



ANÁLISE DO CUSTO DE INSTALAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS

Karen J. Oliveira

J. M. M. Gurgel

Z. E. da Silva

Universidade Federal da Paraíba – UFPB

LES – Laboratório de Energia Solar

Caixa Postal 5115 - Cep. 58051-970

João Pessoa - Paraíba – Brasil

karen@les.ufpb.br

Resumo - Nas últimas décadas, os sistemas fotovoltaicos alcançam aproximadamente 500 MW de potência instalada enquanto que os custos reais destas instalações diminuíram significativamente como resultado do surgimento de novas tecnologias de fabricação dos componentes básicos destas instalações. A alta qualidade e a vida útil dos módulos fez com que a confiabilidade em tais sistemas aumentasse. Por outro lado, as aplicações denominadas isoladas continuam a dominar o mercado, em particular em lugares remotos, como por exemplo: bombeamento de água e alimentação de cargas de baixo consumo. Nos dias atuais, pode afirmar que não existem razões técnicas que impeçam o uso de sistemas fotovoltaicos não importa a carga, seja qual for o tipo de corrente que ela necessite. Este trabalho faz uma análise dos custos reais para instalação de um sistema fotovoltaico residencial isolado.

Palavras-chave: Células fotovoltaicas, custos, sistemas isolados, dimensionamento.

1. INTRODUÇÃO

O efeito fotovoltaico é um recurso de alta tecnologia na conversão de luz solar diretamente em energia elétrica, visando alimentar os diversos tipos de carga, sejam elas acionadas por corrente contínua (cc) ou corrente alternada (ca). A tecnologia fotovoltaica vem sendo usada, em muitas aplicações seja em sistemas híbridos, conectados à rede elétrica ou isolados. Os sistemas isolados são predominantes principalmente quando se trata de locais remotos, ou até mesmo para consumidores que residem em áreas urbanas mas possuem recurso financeiro para “escolher” o tipo de sistema que deseja utilizar. É importante ressaltar que a adoção da tecnologia fotovoltaica como alternativa, para a gerar energia elétrica, requer um estudo da energia solar disponível na região (o nível de insolação da região) e de um estudo sobre a possibilidade de extensão da rede elétrica convencional até o local onde se deseja utilizar a eletricidade.

Um problema significativo é criado quando os custos de um sistema conectado à rede são erroneamente aplicados aos sistemas isolados ou híbridos. Os sistemas isolados ou híbridos necessitam de outros componentes tais como baterias, geradores de apoio, assim como sistemas de controle. Os custos destes componentes aumentam o custo global do sistema fotovoltaico, por exemplo, em

residências onde a energia elétrica é exclusivamente fornecida através de sistema fotovoltaico, a bateria e outros componentes de controle são indispensáveis.

No final da década 70 e início da década de 80, um estudo feito nos Estados Unidos, paralelo ao programa de incentivo ao uso de sistemas fotovoltaicos em diversas regiões do país, constatou que o custo com estes equipamentos (incluindo preparação do local, fundações, estrutura, instalação elétrica e preparação do sistema) representam dois terços do custo total de aquisição de equipamentos de um sistema fotovoltaico, ou seja, cerca de 67% do valor total, para sistemas que utilizavam coletores do tipo placa plana. Atualmente, estes dados não apresentam valores muito diferentes. Ou seja, em alguns casos, pode tornar-se possível a minimização de alguns custos que não estão ligados diretamente aos equipamentos fotovoltaicos como, por exemplo, o tipo de fundação, a escolha do material, mão-de-obra de instalação, etc. .

Este trabalho se propõe a análise dos custos de uma mini-planta de conversão de energia solar em energia elétrica para suprir as necessidades básicas de energia de uma residência para uma família de 04(quatro) pessoas. O estudo explicita a matriz de custo de uma planta e explicita a participação de cada componente no custo total do sistema.

2. COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA SOLAR

Uma planta básica para conversão de energia solar em energia elétrica é composta dos seguintes elementos físicos e construtivos :

- ✓ radiação solar - a radiação solar é uma forma energia emitida pelo sol devido a sua temperatura. Portanto, a radiação é o "combustível" de um sistema de potência solar;
- ✓ módulo fotovoltaico - o módulo é composto de várias células fotovoltaica interligadas;
- ✓ regulador de carga - é elo de ligação entre o módulo, bateria e equipamentos. Ele protege a bateria de sobrecargas ou de descarga excessiva;
- ✓ inversor ou conversor - esse elemento é responsável pela conversão de corrente contínua (CC) gerada pelo módulo fotovoltaico em corrente alternada (AC);
- ✓ bateria - É o elemento responsável pela estocagem da energia gerada pelo módulo solar;
- ✓ estrutura de montagem – é o suporte de fixação do módulo em seu local de funcionamento.

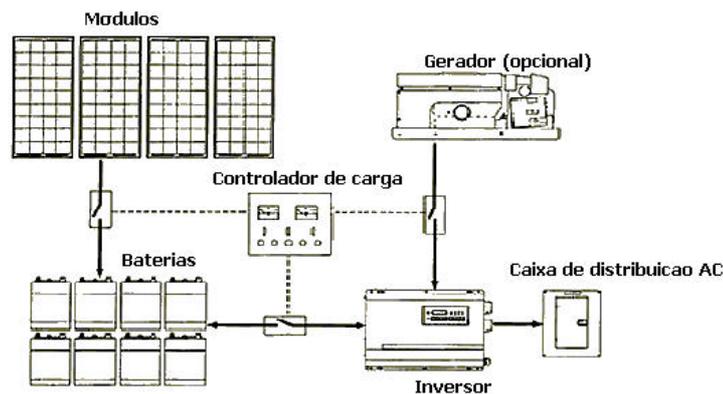


Figura 1 – Elementos físicos de uma planta de conversão de energia solar em elétrica

3 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO

A planta de conversão fotovoltaica é prevista para atender as necessidades energéticas de uma residência de cinco cômodos cuja família é composta de 04 (quatro) pessoas sendo dois adultos e duas crianças. A residência localiza-se em uma região remota do sertão da Paraíba a qual não dispõe de rede

elétrica convencional porém a insolação é suficiente para permitir a conversão da energia solar via efeito fotovoltaico. Além disso, considera-se que pelo menos um adulto e as duas crianças se ausentam da residência por no mínimo um expediente durante o dia, o que racionaliza o uso dos eletrodomésticos. A corrente que deverá ser produzida pelo sistema fotovoltaico deve ser suficiente para alimentar os seguintes eletrodomésticos:

- ✓ Geladeira 220 L
- ✓ TV a cores 20"
- ✓ Aparelho de som
- ✓ Lâmpadas fluorescentes
- ✓ Receptor de antena parabólica

O conjunto de painéis deve ser montado numa fundação de blocos de concreto à distância de 100 m da casa. Esta configuração permite que os módulos sejam orientados na direção adequada, evitando danos devido a ventos fortes indesejáveis associados à montagem no telhado. Devido à distância que a fiação vai percorrer, condutores de alumínio minimizariam os custos. Os condutores podem ser instalados por baixo da terra através de condutos metálicos, e conectados usando-se plugs apropriados para fiação de alumínio. O quadro de distribuição elétrica central, que distribui a energia para o circuito residencial, deve permitir um pronto acesso. Todo o equipamento deve ser aterrado de acordo com as normas de instalação elétrica. O circuito deve ser protegido por chaves de segurança, podendo ser então facilmente isolado para manutenção.

4. DIMENSIONAMENTO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Para dimensionar uma planta de conversão, o primeiro passo é conhecer a carga diária que ela irá suprir. A carga diária deve incluir qualquer equipamento que irá utilizar eletricidade dessa fonte geradora (lâmpadas, televisores, rádios ou baterias). Algumas cargas precisam de eletricidade todo o tempo, tais como refrigeradores, enquanto que outros usam com menos frequência, como serras elétricas, por exemplo. Para se estimar a carga total, multiplique a potência encontrada (seu consumo em watts) pelo número de horas que você irá utilizar por dia. Entretanto, alguns eletrodomésticos não fornecem seu consumo, porém pode-se calcular o consumo multiplicando a corrente consumida pela voltagem (ampères x volts).

4.1. Consumo Diário da Carga

O consumo diário das cargas define o tamanho do sistema em relação à potência que ele deve gerar ou seja, número de módulos fotovoltaicos, número de baterias, número de controladores de carga e os equipamentos de balanço-de-sistema (cabos, fiação, interruptores, chaves e fusíveis).

Tabela 1 - Consumo diário da carga

	Corrente do sistema (A)	Tensão da carga (V)	Potência da carga CA (W)	ciclo diário h/dia	Ciclo semanal	eficiência de convenção	tensão nominal do sistema (V)	consumo Ah/dia
Geladeira	1,81	× 110	= 200	× 16	× 7÷7	÷ 0,80	÷ 24	= 166,7
TV a cores 20"	1,81	× 110	= 200	x 6	x 7÷7	÷ 0,80	÷ 24	= 62,5

Lâmpada fluorescente	0,91	x	110	=	100	x	4	x	$7 \div 7$	\div	0,80	\div	24	=	20,8
Aparelho AM/FM/CD	0,90	x	110		100	x	4	x	$7 \div 7$	\div	0,80	\div	24	=	20,8
Receptor de parabólica	0,54	x	110		60	x	6	x	$7 \div 7$	\div	0,80	\div	24	=	18,7
Potência Total das Cargas CA	660	Consumo total (Ah/dia)			289,50										

Tabela 2 – Cálculo do Consumo Corrigido

Potência total das cargas CA (W)	Tensão Nominal do Sistema (V)	Estimativa da corrente de pico (A)	Consumo total A-h (Ah/dia)	Fator de eficiência da fiação (dec.)	Fator de eficiência da bateria (dec.)	Consumo A-h Corrigido (Ah/dia)
660	\div 24	= 27,5	289,50	\div 0,98	\div 0,95	= 310,96

4.2. Determinação da Corrente e do Ângulo de Inclinação do Arranjo

A determinação da corrente de projeto é o segundo item para a seleção do equipamento. Aqui foi introduzida uma variável chamada Sol Pleno, dada em horas por dia (h/dia) e significa a quantidade de horas por dia em que se tem grande incidência de irradiação solar. Esses dados foram coletados no Laboratório de Energia Solar (LES) da Universidade Federal da Paraíba e correspondem à média de 10 anos de coleta de dados. A partir daí, calcula-se a corrente de projeto, que corresponde àquela fornecida pelo módulo no mês de menor quantidade de horas de Sol Pleno, como também a corrente máxima de projeto, correspondente àquela fornecida no mês de maior quantidade de Sol Pleno. As tabelas referentes ao dimensionamento foram consultadas no Stand-Alone Photovoltaics Systems-a handbook of recommended design practices, Sandia National Laboratories (1991).

Tabela 3 – Determinação da corrente e do ângulo de inclinação do arranjo

Localização do Sistema		Paraíba			
Latitude - 7° 8'		Longitude 35° 50'			
M	Carga Corrigida (Ah/dia)	Sol Pleno (h/dia)	Corrente de Projeto (A)		
Ê					
S					
I	310,96	\div 6,54	=	47,55	
F	310,96	\div 6,22	=	49,99	
M	310,96	\div 5,60	=	55,53	
A	310,96	\div 5,40	=	57,58	
M	310,96	\div 4,89	=	63,59	
J	310,96	\div 4,56	=	68,19	
J	310,96	\div 4,52	=	68,79	
A	310,96	\div 5,25	=	59,23	
S	310,96	\div 6,10	=	50,98	
O	310,96	\div 6,70	=	46,41	
N	310,96	\div 6,60	=	47,11	
D	310,96	\div 6,43	=	48,36	

sol pleno (h/dia)	corrente de projeto (A)	sol pleno (h/dia)	corrente de Projeto (A)
4,52	68,79	6,70	46,41

4.3. Dimensionamento do banco de baterias

Elementos que requerem também uma atenção especial: as baterias. São elas que fornecem a corrente necessária para o sistema quando a energia solar não está disponível (à noite) ou tem sua magnitude reduzida. Nas considerações, é de extrema necessidade prever eventuais dias consecutivos de pouca insolação sobre os módulos (o que foi denominado dias de armazenamento), já que nesses dias as baterias serão mais uma vez a fonte de potência elétrica do sistema.

Tabela 4. Dimensionamento do banco de baterias

consumo ampère-hora corrigido (Ah/dia)	dias de armazenamento	profundidade de descarga máxima (decimal)	desconto por temperatura (decimal)	capacidade necessária para a bateria (Ah)	capacidade da bateria selecionada (Ah)	número de baterias em paralelo
310,96	× 3	÷ 0,90	÷ 1	= 1.036,53	÷ 345	= 3

tensão nominal do sistema	tensão nominal da bateria (Ah)	número de baterias em série	número de baterias em paralelo	total de baterias
24	÷ 6	= 4	× 3	= 12
número de baterias em paralelo	capacidade da bateria selecionada (Ah)	capacidade da bateria do sistema (Ah)	profundidade de descarga máxima (decimal)	capacidade útil da bateria (Ah)
3	× 345	= 1.035	× 0,9	= 931,50

Informações sobre a bateria	
Modelo	FS- 6D
Tipo	selada/lacrada
Tensão Nominal (V)	6
Capacidade Nominal (Ah)	345

Variável	Unitário	Total
Custo do banco de baterias	172,33	2.067,96

4.4. Dimensionamento do Arranjo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é selecionado utilizando as mesmas considerações para as baterias: eficiência, vida útil e a corrente de projeto requerida pelo sistema. Algumas considerações devem ser feitas também com relação à instalação dos módulos: eles devem ser instalados num local livre de sombra e voltado para norte, com a inclinação indicada no dimensionamento.

Tabela 4. Dimensionamento do Arranjo Fotovoltaico

corrente de projeto (A)	Fator de correção do módulo	corrente de projeto corrigida (A)	Corrente nominal do módulo (A)	número de módulos em paralelo
68,79	÷ 0,9	= 76,43	÷ 5,6	= 14

Tabela 4. (continuação) - Dimensionamento do arranjo fotovoltaico.

número de módulos em paralelo	Corrente nominal do módulo (A)	Corrente nominal do arranjo (A)	número de módulos em série	tensão nominal do módulo (V)	tensão nominal do arranjo (V)
	× 5,60	= 78,4		× 12	= 12
	corrente de curto circuito do módulo (A)	Corrente de curto circuito do arranjo (A)		tensão de circuito aberto do módulo (V)	tensão de circuito aberto do arranjo (V)
	× 6,00	= 84		× 21,7	= 21,7

Obs. : Condições padrão de teste (STC) : 1000 W/m², temperatura na célula de 45 °C, AM = 1,5

Informações sobre o módulo fotovoltaico				
modelo : PW 1000		tensão nominal : 24 V		
Comprimento : 1200mm		Largura : 527 mm	Espessura : 56 mm	
Peso 7,6 kg	diodo de "by-pass"		S	N
tensão (V)	na condição padrão de teste	circuito aberto	valor esperado para temperatura mais elevada	
	17,7	26,7	+ 85°C	
corrente (A)	na condição padrão de teste	curto circuito		
	5,6	6,0		

Variável	Unitário (U\$)	Total (U\$)
Custo dos módulos	449,00	6.286,00

4.5. Especificação do Controlador de Carga

A escolha do controlador de carga foi baseada em um equipamento que permita ajustes de corrente e tensão para se adequar às condições do sistema, posteriormente o proprietário do sistema pode querer aumentar sua carga. Porém não necessita ser um equipamento com monitoramento à distância, visto que o usuário reside no local de instalação e é quem vai operá-lo quando se fizer necessário.

Tabela 5. Especificação do Controlador de Carga

	corrente de curto circuito do arranjo (A)		corrente mínima do controlador (A)		capacidade do controlador (lado do arranjo) (A)		Controladores paralelos	
1,25	×	84	=	105	÷	30	=	3

Controladores de carga
modelo : PBR 12 / 44 tensão do sistema : 24 volts "Set-points" ajustáveis (x)

Variável	Unitário (U\$)	Total (U\$)
Custo dos controladores	123,00	349,00

5. Análise do Arranjo Fotovoltaico

O preço mais baixo documentado para sistemas conectados à rede de distribuição nos EUA a partir de 1998 até 2000 é \$5,07/W produzindo eletricidade consistente com os custos de energia nivelados entre \$0,15 e 0,20 / kWh.

Os módulos de silício cristalino continuam dominando o mercado, embora a importância dos filmes finos tenha aumentado. O desafio da tecnologia de filmes finos dentro do mercado foi abordado em um recente artigo por Little e Nowlan. Neste artigo, os autores desenvolveram um ponto de referência da produção de um módulo de \$1,78/W para silício cristalino, em relação ao qual podem ser comparados outros coletores de eficiência menor, como silício amorfo. Para examinar os impactos dos custos dos coletores em sistemas fotovoltaicos, deve-se estender estes argumentos de custos de fabricação para uma comparação completa. Muitas comparações já foram feitas usando variações paramétricas, como a eficiência de coletor, como uma variável. Aqui, por outro lado, fez-se uma análise discreta para coletores comercialmente disponíveis nos últimos 5-10 anos. Um módulo de silício cristalino possui uma eficiência de 12% e um módulo de silício amorfo aproximadamente 6%, eles são representantes dos coletores comercialmente disponíveis. Até mesmo para os sistemas de hoje, a vantagem da eficiência de 2:1 entre módulos de coletores de silício cristalino e os coletores de silício amorfo criam uma situação difícil para equiparar os custos de sistemas, conforme Thomas et al (1999).

No caso aqui apresentado, são necessários 14 módulos para atender à necessidade energética da residência. O custo total de aquisição destes módulos atingiu valores da ordem de U\$ 6.286,00. Os módulos são importados e cada um dos que foram selecionados para o projeto custa U\$ 470,00. Considerando que a potência total da carga é, aproximadamente, 208,4 kWh (289,50 x 24 x 30) e que cada kWh custa em média U\$ 0,17, o custo necessário para a residência seria de U\$ 35,43 mensal. Percebe-se claramente que o custo inicial apenas com os módulos equivale a quase 15 anos do consumo mensal da residência, e ainda não foram computados os outros itens indispensáveis ao circuito.

Outros elementos da planta, ou sejam, as baterias, o controlador de carga e o inversor possuem uma tecnologia há muito disponível no mercado, para as mesmas propriedades e funções. E, são comercializados por alguns fabricantes de módulos com um custo mais elevado. Apesar de alguns fabricantes de módulos fotovoltaicos também produzirem alguns destes equipamentos e oferecerem garantias e assistência técnica confiáveis, tais equipamentos poderiam ser adquiridos a partir de fabricantes especializados, já existentes no mercado próprio de cada equipamento, que também oferecem preços mais competitivos desde que adaptados às condições do sistema.

As baterias são o próximo item. O sistema estudado requer 12 baterias, considerando três dias de armazenamento, isto é, considerou-se que o sistema pode ficar até três dias sem gerar energia elétrica a partir do sol como três dias seguidos de chuva, por exemplo. A vida útil das baterias é inferior à vida útil dos módulos, ou seja, elas deverão ser substituídas ao longo da vida útil do sistema. Considerando esta vida útil como sendo 20 anos e que as baterias durarão em média 5 anos, elas deverão ser substituídas três vezes. Então, tem-se que o custo total com baterias de U\$1.174,26.

O controlador de carga é o item de custo menor. Sua utilização é importante para a proteção das baterias mas não é indispensável. O sistema aqui estudado requer 3 controladores, o que resulta num custo de aquisição de U\$ 349,00, inicialmente. Um custo equivalente a quase 10 meses do consumo residencial. É prevista a substituição dos controladores depois de 10 anos.

O inversor é o componente que permite a utilização de eletrodomésticos comuns como carga do sistema fotovoltaico. Ele deve ser selecionado prevendo-se um possível aumento da potência da carga, ou seja, a utilização de outros equipamentos de utilização momentânea na residência mas que acrescentam potência requerida, como um liquidificador, por exemplo. O custo com o inversor foi de U\$ 2.698,00. Contudo o inversor é um equipamento indispensável ao sistema estudado.

Os custos com os equipamentos de balanço-de-sistema correspondem à cerca de 20% do custo total de aquisição do sistema fotovoltaico propriamente dito e podem ser considerados constantes, pois nos últimos anos não se tem verificado uma redução ou até mesmo uma variação considerável nos seus preços. Os custos de área-relacionada incluem preparação de local, estruturas, fundações, instalação elétrica, e trabalho de instalação. Custos fixos incluem projetos e outros custos indiretos, como licenças e outros custos que não dependem do tamanho dos módulos. A experiência indica que os custos fixos são tipicamente 10% do custo total dos sistemas para projetos (Thomas et al, 1999).

Tabela A. Componentes do sistema fotovoltaico

Capital Inicial	Valor (U\$)	Percentual no Custo Total (%)
Arranjo Fotovoltaico	6.580,00	36,32
Baterias	1.174,26	6,48
Montagem e Balanço	1.809,65	9,99
Inversores	2.698,00	14,89
Instalação	1.000,00	5,52
A – Subtotal (Equipamento e Instalação)	13.261,91	73,20

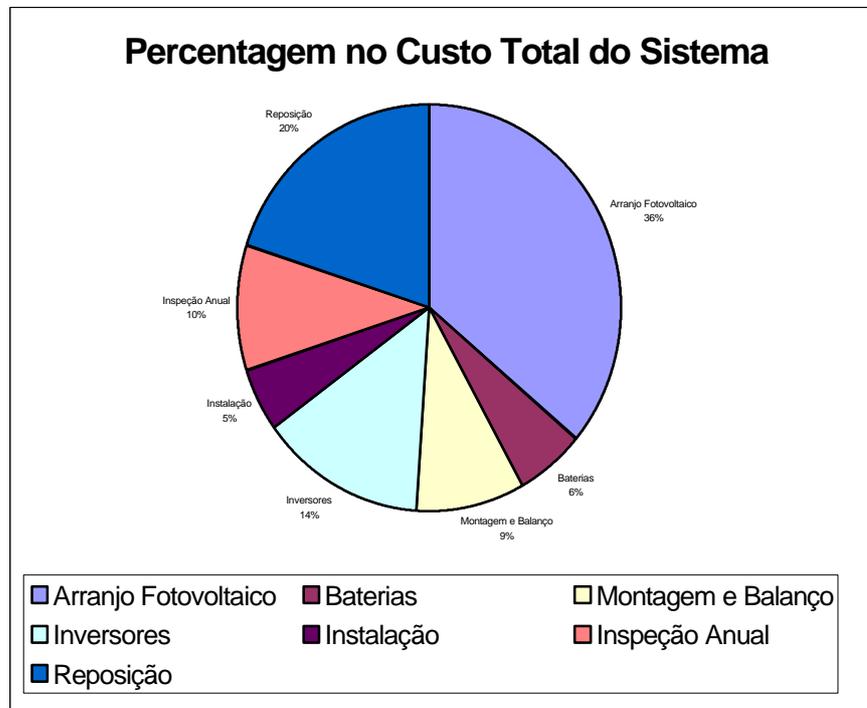
Operação e Manutenção	Valor (U\$)	% no Custo Total
B – Subtotal Inspeção Anual	1.860,00	10,27

Reposição	Valor (U\$)	% no Custo Total
Banco de baterias	1013,15	5,59
Banco de baterias	874,00	4,82
Banco de baterias	753,99	4,16
Manutenção do Inversor	520,80	2,87
Controlador	518,47	2,86
C - Subtotal	3680,42	20,31

Depreciação	Valor (U\$)	% no Custo Total
--------------------	-------------	------------------

(20% do original)		
C – Subtotal (Custo de Reposição)	684,05	3,78

Custo Total do Sistema	18.118,28	100,00
-------------------------------	-----------	--------



Já se percebe que o custo com os equipamentos auxiliares do circuito excede a 40% do custo total de aquisição do sistema, porém a energia elétrica a partir da energia solar é gerada apenas através dos módulos. Sabe-se que a tecnologia dos processos de fabricação dos módulos é cara pois requer materiais de alto índice de pureza para uma melhor eficiência. Estudos estão sendo feitos continuamente ao longo das últimas décadas para abaixar os custos de fabricação, como também pesquisas de processos alternativos para se obter células solares a partir de outros materiais além do silício, mesmo que possuindo uma eficiência consideravelmente menor (Kalyanasundaram et al, 1999). Essa tecnologia de fabricação é o que tem limitado a produção de módulos solares em países consumidores e produtores em potencial de energia elétrica/solar, como o Brasil. Os custos com importação destes módulos são elevados, fazendo com que o valor de sistema fotovoltaico residencial simples, como o aqui estudado, atinja valores na ordem de US\$ 18.000,00.

6. Referências Bibliográficas

Grupo de Trabalho de Energia Solar Fotovoltaica – GTEF, 1995, “Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos”.

Kalyanasundaram K., Graetzel M., Laboratory for Photonics and Interfaces, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, 1999, “Dye Sensitized Solar Cells (DYSC) based on Nanocrystalline Oxide Semiconductor Films”.

Mishira P. R., Joshi J. C., Roy B., Solar Materials & Solar Cells, 2000, “Design of a solar photovoltaic-powered mini cathodic protection system”, 61, pp. 383-391.

Sandia National Laboratories, Photovoltaic Design Assistance Center, 1991, “Stand-Alone Photovoltaic Systems – A Handbook of Recommended Design Practices”.

Siemens Solar Industries – Training Department, 1990, “Photovoltaic Technology and System Design – Training Manual”.

Thomas, M. G., Post H. N., DeBlasio R., 1999, “Progress in Photovoltaics: Research and Applications, “Photovoltaics Systems: an end-of-millennium review”.

Web-Catálogos e catálogos de diversos fabricantes de componentes fotovoltaicos, 2001: Freedom Inverters/chargers, Trace Inverters, Siemens Solar Modules, Morningstar Corporation, ASC Plus Photovoltaic Controller Manual, Concorde AGM batteries, AAA Solar Products, websites.

7. Direitos Autorais

ANALYSIS OF THE COST OF INSTALLATION OF STAND-ALONE PHOTOVOLTAICS SYSTEMS

Karen J. Oliveira

J. M. M. Gurgel

Z. E. da Silva

University Federal of Paraíba – UFPB

LES – Solar Energy Laboratory

P. O. Box 5115 - 58051-970

João Pessoa - Paraíba – Brazil

karen@les.ufpb.br

Abstract - In the last decades, the photovoltaics systems reached approximately 500 MW of installed power while the real costs of these facilities decreased significantly as a result of the appearance of new technologies of production of the basic components. The high quality and the lifetime of the modules did the reliability increased in such systems. On the other hand, the applications denominated stand-alone continue to dominate the market, in particular in remote locations, as for example: water pumping and feeding of loads of low consumption. Nowadays, it is possible to affirm that there's no technical reasons that impede the use of photovoltaics systems, no matter the load, be which the current type that it needs. This paper makes an analysis of the real costs for installation of a stand-alone residential photovoltaic system.

Key-words: Photovoltaics cells, costs, stand-alone systems, design..