

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE OPERACIONAL DE UM CONTROLADOR DE CARGA *ON/OFF*

Aimé Fleury de Carvalho Pinto Neto – aimepinto@ufpa.br

Marcelo Pinho Almeida – marcelopa@ufpa.br

Wilson Negrão Macêdo – wnmacedo@pq.cnpq.br

João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br

Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas – GEDAE, Faculdade de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal do Pará
INCT – EREEA

Resumo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um controlador *ON/OFF* de baixo custo e reduzido auto-consumo para o gerenciamento do processo de carga e descarga de baterias empregadas em sistemas fotovoltaicos autônomos. Apresentam-se, ainda, o detalhamento de cada um dos blocos que constituem o controlador, uma estimativa de custo do mesmo, os resultados dos testes operacionais e o detalhamento da estrutura física e do programa de aquisição de dados desenvolvidos para a realização dos testes.

Palavras-chave: Energia solar, Controladores de carga, Sistemas fotovoltaicos autônomos.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, os sistemas fotovoltaicos instalados estão voltados, em sua maioria, para a eletrificação rural e de localidades não atendidas pela rede elétrica, onde são utilizados isoladamente, em residências e pequenos comércios, ou conectados a outros sistemas, como o eólico e o diesel, formando sistemas híbridos.

Em sistemas fotovoltaicos autônomos de produção de eletricidade, a utilização de baterias é imprescindível, assim como dispositivos que controlem o fluxo de energia através delas, a fim de prolongar sua vida útil. Esses dispositivos, conhecidos como controladores de carga, além de representarem uma pequena parcela do custo inicial de um sistema fotovoltaico, se desempenharem corretamente suas funções podem reduzir substancialmente os custos operacionais. Os controladores atuais são desenvolvidos com algoritmos de carga bem complexos e com diversas funções, várias delas na maioria das vezes nunca utilizadas, sem, contudo, apresentarem *setpoints* ajustáveis, sendo que seus valores fixos estão longe dos valores recomendados para as baterias de chumbo-ácido, que são as mais utilizadas na prática, devido ao seu custo mais baixo e disponibilidade no mercado. Além disso, a complexidade da eletrônica envolvida, devido à grande quantidade de funções, provoca um aumento do auto-consumo, do preço, da probabilidade de falhas e da dificuldade de manutenção.

Tendo em vista o exposto acima, este trabalho propõe o desenvolvimento de um controlador de carga simples e robusto, que desempenha o seu papel principal, que é o de proteger a bateria de descargas e sobrecargas excessivas, prolongando a sua vida útil e, conseqüentemente, reduzindo os custos operacionais do sistema. O trabalho faz uma abordagem do projeto e desenvolvimento do controlador, da estimativa de custo, dos resultados operacionais e da estrutura montada para os testes e aquisição de dados.

2. CONFIGURAÇÕES E ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Os controladores de carga são dispositivos que atuam de forma a regular o fluxo da energia que entra e sai das baterias, aumentando sua vida útil, atuando no controle da tensão terminal do banco e protegendo-as de sobrecarga e descarga profunda. Os controladores de carga têm, normalmente, dois tipos de configuração construtiva, série ou paralela (*shunt*), e diversas estratégias de controle: *On/Off*, Tensão Constante, Corrente Constante, dentre outras. Normalmente, as estratégias que se utilizam de tensão ou corrente constante fazem uso de PWM (*Pulse Width Modulation*) para obterem um valor de tensão ou corrente médio fixo. Essas configurações e estratégias de controle estão resumidas na Fig. 1.

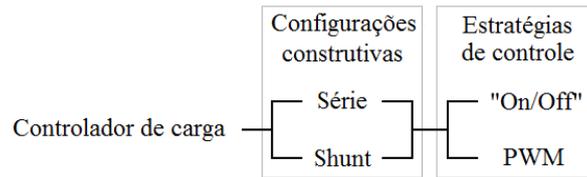


Figura 1 – Configurações e estratégias de controle de controladores de carga.

As configurações série e paralela diferenciam-se, basicamente, pela posição da chave que conecta os módulos às baterias. Na configuração série, a chave é colocada entre os dois subsistemas. Quando fechada, permite que os módulos entreguem corrente aos acumuladores, enquanto que aberta, ela impede esse fluxo de corrente. Já na configuração paralela, a chave é posicionada em paralelo e, quando as baterias estão próximas de sua carga total, o arranjo fotovoltaico é curto-circuitado, e, conseqüentemente, isolado do restante do circuito. O curto-circuito pode afetar o sistema de acumulação, caso não haja um diodo de bloqueio para evitar que ele se descarregue. A grande vantagem da configuração série é que não existe a necessidade desse diodo, o que elimina a corrente de fuga reversa e diminui a queda de tensão e o aquecimento do circuito. A Fig. 2 mostra os diagramas esquemáticos das duas configurações.

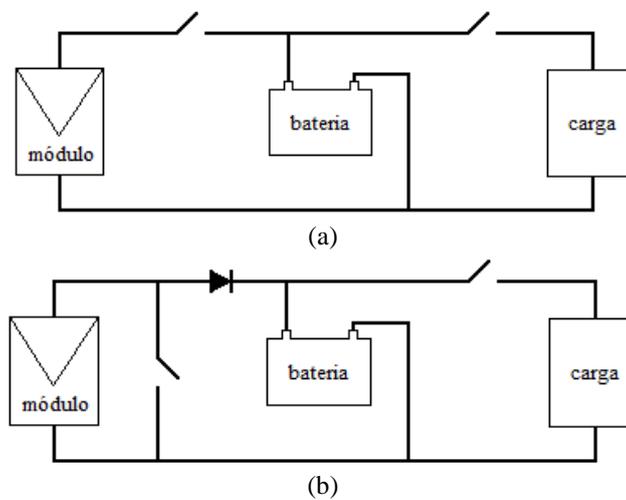


Figura 2 – Configuração série (a) e paralela (b).

A estratégia de controle mais simples é a *On/Off*, que consiste na atuação das chaves quando a tensão nos acumuladores chega a valores pré-determinados, conhecidos como pontos de ajuste (*setpoints*).

Quando o banco de baterias está sendo carregado pelo gerador fotovoltaico, sua tensão sobe e, ao atingir a Tensão de Corte (TC), o controlador interrompe a corrente de carregamento, desconectando os módulos. Com o uso da energia acumulada, a tensão decresce e ao atingir a Tensão de Reconexão (TR), a corrente de carregamento é restabelecida, através da reconexão do gerador.

O controle de descarga funciona de forma análoga: há uma Tensão de Desconexão da Carga (TDC) quando a carga é desconectada, sendo somente reconectada quando a bateria atingir a Tensão de Reconexão da Carga (TRC). Esses ciclos apresentam histereses, como ilustrado na Fig. 3.

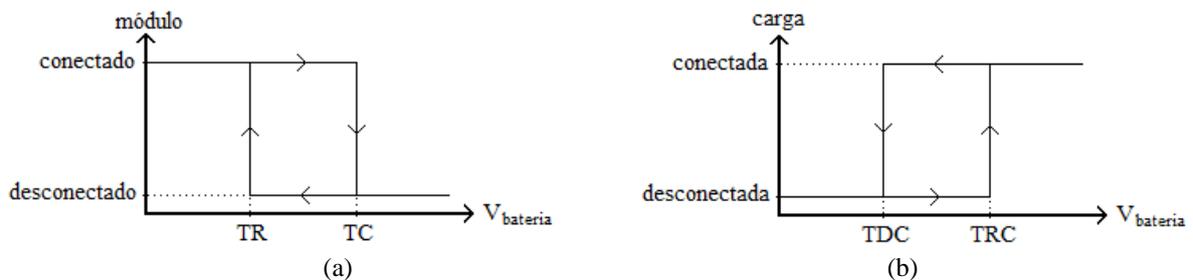


Figura 3 – Histereses de carregamento (a) e descarregamento (b).

A estratégia de controle de tensão constante, bastante usada hoje em dia, baseia-se, principalmente, no controle por PWM, onde as baterias são alimentadas por uma corrente pulsada, de forma a mantê-las em flutuação, fazendo com que não recebam mais energia do que são capazes de armazenar, como ilustrado na Fig. 4. A Tab. 1 faz um comparativo entre as estratégias de controle *On/Off* e PWM.

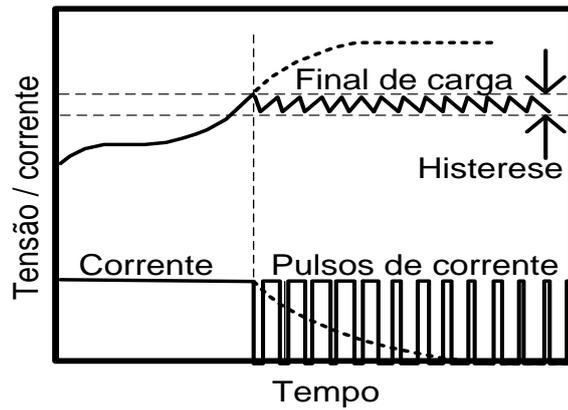


Figura 4 – Comportamento da tensão e da corrente nas baterias com controladores baseados em PWM.

Tabela 1 – Comparação entre a estratégia de controle *On/Off* e a tensão constante com PWM.

Configuração	Estratégia de Controle	Vantagens	Desvantagens
Série	<i>On/Off</i>	Simples, barato e confiável. Baixa dissipação de potência.	Dificuldade de carregar completamente as baterias
Paralela	<i>On/Off</i>	Simples, barato e confiável. Baixa queda de tensão através do controlador.	Dissipação de potência elevada. Necessidade de diodo de bloqueio. Pode causar pontos quentes em altas tensões. Dificuldade de carregar completamente as baterias.
Série ou Paralela	PWM	Redução da corrente de carga. Baixa dissipação de potência.	Mais complexo que o <i>On/Off</i> . Queda de tensão através do controlador. Sensível a interferências eletromagnéticas.

Fonte: Modificado de IEA PVPS (1998)

3. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR

O controlador de carga desenvolvido possui configuração série, devido às vantagens expostas anteriormente, e a estratégia de controle escolhida foi a *On/Off*, devido a sua menor complexidade e menor custo de produção. Suas especificações nominais são 20 A e 12 V, podendo-se elevar a corrente nominal trocando apenas alguns componentes, como o fusível, os MOSFET's e os cabos, por outros de maior capacidade de corrente.

Os *setpoints*, enumerados na Tab. 2, foram definidos para baterias de chumbo-ácido automotivas ou estacionárias, visto que elas são as mais utilizadas atualmente no Brasil. O *setpoint* mais crítico é o TDC, e seu valor foi definido para corresponder a aproximadamente 50% de profundidade de descarga máxima (Oliveira, 2005). Deve-se destacar que o valor de tensão exato para essa profundidade de descarga pode variar de bateria para bateria, e o escolhido representa uma média geral.

Tabela 2 – *Setpoints* para baterias de chumbo-ácido automotivas ou estacionárias.

TC	TR	TRC	TDC
14,4 V	13,8 V	13,2 V	11,8 V

Optou-se por não utilizar um microcontrolador, uma vez que esse componente é relativamente caro, necessita de programação e dificulta a identificação de problemas. Para facilitar a localização de eventuais falhas e a substituição dos componentes com dispositivos comprados no comércio local (Belém/PA), o controle foi implementado com comparadores de tensão baseados em amplificadores operacionais. A Fig. 5 mostra o diagrama de blocos do controlador e a Fig. 6 o protótipo correspondente.

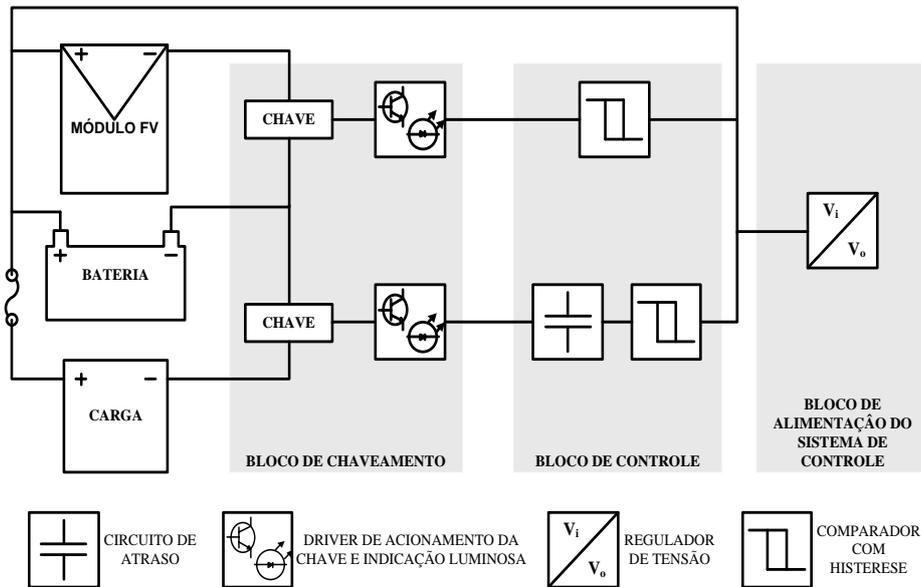


Figura 5 – Diagrama de blocos do controlador de carga desenvolvido.

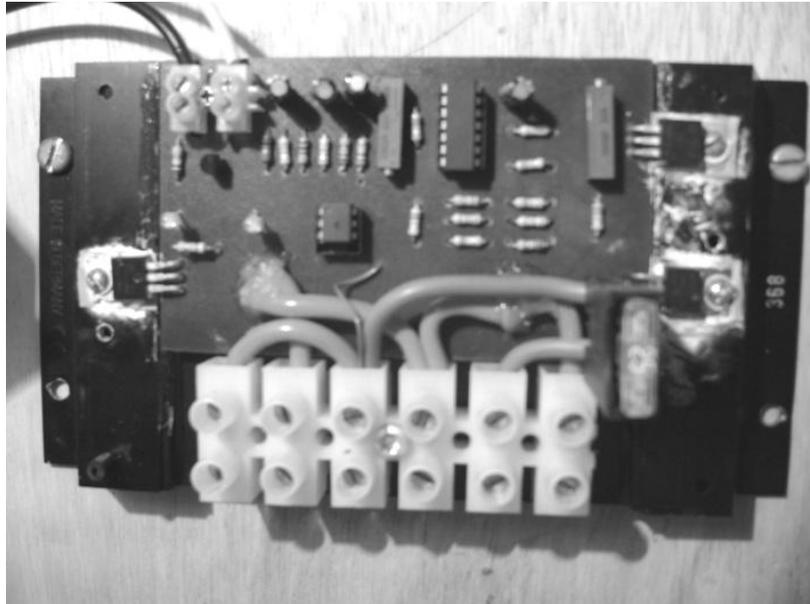


Figura 6 – Protótipo do controlador de carga.

Percebe-se que as chaves foram posicionadas nos ramos negativos e os pólos positivos foram curto-circuitados. Essa estratégia deve-se a uma característica funcional dos MOSFET's utilizados como chaves. Eles precisam de uma tensão porta-fonte (V_{GS}) bem maior que a tensão dreno-fonte (V_{DS}) para que as perdas por condução sejam mínimas. Colocando-se as chaves nos ramos negativos consegue-se estabelecer uma tensão $V_{GS} \gg V_{DS}$ com mais facilidade.

As conexões por onde a corrente nominal deve atravessar foram todas feitas com cabo de cobre de 6 mm². Isso elimina o uso de trilhas de circuito impresso para conduzir altas correntes, o que diminui as perdas e o aquecimento do conjunto.

Para melhor compreensão, o controlador foi dividido em 3 blocos: bloco de alimentação, de controle e de chaveamento. Esses blocos são detalhados nos tópicos subseqüentes, apresentando-se suas funcionalidades.

3.1 Bloco de alimentação do sistema de controle

Neste bloco, o elemento central é um regulador de tensão ajustável, cuja tensão de saída foi regulada para 6 volts. A tensão de alimentação do regulador vem diretamente das baterias, e a tensão de saída precisa ser estável, pois os *setpoints* dependerão dela. A Fig.7 apresenta o diagrama esquemático do bloco de alimentação. Os resistores e capacitores foram calculados seguindo as orientações fornecidas pelo fabricante do regulador para o ajuste da tensão.

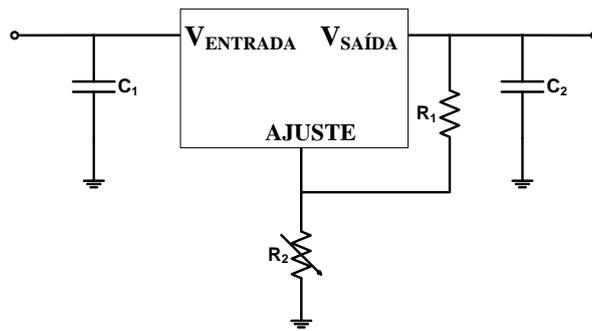


Figura 7 – Diagrama esquemático do bloco de alimentação do sistema de controle.

3.2 Bloco de controle

O bloco de controle pode ser considerado o mais importante, pois nele é feita a comparação da tensão do banco de baterias com os *setpoints* e o controle da atuação das chaves. O sinal de tensão das baterias é aferido por meio de um sensor conectado diretamente ao terminal positivo do banco de baterias, a fim de evitar erros provenientes de quedas de tensão nos cabos por onde passa a corrente nominal, e dividido por três em um divisor de tensão composto por um *trimpot* de precisão. Essa divisão é necessária devido à alimentação do circuito de controle ser feita em 6 V, o que limita os valores de entrada dos amplificadores operacionais até essa tensão, sendo necessário, portanto, dividir por três o sinal da bateria e os *setpoints*.

Para comparar o sinal de tensão do banco de baterias com os *setpoints*, utilizam-se comparadores com histerese baseados em amplificadores operacionais. Devido à falta de equações para o comportamento desses comparadores, foi desenvolvido um sistema de equações para o cálculo dos resistores que integram o comparador. A Fig. 8 mostra a composição básica do comparador.

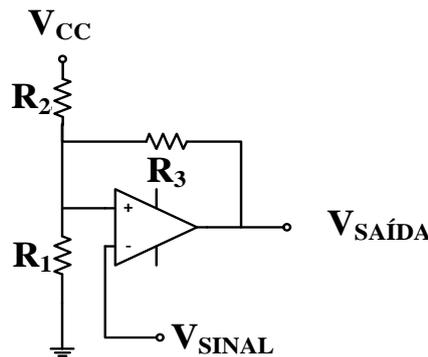


Figura 8 – Circuito do comparador com histerese.

Utilizando as leis de Kirchoff e considerando o amplificador operacional como ideal, chegou-se às seguintes equações, que constituem um sistema não linear:

$$V_{TH} = \left(\frac{V_{CC}}{R_2} + \frac{V_{OH}}{R_3} \right) \cdot (R_1 || R_2 || R_3) \quad (1)$$

$$V_{TL} = \left(\frac{V_{CC}}{R_2} + \frac{V_{OL}}{R_3} \right) \cdot (R_1 || R_2 || R_3) \quad (2)$$

$$V_{TH} - V_{TL} = \left(\frac{V_{OH} - V_{OL}}{R_3} \right) \cdot (R_1 || R_2 || R_3) \quad (3)$$

Onde V_{cc} é a tensão de alimentação do circuito, no caso 6 V, V_{OH} é a tensão de saída de nível alto do amplificador operacional sem carga, V_{OL} é a tensão de saída em nível baixo do amplificador operacional sem carga, V_{TH} é a tensão de transição superior da histerese e V_{TL} é a tensão de transição inferior da histerese. Os comportamentos de V_{OH} , V_{OL} , V_{TH} e V_{TL} são apresentados na Fig. 9. O sistema pode ser resolvido através de métodos numéricos, e mostrou-se bastante eficaz nas simulações do comparador feitas com ferramentas computacionais de simulação de circuitos. Pode-se perceber a importância dos valores da tensão de saída do amplificador operacional na determinação das tensões de transição (*setpoints*) do comparador. Na presença de carga no amplificador operacional, essas tensões de saída caem, alterando significativamente as tensões de transição. Para evitar que isso ocorra, foram colocados resistores *pull-up* ligando as saídas dos amplificadores com a tensão de alimentação de 6 V, a fim de manter fixas as tensões de saída V_{OH} e V_{OL} utilizadas nos cálculos.

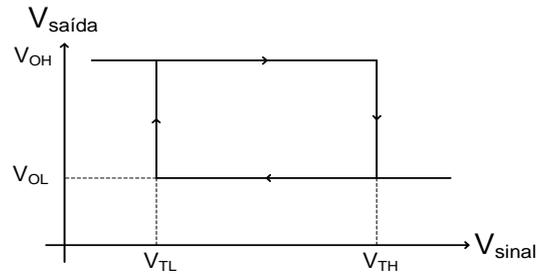


Figura 9 – Histerese de tensão.

O bloco de controle necessita de um circuito de atraso do sinal de controle de desconexão da carga, a fim de garantir que a passagem pela TDC foi definitiva. Caso uma carga indutiva, como um motor, seja acionada, a tensão na bateria pode cair significativamente, contudo retorna a uma tensão superior. Sem o circuito de atraso, ocorreria o desligamento desnecessário da carga sempre que a tensão fosse abaixo da TDC. Dessa forma, fez-se uma modificação no circuito do comparador com histerese, adicionando-se um circuito RC e um comparador antes da realimentação do resistor R3, conforme mostrado na Fig. 10.

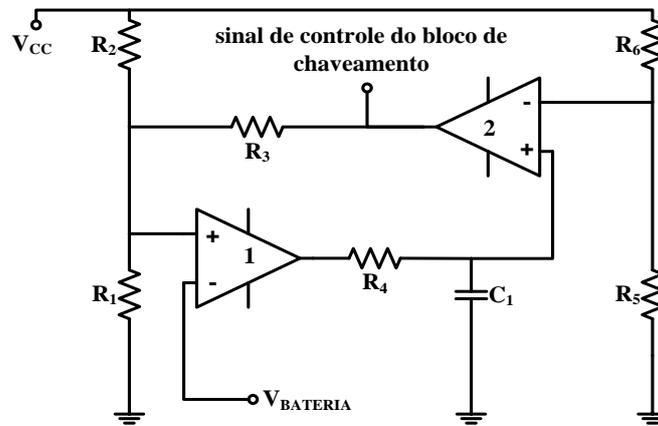


Figura 10 – Comparador com histerese e atraso.

Quando ocorre uma mudança de estado na saída do comparador 1, esta deve permanecer tempo suficiente para que o capacitor carregue ou descarregue até uma determinada tensão, definida pelo divisor formado pelos resistores R5 e R6, de forma que somente ocorra uma alteração na saída do bloco de controle (saída do comparador 2) se esse tempo for atingido.

Para o caso de uma transição de V_{OL} para V_{OH} , ou seja, o capacitor é carregado, utiliza-se a equação de carregamento de um circuito RC (Eq. (4)), considerando-se os amplificadores operacionais 1 e 2 ideais.

$$V_C = V_{OH} \times \left(1 - e^{-\frac{t_1}{R_4 C_1}}\right) \quad (4)$$

A tensão V_C é aquela que o capacitor deve atingir após o período t_1 , durante o qual a tensão da bateria deve permanecer abaixo de V_{TL} para provocar uma mudança na saída do bloco de controle. Analogamente, para o caso de uma transição de V_{OH} para V_{OL} , ou seja, o capacitor é descarregado, utiliza-se a equação de descarregamento de um circuito RC (Eq. (5)), considerando-se novamente os amplificadores operacionais 1 e 2 ideais.

$$V_C = V_{OH} \times e^{-\frac{t_2}{R_4 C_1}} \quad (5)$$

Nesse caso, V_C é a tensão que o capacitor deve atingir após o período t_2 , durante o qual a tensão da bateria deve permanecer acima de V_{TH} para provocar uma mudança na saída do bloco de controle. Com as Eq. (4) e (5) e sendo V_{OH} um valor conhecido e t_1 e t_2 valores escolhidos pelo projetista, pode-se determinar os valores de V_C , R_4 e C_1 , bastando arbitrar um deles. Valores de 4 minutos para o tempo de atraso t_1 são observados na prática, e por isso foi utilizado no projeto dos controladores. Para t_2 , valores pequenos podem ser admitidos, pois a reconexão da carga não é tão crítica quanto a desconexão.

O circuito de atraso foi implementado apenas no controle referente à proteção contra descargas excessivas. O controle referente ao carregamento da bateria apresenta apenas um circuito de comparação com histerese (Fig. 8). Esta decisão foi tomada visando simplificar o circuito e diminuir o auto-consumo. Além disso, a desconexão do gerador fotovoltaico não acarreta implicações tão graves como a desconexão da carga.

3.3 Bloco de chaveamento

Esse bloco compreende os *drivers* dos MOSFET's e a sinalização (através de LED's) dos estados de carregamento da bateria. As Fig. 11a e 11b mostram os diagramas esquemáticos dos circuitos de chaveamento da carga e do gerador FV, respectivamente.

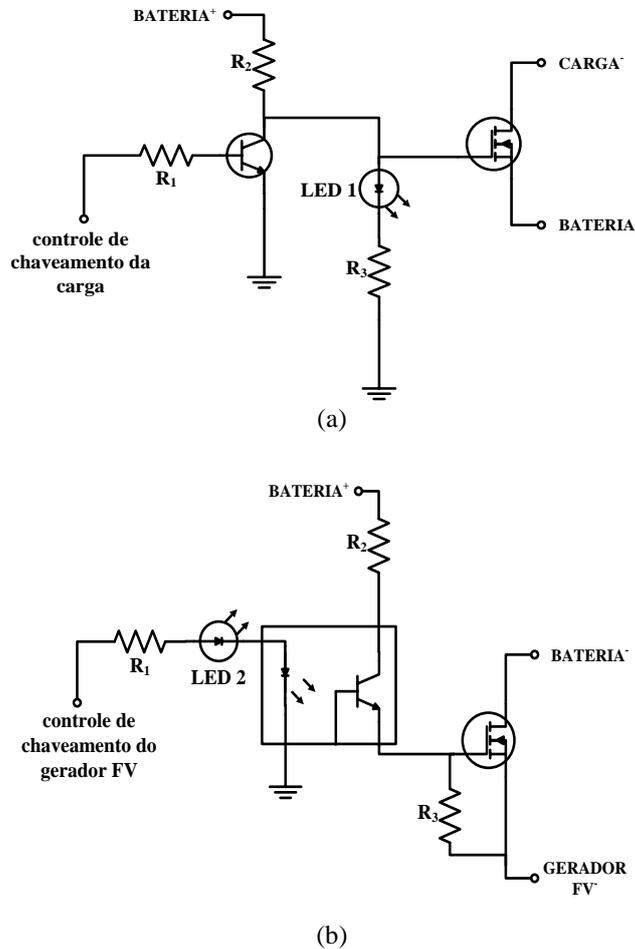


Figura 11 – Diagrama esquemático do circuito de (a) chaveamento da carga e (b) chaveamento do gerador fotovoltaico.

Os *drivers* são feitos com TJB's e opto-acopladores configurados como chaves eletrônicas de forma a polarizar convenientemente os MOSFET's. Deve-se conseguir uma tensão V_{GS} elevada, para diminuir ao máximo a perda por condução quando ligados e, para cortá-los, deve-se aplicar uma tensão V_{GS} igual a zero. No MOSFET que chaveia a carga, cortá-lo é uma tarefa simples; basta conectar a porta ao ponto comum do circuito. Já no que chaveia o módulo, faz-se necessário conectar a porta ao terminal negativo do gerador. Dessa forma, para esse MOSFET utilizou-se um opto-acoplador como chave, o qual, ao ser saturado, aplica na porta a tensão da bateria e, ao ser cortado, permite que o resistor R3 da Fig. 11b conecte a porta ao terminal negativo do módulo.

Visando diminuir o consumo, apenas dois LED's foram incorporados aos *drivers* a fim de sinalizar o estado de carregamento das baterias. A Tab. 3 resume o significado das indicações luminosas.

Tabela 3 – Interpretação da sinalização luminosa dos LED's.

	Aceso	Apagado
LED 1	Carga conectada às baterias	Carga desconectada das baterias
LED 2	Gerador FV conectada às baterias	Gerador FV desconectada das baterias

4. ESTIMATIVA DE CUSTO

Na avaliação da estimativa de custo levaram-se em consideração todos os componentes eletrônicos, a placa de circuito impresso, cabos de cobre, barra de sindal, solda e dissipadores. Custos com acabamento e mão-de-obra não foram incluídos. A Tab. 4 apresenta os resultados.

Tabela 4 – Levantamento de custo para o controlador de carga (Data do levantamento de preço: junho de 2008).

Item	Quantidade	Preço Unitário [R\$]	Preço Total [R\$]
Resistor	19 unidades	0,10	1,90
Trimpot de precisão	2 unidades	1,50	3,00
Regulador de tensão ajustável	1 unidade	3,00	3,00
CI com 4 amplificadores oper.	1 unidade	1,00	1,00
Placa de circuito impresso	1 unidade	3,50	3,50
Solda	2 metros	0,70	1,40
MOSFET	2 unidades	4,00	8,00
LED	2 unidades	0,20	0,40
Opto acoplador	1 unidade	3,00	3,00
TBJ	1 unidade	0,30	0,30
Capacitor	4 unidades	0,40	1,60
Barra de sindal (6 conexões)	1 unidade	2,00	2,00
Fusível com suporte	1 unidade	2,00	2,00
Fio de cobre 6 mm ²	0,5 metro	1,70	0,85
TOTAL			31,95

A Tab. 5 apresenta uma pesquisa de preço de controladores de carga realizada na *internet*, consultando páginas brasileiras, européias e americanas.

Tabela 5 – Pesquisa de preço de alguns controladores de carga comerciais.

Controlador	Especificações	Preço
Fabricante A (PWM)	12 V, 30 A	€ 165,00 (R\$ 431,80*)
Fabricante B (PWM)	12 V, 22 A	US\$ 99,00 (R\$ 164,36**)
Fabricante C (PWM)	12, 24, 48 V, 30 A	R\$ 715,00
Fabricante D (PWM)	12 V, 30 A	US\$ 309,00 (R\$ 513,00**)
Fabricante E (PWM)	12 V, 30 A	R\$ 622,00

* A conversão para Real foi feita com € 1,00 = R\$ 2,62, no dia 27 de maio de 2008, e não inclui taxas de transporte e importação.

** A conversão para Real foi feita com US\$ 1,00 = R\$ 1,66, no dia 27 de maio de 2008, e não inclui taxas de transporte e importação.

Comparando o custo do controlador desenvolvido com a pesquisa de mercado, percebe-se que ele tem um custo bem inferior ao dos outros controladores, entre 76 a 95 % a menos. Em parte essa diferença pode ser justificada pelo menor número de funções incorporadas, estratégia de controle e por não ter sido vinculado o custo com mão-de-obra, acabamento, dos impostos e demais encargos comerciais, inclusive o lucro. Entretanto, em muitas aplicações não se faz necessária uma grande quantidade de funções; logo, o uso de um controlador simples, robusto e com componentes encontrados no mercado nacional seria adequado.

5. RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES

Para os testes preliminares do controlador *On/Off* foram utilizadas uma fonte controlada de tensão (para simular o acumulador ou o gerador fotovoltaico), uma bateria de 12 V e 7,5 Ah nominais, um banco de lâmpadas incandescentes halógenas de 12 V (para simular a carga), voltímetros e amperímetros digitais. Os testes mostraram que o controlador funciona adequadamente, de acordo com o esperado. A Tab. 6 resume os resultados obtidos nos testes para *setpoints*, auto-consumo e atrasos.

Tabela 6 – Resultado dos testes a vazio e com carga nominal para o controlador *On/Off*.

	<i>Setpoint</i>		Tensão (V)	Atraso (s)	Auto-consumo (mA)
	Gerador FV	Carga			
Teste a vazio	Gerador FV	TC	14,39	-	4,80
		TR	13,80	-	
	Carga	TRC	13,19	13s	
		TDC	11,81	4min30s	
Teste com carga nominal	Gerador FV	TC	14,40	-	4,80
		TR	13,80	-	
	Carga	TRC	13,22	13s	
		TDC	11,82	4min20s	

As pequenas diferenças entre os valores de tensão para um mesmo *setpoint* com carregamentos diferentes do controlador estão associadas à relativa imprecisão do método utilizado nas aferições, feitas através de observação visual. Já as diferenças nos tempos de atraso estão associadas ao estado inicial de carregamento dos capacitores, não representando, contudo, problemas para o funcionamento adequado do controlador.

A Tab. 7 mostra os *setpoints* de alguns controladores existentes no mercado, bem como seus auto-consumos máximos.

Tabela 7 – *Setpoints* e consumos máximos de controladores comerciais.

Controlador	TC (V)	TR (V)	TRC (V)	TDC (V)	Consumo máximo (mA)
Fabricante A (PWM)	-	-	12,6	11,1	5
Fabricante B (PWM)	14,4	13	-	-	62,8
Fabricante C (PWM)	-	-	12,6	11,4	22
Fabricante D (PWM)	-	-	12,6	11,5	83
Fabricante E (PWM)	-	-	12,7	11,4	-

Além da maioria ter um alto auto-consumo, percebe-se que todos os controladores pesquisados estavam com TDC abaixo do valor recomendado (11,8 V) para uma profundidade de descarga máxima de 50%, permitindo descargas excessivas e diminuindo significativamente a vida útil das baterias.

6. RESULTADOS DOS TESTES OPERACIONAIS

Os testes operacionais do controlador consistiram em avaliar os ciclos de carga e descarga, possibilitando observar o chaveamento adequado para cada *setpoint*. O controlador foi instalado em um sistema fotovoltaico autônomo em corrente contínua e os parâmetros elétricos referentes à tensão na bateria, corrente na bateria, corrente do módulo e corrente para a carga foram aferidos com um sistema de supervisão e aquisição de dados desenvolvido para esse fim.

6.1. Sistema fotovoltaico montado para os testes

Foi montado um sistema fotovoltaico autônomo com dois módulos fotovoltaicos de 80 Wp, conectados em paralelo a fim de aumentar a corrente fornecida pelo gerador, uma bateria estacionária 150 Ah / 12 V, o controlador de carga desenvolvido, e um banco de lâmpadas halógenas CC utilizado como carga, com potência total de 100 W. A Fig. 12 ilustra o sistema montado.

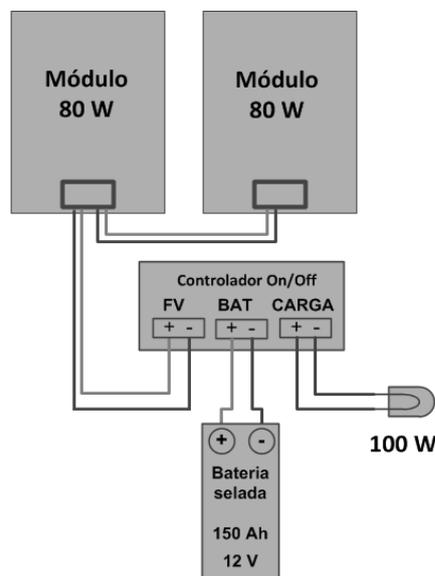


Figura 12 – Sistema fotovoltaico montado para os testes operacionais.

6.2. Sistema de supervisão e aquisição de dados

A fim de registrar as grandezas elétricas durante os testes de operação, montou-se um sistema de supervisão e aquisição de dados composto por uma placa de aquisição de dados, instalada em um computador, e três transdutores de corrente e um de tensão.

A placa de aquisição utilizada foi a PCI-1002. Ela possui 32 canais analógicos de entrada em modo comum, resolução de 12-bits e taxa de amostragem de conversão A/D de 10 kHz.

Os transdutores de corrente e tensão utilizados foram o HAL50-S (efeito Hall) e o LV25-P, respectivamente. Os transdutores de corrente foram ajustados para apresentarem um *offset* igual a zero e as curvas $I_{\text{entrada}} \times V_{\text{saída}}$ foram traçadas por meio de ensaios, assim como as curvas $V_{\text{entrada}} \times V_{\text{saída}}$ dos transdutores de tensão.

Um *software* de supervisão e aquisição de dados foi desenvolvido em LabVIEW, para monitorar os valores instantâneos de tensão na bateria, corrente na bateria, corrente do módulo, corrente para a carga, temperatura e irradiância para dois sistemas fotovoltaicos simultaneamente, e armazenar esses dados integralizados em períodos definidos pelo usuário. No entanto, nos testes operacionais dos controladores, as variáveis temperatura e irradiância não foram monitoradas, devido à indisponibilidade de sensores. A Fig. 13 mostra a interface do *software*.

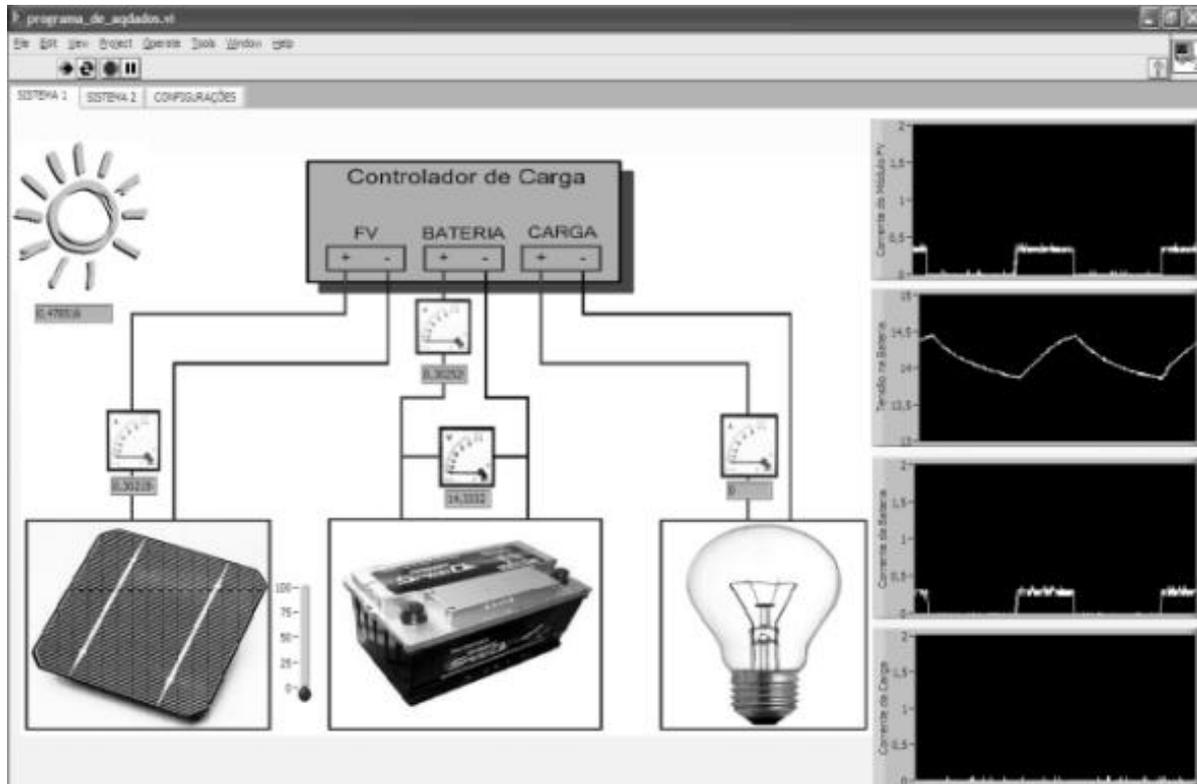


Figura 13 – Interface do *software* de aquisição de dados.

A taxa de amostragem do programa de aquisição é de 10 Hz e os valores das variáveis registradas foram integralizados em intervalos de 1 minuto. O programa grava os dados em arquivos de extensão txt em um diretório definido pelo usuário.

6.3. Procedimentos adotados nos testes operacionais

Os testes operacionais consistiram em verificar os chaveamentos tanto da carga como do gerador fotovoltaico. Os seguintes procedimentos foram realizados:

- a – Descarga da bateria até a tensão de 11,80 V sem o controlador;
- b – Carregamento da bateria durante 4 dias, período após o qual o controlador iniciou o processo de regulação do carregamento. Com esse procedimento foi possível observar os chaveamentos relativos ao gerador FV; e
- c – Conexão das cargas ao sistema, possibilitando a descarga das baterias. Nesse processo, foi possível observar os chaveamentos relativos à carga.

6.4. Resultados

As curvas de carga e descarga da bateria são mostrada nas Fig. 14 e 15, respectivamente. A curva de carregamento apresenta falhas devido a quedas de energia que ocorreram na rede convencional durante o período dos testes, desligando o sistema de supervisão.

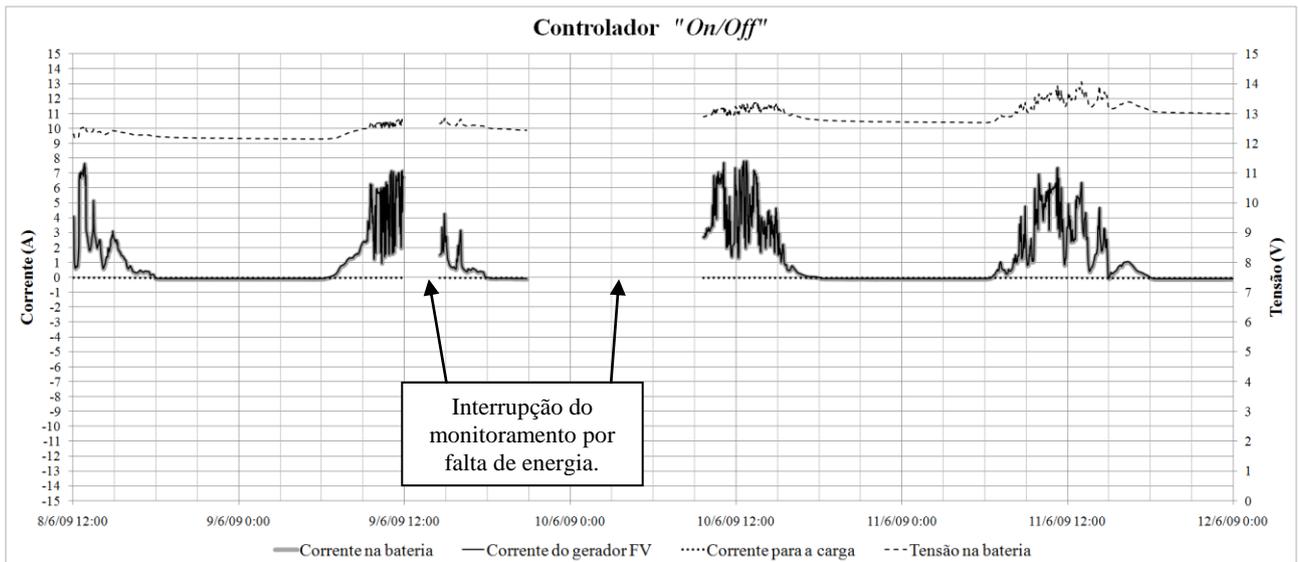


Figura 14 – Curva de carga da bateria.

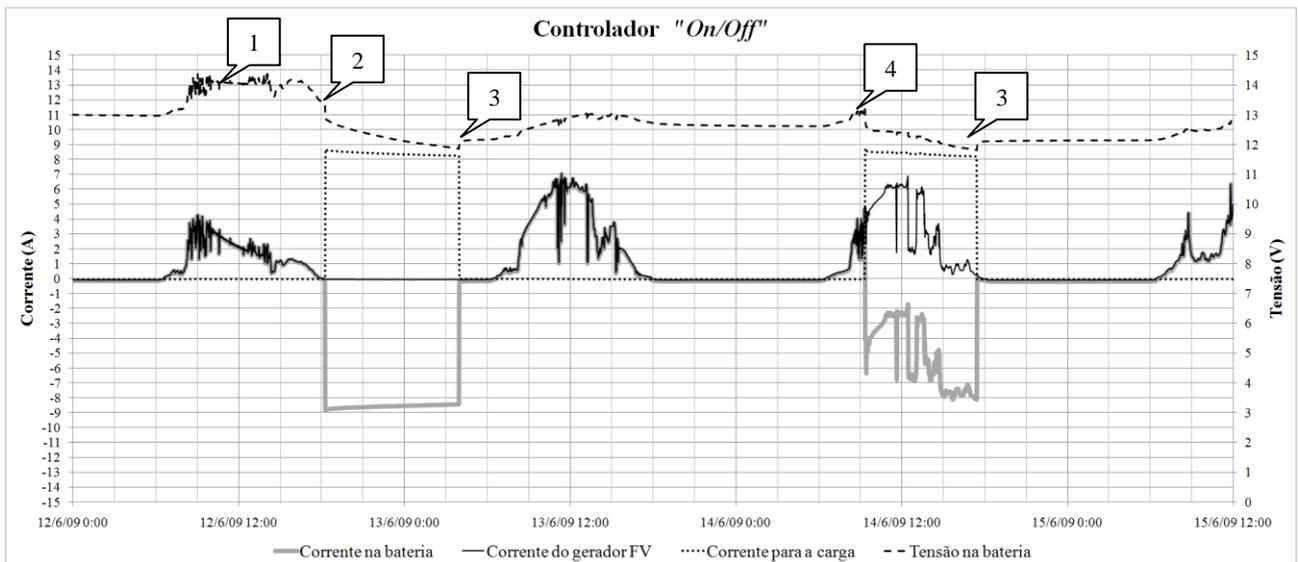


Figura 15 – Curva de descarga da bateria. 1: Regulação de tensão pelo controlador *On/Off*; 2: Conexão manual da carga; 3: Desconexão da carga pelo controlador por baixa tensão (TDC); 4: Reconexão da carga pelo controlador (TRC).

A forma de onda da corrente do módulo apresenta um perfil típico de dias nublados, o que foi constatado visualmente durante os testes. O sinal negativo da corrente na bateria ocorreu devido ao sentido da mesma no transdutor de corrente. Ele foi posicionado de tal forma que se a corrente circulasse do gerador para a bateria o sinal seria positivo, e se circulasse da bateria para a carga o sinal seria negativo.

Pode-se perceber que a forma de onda da corrente na bateria é idêntica à do módulo quando a carga não está conectada. Isso ocorre porque toda a corrente proveniente do módulo flui para a bateria. É interessante destacar, também, o comportamento da corrente na bateria durante a operação das cargas: quando estas foram ligadas enquanto não havia geração FV, a bateria supriu toda a corrente demandada; já quando as cargas foram ligadas em um período de geração FV, a corrente da bateria complementou a do gerador a fim de suprir a demanda.

7. CONCLUSÃO

Em sistemas fotovoltaicos autônomos, o controle de carga e descarga dos acumuladores é de grande importância para a eficiência e durabilidade do sistema, o que implica em custos de operação e manutenção menores. Além disso, o custo inicial mais baixo também é vantajoso, principalmente em sistemas de pequeno porte. Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um controlador de carga do tipo *On/Off* adequado às aplicações em sistemas fotovoltaicos autônomos de pequeno porte, que fazem o armazenamento da energia produzida em banco de baterias.

O controlador, simples e robusto, desenvolvido preza pela facilidade de construção e manutenção, e pode ser plenamente utilizado quando não houver exigência de controle mais complexo.

Os testes realizados com o controlador mostraram que o protótipo possui níveis máximos de carga e descarga adequados para as baterias automotivas e estacionárias de chumbo-ácido, bem como a simplicidade necessária para sua implementação com componentes disponíveis no mercado local. Além disso, são de fácil construção, podendo ser montados ou reparados por qualquer pessoa com alguma experiência com circuitos eletrônicos.

8. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é baseado em estudos apoiados pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq - Brasil.

O desenvolvimento deste trabalho foi apoiado pelo Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas – GEDAE, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, e pelo INCT – EREEA.

REFERÊNCIAS

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 1998, Recommended Practices For Charge Controllers: Use of PV Systems in Stand-Alone and Island Applications.

Oliveira, L. G. M., 2005. Estratégias de Controle de Carga e Descarga em Sistemas Fotovoltaicos, Dissertação de Mestrado, PIPGE, USP, São Paulo.

Pinto, A. F. C., Almeida, M. P., Desenvolvimento de Controladores de Carga para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia Elétrica, UFPA. Belém, 2009.

DEVELOPMENT OF AN ON/OFF-TYPE LOW COST CHARGE CONTROLLER

Abstract. *This paper presents the development of an ON/OFF charge controller with low manufacturing and maintenance costs and low self-consumption, to manage the process of charging and discharging of batteries used in autonomous photovoltaic systems. It presents in detail each block which constitute the charge controller, its estimated cost, the operational test results and also the physical structure and the data acquisition system developed for the tests.*

Key words: *Solar Energy, Charge Controller, Autonomous Photovoltaic Systems.*