além destes sistemas em operação, vários outros sistemas estão em projeto ou em vias de instalação, por exemplo, nas seguintes instituições: UFRGS (Porto Alegre – RS), CEMIG (Belo Horizonte – MG) e CENPES/Petrobrás (Rio de Janeiro – RJ).

Todos estes sistemas destinam-se a demonstração, pesquisa e aprendizado, perfazendo em conjunto uma potência total de somente cerca de 44kWp. Não existem ainda instalações comerciais no Brasil, exemplo das que

estão proliferado nos países desenvolvidos. Na verdade, o País não tem ainda uma regulamentação técnica e comercial para este tipo de sistema.

### 3.0 - O SISTEMA DO CEPEL

O sistema do CEPEL tem potência nominal de 16.32kWp e foi instalado em dezembro/2002 sobre o telhado de um dos prédios (Bloco J) do laboratório principal na Ilha do Fundão, injetando energia na rede de baixa tensão de 220Vac.

O sistema é constituído pelos seguintes equipamentos:

- 204 módulos fotovoltaicos de Silício monocristalino BP580F (80Wp; Voc=22V; Isc=4.7A), associados 17 módulos em série e 12 em paralelo.
- 6 inversores SMA Sunny Boy SWR 2500U (2500W, 220Vca), conectados em  $\Delta$ ;
- Sistema de monitoração (aquisição de dados) baseado em um computador do tipo PC dedicado, com software desenvolvido em ambiente MS-Windows 98, para medição em tempo real de parâmetros operacionais;
- estruturas de fixação, sistema de proteção elétrica, etc.

Para obtenção de maiores detalhes acerca dos equipamentos e de sua instalação, sugerimos a consulta à referência (4).

Apesar da pequena potência do sistema do CEPEL (~16kWp), principalmente se comparado com os sistemas instalados no exterior, este sistema é o maior sistema fotovoltaico conectado à rede em operação atualmente no Brasil. A Figura 2 abaixo apresenta uma vista do sistema.



FIGURA 2 – vista geral da instalação

### 4.0 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DO CEPEL

Com o conhecimento das características dos componentes (inversor e módulo fotovoltaico), foi feita uma simulação computacional, numa tentativa de prever o desempenho *a priori* da instalação do sistema.

A simulação baseou-se em modelos computacionais simplificados para os componentes, semelhantes aos já utilizados no CEPEL em outros trabalhos (7). A simulação foi alimentada com um ano de dados reais de radiação solar (radiação solar global no plano horizontal – valores médios em intervalos de 10min) e temperatura ambiente, medidos por uma estação meteorológica do CEPEL, dotada de piranômetro.

TABELA 3 – previsão inicial da geração

mês	energia (kWh)
jan	1901.1
fev	2108.0
mar	1740.7
abr	1392.3
mai	1257.7
jun	1072.4
jul	1223.3
ago	1536.4
set	1374.1
out	1921.2
nov	1682.4
dez	2234.6
<b>total</b>	<b>19444.3</b>

Os resultados obtidos neste trabalho são apresentados na Tabela 3, onde se verifica que foi previsto um total de geração anual de cerca de 19.5MWh. Este resultado foi considerado preliminar e tomado como um limite inferior para o desempenho do sistema, face às simplificações adotadas nos modelos.

O sistema fotovoltaico foi instalado em dez/2002, mas o sistema de monitoração foi instalado somente em mar/2003. Todo o sistema foi considerado em operação experimental até mai/2003, sendo que neste período foram necessários diversos desligamentos para mudanças ou manutenção. Além disso, foram verificados diversos problemas técnicos no sistema de aquisição de dados.

Como resultado, no presente, apesar do sistema estar em operação há mais de 24 meses, dispomos de apenas 16 meses (não contínuos) de dados confiáveis acerca do desempenho do sistema.

Os dados medidos disponíveis de geração de energia (kWh/mês) são apresentados na Tabela 4 abaixo, na cor preta. Já os dados calculados para os 8 meses faltantes (jan/03, fev/03, mar/03, abr/03, nov/03, dez/03, jan/04, fev/04) são apresentados nesta tabela na cor vermelha. A inspeção das Tabelas 3 e 4 demonstra que a previsão da geração foi subestimada.

TABELA 4 – Geração de energia (kWh)

	<b>2003</b>	<b>2004</b>
jan	2114.9	2120.9
fev	1885.2	1657.9
mar	1891.1	2094.3
abr	1745.1	1712.8
mai	1722.8	1327.5
jun	1509.6	1445.0
jul	1540.8	1409.5
ago	1654.2	1782.5
set	1634.7	1830.0
out	2049.4	1601.2
nov	1864.9	1782.4
dez	1814.7	1903.1
<b>total</b>	<b>21427.5</b>	<b>20667.2</b>

Para o cálculo da previsão da geração dos meses faltantes, traçou-se, com base no conjunto de dados confiáveis disponíveis, o gráfico apresentado na Figura 3 abaixo, que representa a curva característica do sistema, relacionando a energia solar diária com a geração diária do sistema.

A partir deste gráfico, pode-se obter por regressão a equação da curva de geração do sistema (kWh/dia) em função da radiação global diária no plano horizontal (kWh/m<sup>2</sup>.dia), também mostrada na Figura 3, que é a Equação [1] abaixo.

$$G = -1.1304x^2 + 22.4538x - 9.2749 \quad [1]$$

Onde:

G – energia diária gerada pelo sistema fotovoltaico (kWh/dia);  
x – radiação solar global diária no plano horizontal (kWh/m<sup>2</sup>.dia).

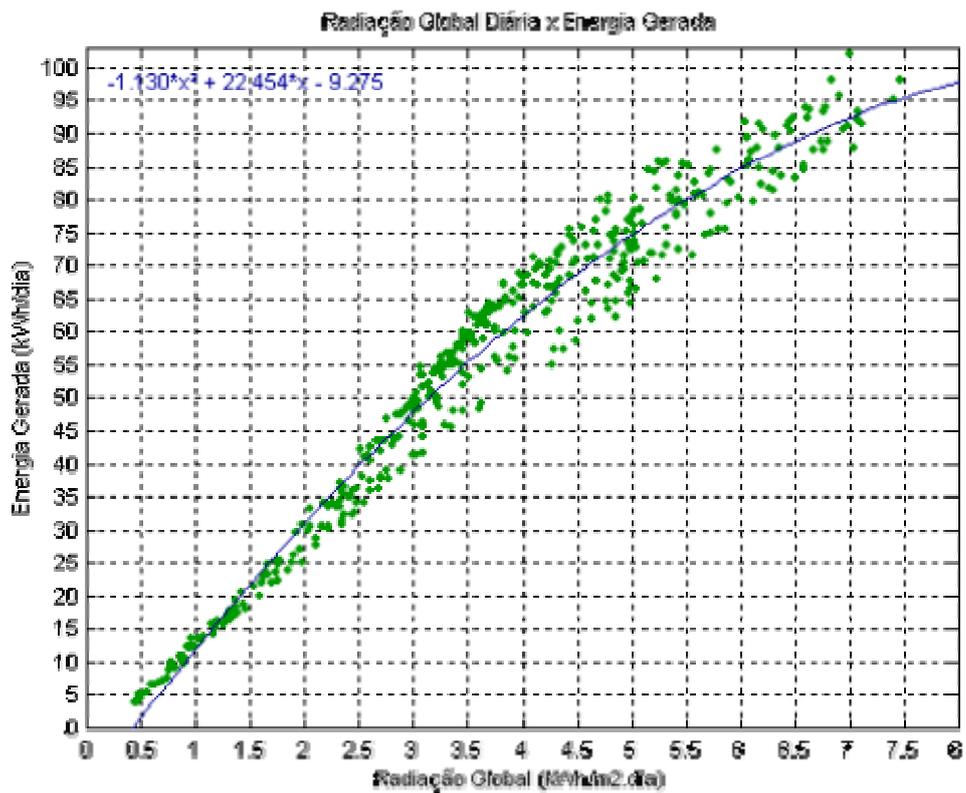


FIGURA 3 – Curva ajustada aos dados disponíveis

Aplicando a Equação [1] assim obtida aos dados de radiação solar dos 8 meses faltantes, obtém-se os valores (em vermelho) apresentados na Tabela 4.

Aplicando também a Equação [1] aos mesmos dados de entrada utilizados na simulação inicial, obtém-se como resultado uma nova previsão de geração, significativamente mais realista, mostrada na Tabela 5. A comparação entre a previsão inicial e esta nova esta previsão mostra que aquela está subestimada em cerca de 12.8%, no total anual.

TABELA 5 – nova previsão da geração (kWh)

mês	energia
jan	2110.3
fev	2284.2
mar	1976.3
abr	1630.0
mai	1484.0
jun	1269.9
jul	1451.8
ago	1766.0
set	1565.1
out	2128.6
nov	1860.1
dez	2402.3
<b>total</b>	<b>21928.7</b>

A análise dos dados da Tabela 4 mostra uma excelente concordância entre os totais de geração anual para os anos de 2003 e 2004, que apresentam um desvio de 3.6%, apesar do ano de 2004 ter sido considerado atípico em relação ao clima. Além disso, a previsão da Tabela 5 e o valor médio da geração anual da Tabela 4 têm desvio de 4.2%, demonstrando uma boa consistência nos dados apresentados.

A análise dos dados da Tabela 4 fornece os seguintes indicadores de desempenho (consideram-se as médias entre os anos de 2003 e 2004):

- O sistema gera anualmente um total de 21047.3kWh;
- A geração média diária é de 57.6kWh/dia;
- O fator de capacidade (*cf – capacity factor*), definido pela Equação [2] abaixo, é a razão entre a energia gerada em determinado período (kWh) e a energia que seria efetivamente gerada se o sistema operasse durante a totalidade deste período em sua potência nominal, ou seja se fosse energia firme. O fator de capacidade anual do sistema do CEPEL é de 14.7%;

$$cf_{anual} = \frac{kWh_{ano}}{kWp * 8760h} \quad [2]$$

- A energia específica (*yf – final yield, annual yield*), definida pela Equação [3] abaixo, expressa a energia em kWh gerada anualmente (ou mensalmente) por unidade de potência fotovoltaica instalada, em kWp, podendo ser também entendida como o número de horas equivalente de operação anual (ou mensal) em potência nominal. A energia específica do sistema do CEPEL é de 1289.7kWh/kWp.

$$yf_{anual} = \frac{kWh_{ano}}{kWp} \quad [3]$$

## 5.0 - ANÁLISE ECONÔMICA SIMPLIFICADA

O impacto do sistema fotovoltaico na demanda do CEPEL pode ser considerado desprezível, bem como energia gerada por ele no horário de ponta. Assim, numa análise econômica pode-se considerar que a energia gerada por este sistema proporciona ao CEPEL apenas uma economia de energia no horário fora de ponta.

Sabendo-se que o consumo fora de ponta do CEPEL no ano de 2004 foi de aproximadamente 3.12GWh, constata-se que a geração fotovoltaica de 20667.2kWh proporciona uma redução de consumo irrisória, de aproximadamente 0.66%. Além disso, ele não gera nenhum excedente de energia para a rede pública.

Uma análise econômica simplificada indica que:

- Considerando-se as tarifas mensais de energia elétrica pagas pelo CEPEL<sup>(2)</sup> no ano de 2004 e os valores das energias geradas mensalmente da tabela IV, o valor da energia gerada pelo sistema fotovoltaico neste ano foi de apenas R\$2795.07 (US\$960.79<sup>(3)</sup>); Com esta economia anual o investimento inicial no sistema não será pago (*payback* simples) durante a sua vida útil, estimada em 30 anos, mesmo sem levar em conta uma análise econômica detalhada (taxa de juros, correções financeiras, depreciação, custos de manutenção, etc).
- Por outro lado, considerando-se as tarifas pagas por um consumidor residencial<sup>(4)</sup> do Rio de Janeiro em 2004, o valor anual da energia gerada seria de R\$9129.45 (US\$3137.02), de forma que o custo inicial do sistema seria pago (*payback* simples) num período aproximadamente igual à sua vida útil, de 30 anos, ainda sem as demais considerações econômicas necessárias.

Com base nesta fundamentação, pode-se, portanto, afirmar que os sistemas fotovoltaicos conectados à rede não são economicamente viáveis no Brasil, considerando os atuais custos dos equipamentos e os custos da energia convencional.

## 6.0 - COMPARAÇÃO COM O DESEMPENHO DE OUTROS SISTEMAS

O fator de capacidade - cf (ou qualquer dos outros indicadores de desempenho) dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede varia em função de diversos parâmetros, sendo os principais:

- a latitude do local da instalação;
- parâmetros climáticos, tais como nebulosidade, temperatura ambiente, etc.
- tecnologia dos módulos fotovoltaicos;

<sup>2</sup> O CEPEL está enquadrado na tarifa horo-sazonal azul (Grupo A4 – 13.8kV). No cálculo leva-se em conta somente o custo do kWh fora de ponta a cada mês (a geração do sistema fotovoltaico nos horários de ponta e seu impacto na demanda do CEPEL são desprezíveis), incluindo o ICMS (30% no Rio de Janeiro).

<sup>3</sup> Para o cálculo do valor da energia em dólares foram usadas as cotações médias mensais de fechamento da venda, calculadas com base em valores publicados pelo Banco Central.

<sup>4</sup> tarifa B1, Light – RJ, incluindo ICMS (30% no Rio de Janeiro).

- detalhes de instalação do painel fotovoltaico, como orientação, inclinação e sombreamento.

Os fatores de capacidade para alguns locais do Brasil são apresentados na Tabela 6 (6) abaixo, para painéis fotovoltaicos instalados na inclinação e orientação otimizadas. Os valores de cf de 14.5% e 19% correspondem, respectivamente a energias específicas de aproximadamente 1270kWh/kWp e 1664kWh/kWp.

Por inspeção da Tabela VI, constata-se que o valor medido do cf no sistema do CEPEL (14.7%) é próximo aos demais valores para a Região Sul/Sudeste e inferior aos da Região Norte/Nordeste, conforme esperado.

TABELA 6 – fatores de capacidade para o Brasil

Local	cf (%)
Porto Alegre - RS	14.5
São Paulo - SP	15.0
Recife - PE	19.0
Manaus - AM	16.5

Já a Tabela 7 a seguir mostra alguns dados de energia específica yf (kWh/kWp) produzida por sistemas fotovoltaicos conectados à rede em operação nos países líderes mundiais desta tecnologia.

TABELA 7 – energia específica em alguns países <sup>(5)</sup>

País	Local	kWh/kWp	Observação
Japão	-	1010 (1999) 990 (2000)	produção média de 85 sistemas monitorados no período 1999-2000 (7)
Alemanha	-	700-800 (Norte) 800-900 (Centro) 900-1000 (Sul)	dados e estimativas de vários autores
Suíça	-	790	produção média de 51 sistemas monitorados no período de 1990-2000 (8)
Itália		864	produção média de 7 sistemas monitorados no período de 1987-2000 (9)

Estes dados comprovam a vantagem do Brasil em relação aos países desenvolvidos no aproveitamento da energia solar fotovoltaica conectada à rede, decorrente da localização de nosso país na área tropical, onde anualmente incide muito maior insolação do que na área temperada, onde se localizam os países desenvolvidos.

Conforme a Tabela VII, o sistema do CEPEL gera aproximadamente 63% mais do que a média dos sistemas na Suíça, e cerca de 28% mais do que a média no Japão.

## 7.0 - CONCLUSÃO

No presente artigo são apresentados os dados disponíveis de desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede do CEPEL durante 2 anos de operação, durante os anos de 2003 e 2004.

O sistema do CEPEL operou conforme o esperado e produziu anualmente cerca de 21047kWh, sem que tenha apresentado defeitos ou requerido manutenção. Contudo, uma análise econômica simplificada demonstra que tais sistemas ainda não são economicamente viáveis no Brasil, em função dos custos dos equipamentos e da energia, apesar da expressiva vantagem que nosso país tem no aproveitamento da energia solar fotovoltaica.

Na verdade, a viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede não foi alcançada em nenhum lugar do mundo e ainda depende de alguma forma de incentivo, como os que tem sido aplicados em larga escala nos países desenvolvidos. Ela só irá ocorrer no futuro com a redução do custo dos sistemas e/ou o aumento do custo de energia.

Os incentivos destes países representam uma visão estratégica a longo prazo, resultante de preocupações com o meio-ambiente e com o esgotamento de outras fontes energéticas.

<sup>5</sup> Os dados de monitoração de sistemas do Japão e da Suíça incluem sistemas com painéis fotovoltaicos instalados em fachadas e outros elementos arquitetônicos, os quais, estando fora da inclinação e orientação ótimas e, muitas vezes, sujeitos a sombreamento, tem geração inferior e reduzem as médias.

Acreditamos que o Brasil necessita de ampla discussão envolvendo governo, concessionárias, universidades, centros de pesquisa, etc. no sentido de definir uma estratégia de longo prazo para a energia solar fotovoltaica conectada à rede no país, pois provavelmente em algum momento do futuro chegará o instante de sua implantação em larga escala.

#### 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) - IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; PVPS – PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME; Trends in Photovoltaic Applications – Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2003; Report IEA-PVPS T1-13:2004; September 2004.
- (2) - IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; PVPS – PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME; Annual Report 2003 – Implementing Agreement on Photovoltaic Power Systems.
- (3) - IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; PVPS – PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME; Operational Performance, Reliability and Promotion of Photovoltaic Systems – Proceedings of October 2001 Workshop; Report IEA-PVPS T2-03:2002.
- (4) – GALDINO, MARCO A.; Implantação de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede no CEPEL; XVII SNPTEE – Simpósio Nacional de Produção e Transmissão de energia Elétrica; Uberlândia- MG; 19-24 de outubro de 2003.
- (5) – SOARES, GEORGE A.; GALDINO, MARCO A.; LIMA, JORGE H.; DE MEDEIROS, MARCUS B.; Otimização de Sistemas de Bombeamento Solar; XVI SNPTEE – Simpósio Nacional de Produção e Transmissão de energia Elétrica; Campinas- SP; 21-26 de outubro de 2001.
- (6) – ZILLES, ROBERTO; MACÊDO, WILSON N.; Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações; curso ministrado no rio de janeiro em 8-9 de julho de 2004.
- (7) – OTANI, KENJI; SAKUTA, KOICHI; SUGIURA, TADAOSHI; KUOKAWA, KOSUKE; Performance Analysis and Simulation on 100 Japanese Residential grid connected PV systems Bases on Four Year Experience; 17th European Photovoltaic Solar energy Conference; 11-26 October 2001; Munich; Germany.
- (8) – CLAVADETSCHER, LUZI; NOREMANN, THOMAS; Experiences from Long Term PV Monitoring in Switzerland; artigo contido na referência (3).
- (9) – CASTELLO, SALVATORE; GUASTELLA, SALVATORE; GUERRA, MICHELLE; Large PV Systems in Italy; artigo contido na referência (3).
- (10) – EUROPEAN COMISSION; JOINT RESEARCH CENTRE, RENEWABLE ENERGIES UNIT (ISPRA); PV Status Repot 2003; Research, Solar Cell Production and Market Implementation in Japan, USA and the European Union; September 2003.