

DESENVOLVIMENTO DE CONTROLADORES DE CARGA DO TIPO ON/OFF E PWM

Marcelo Pinho Almeida – marcelopa@iee.usp.br

Aimé Fleury de Carvalho Pinto Neto – afpinto@iee.usp.br

Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos – LSF, Instituto de Energia e Eletrotécnica, Universidade de São Paulo

Wilson Negrão Macêdo – wnmacedo@pq.cnpq.br

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

Resumo. *O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de controladores de baixa complexidade e reduzido auto-consumo para o gerenciamento do processo de carga e descarga de baterias chumbo-ácido empregadas em pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos. Foram projetados e construídos dois controladores: um do tipo PWM e outro do tipo On/Off, os quais não são microcontrolados e operam apenas com cargas CC. Em relação aos controladores, mostra-se o detalhamento de cada um dos blocos funcionais que os constituem, a estimativa de custo dos mesmos, 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, Controlador de carga, Sistema fotovoltaico autônomo.*

1. INTRODUÇÃO

Os controladores de carga atuais são desenvolvidos com eletrônica complexa e diversas funções que na maioria das vezes nunca são utilizadas, sem, contudo, apresentarem *setpoints* ajustáveis, sendo que seus valores fixos estão normalmente longe dos valores recomendados para as baterias de chumbo-ácido, as quais são as mais utilizadas na prática devido ao seu custo mais baixo e disponibilidade no mercado. Além disso, a complexidade da eletrônica envolvida provoca um aumento do auto-consumo, do preço, da probabilidade de falhas e da dificuldade de manutenção (Pinto e Almeida, 2009).

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de controladores de carga simples e robustos, que desempenham 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 de manutenção do sistema. O trabalho faz uma abordagem do projeto e desenvolvimento dos controladores, da estimativa de custo, dos resultados operacionais e da estrutura montada para os testes e aquisição de dados.

2. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DOS CONTROLADORES

As duas estratégias de controle mais utilizadas em modelos comerciais de controladores são a *On/Off* e à tensão constante utilizando PWM. Dois controladores de carga, cada um projetado segundo uma dessas estratégias, foram desenvolvidos com o objetivo de analisar a operação dos mesmos em sistemas fotovoltaicos autônomos reais.

Para o desenvolvimento dos controladores optou-se pela utilização da configuração série por esta apresentar algumas vantagens em relação a outras configurações (Pinto e Almeida, 2009). Optou-se, também, pela não utilização de microcontrolador, uma vez que esse componente é relativamente caro, necessita de programação e dificulta a identificação e solução de problemas. Para facilitar a localização de eventuais falhas e a substituição dos componentes com elementos comprados no comércio local (Belém/PA), o controle foi implementado com amplificadores operacionais.

As especificações nominais para ambos os controladores são 20 A e 12 V, podendo-se elevar a corrente nominal trocando apenas alguns componentes, como o fusível, os MOSFET's e os condutores internos por onde trafega a corrente nominal, por outros de maior capacidade de condução.

2.1. Controlador *On/Off*

Os *setpoints* escolhidos para o controlador *On/Off* (tensão de corte do gerador fotovoltaico TC, tensão de reconexão do gerador fotovoltaico TR, tensão de reconexão da carga TRC e tensão de desconexão da carga TDC) estão enumerados na Tab. 1, e foram definidos para baterias automotivas em conseqüência de estas serem as mais utilizadas no Brasil em pequenos sistemas autônomos. O *setpoint* mais crítico é o TDC, e seu valor foi definido para corresponder a aproximadamente 50% de profundidade de descarga máxima. 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 (Pinto e Almeida, 2009).

Tabela 1 – *Setpoints* do controlador *On/Off*.

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

Para um melhor entendimento do funcionamento do controlador, este foi dividido em três blocos funcionais: bloco de controle, bloco de alimentação e bloco de chaveamento. A Fig. 1 ilustra o diagrama de blocos do dispositivo.

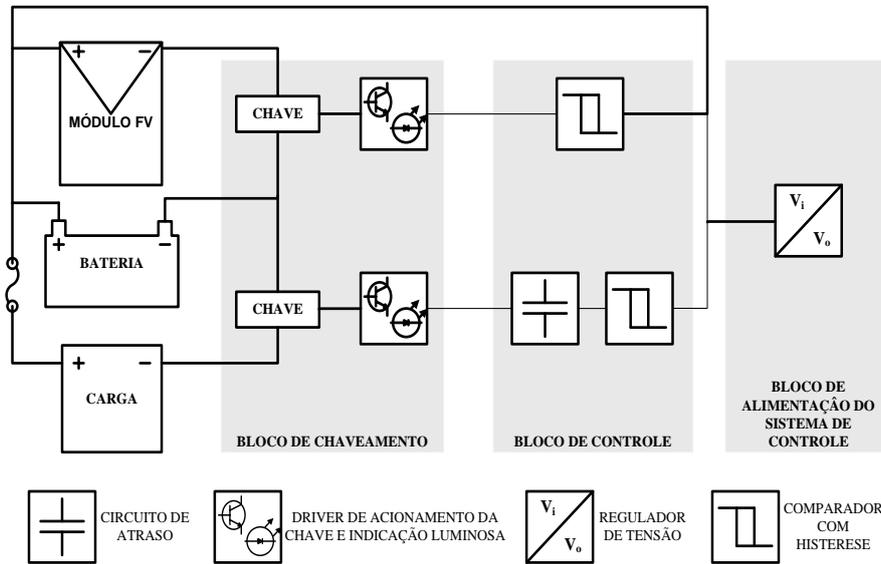


Figura 1 – Diagrama de blocos do controlador de carga *On/Off*.

As chaves eletrônicas foram posicionadas nos ramos negativos do circuito de potência, escolha que se deve 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 maior facilidade.

As conexões por onde a corrente nominal deve circular foram feitas com cabo de cobre de 6 mm² a fim de evitar a utilização de trilhas de circuito impresso para conduzir altas correntes, diminuindo as perdas e o aquecimento do conjunto. O controlador também conta com um fusível no ramo positivo entre a bateria e a carga objetivando a proteção do sistema contra sobrecorrentes nesse trecho (como no caso de curto-circuito na carga).

O elemento central do bloco de alimentação é um circuito integrado regulador de tensão ajustável alimentado pela própria bateria do sistema, cuja tensão de saída foi regulada em 6 V, valor escolhido por ser obtido com segurança a partir de tensões correspondentes a estados-de-carga baixos da bateria. A tensão de saída precisa ser estável, pois os *setpoints* dependem dela.

No bloco de controle é feita a comparação da tensão do banco de baterias com os *setpoints* e o correspondente controle da atuação das chaves. O sinal de tensão das baterias é aferido por meio de um sensor com cabeamento próprio conectado diretamente à bateria, a fim de evitar erros provenientes de quedas de tensão nos cabos por onde passa a corrente de carga e descarga, e dividido por três em um trimpot de precisão configurado como um divisor de tensão. 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 esse valor, sendo necessário, portanto, dividir por no mínimo três o sinal da bateria e dos *setpoints*.

Para comparar o sinal de tensão com os *setpoints* utilizam-se comparadores com histerese baseados em amplificadores operacionais. A Fig. 2a mostra a composição básica do comparador, o qual implementa a histerese mostrada na Fig. 2b, sendo V_{OH} e V_{OL} as tensões de saída alta e baixa, respectivamente, do amplificador e V_{TH} e V_{TL} as tensões de transição (*setpoints*) alta e baixa, respectivamente.

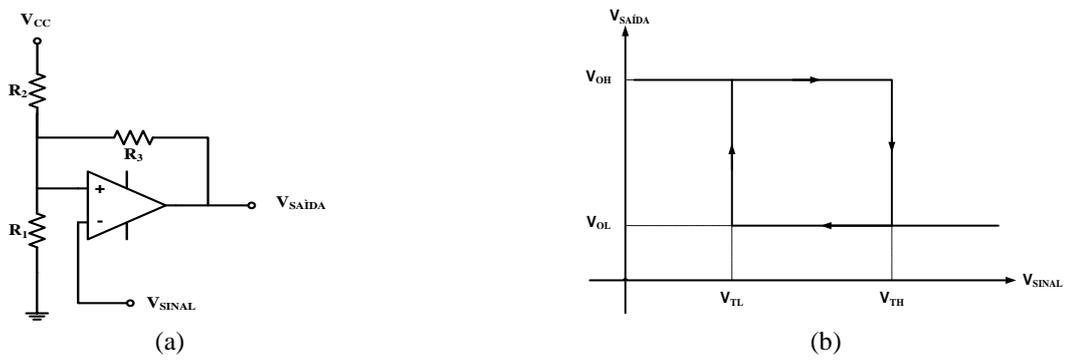


Figura 2 – (a) Circuito do comparador com histerese e (b) histerese implementada com o circuito.

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. 3.

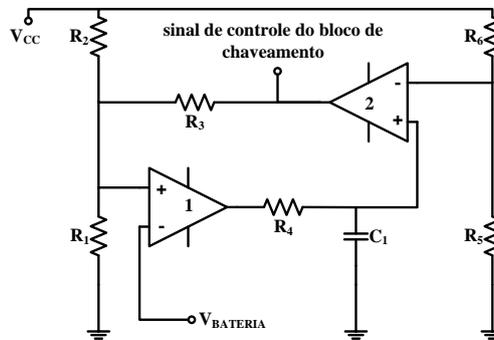


Figura 3 – Comparador com histerese e atraso.

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. (1)), considerando-se os amplificadores operacionais 1 e 2 ideais.

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

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. (2)), considerando-se novamente os amplificadores operacionais 1 e 2 ideais.

$$V_C = V_{OH} \times e^{-\frac{t_2}{R_4 C_1}} \quad (2)$$

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. (1) e (2) 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. 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.

O bloco de chaveamento compreende os *drivers* dos MOSFET's e a sinalização luminosa (através de LED's) dos estados de carregamento da bateria. As Fig. 4a e 4b mostram os diagramas esquemáticos dos circuitos de chaveamento da carga e do gerador FV, respectivamente.

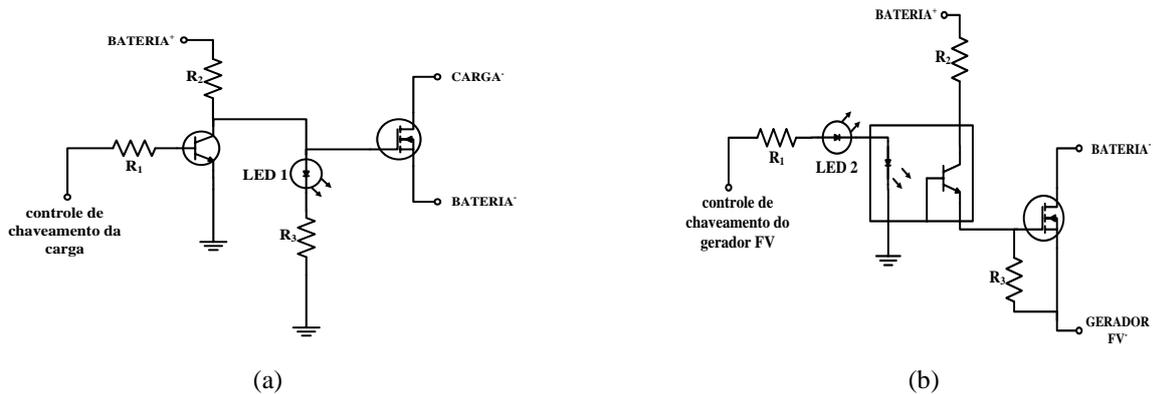


Figura 4 – Diagrama esquemático do circuito de (a) chaveamento da carga e (b) chaveamento do gerador fotovoltaico.

Os *drivers* são feitos com TJB¹s 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 à 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 figura 4 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. 2 resume o significado das indicações luminosas.

Tabela 2 – Interpretação da sinalização luminosa dos LED's.

	Ligado	Desligado
LED 1	Carga conectada às baterias	Carga desconectada das baterias
LED 2	Gerador FV conectada às baterias	Gerador FV desconectada das baterias

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 digitais e amperímetros digitais. Os testes mostraram que o controlador funciona adequadamente, de acordo com o esperado. A Tab. 3 resume os resultados obtidos nos testes para *setpoints*, auto-consumo e atrasos. É importante destacar que o valor utilizado para o atraso foi de 4 minutos, pois é observado em modelos comerciais de controladores de carga.

Tabela 3 – Resultado dos testes a vazio e com carga nominal para o controlador *On/Off*.

	<i>Setpoint</i>		Tensão (V)	Atraso (s)	Auto-consumo (mA)
	Teste a vazio	Gerador FV	TC	14,39	-
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, contudo não representam problemas para o funcionamento adequado do controlador.

¹ TJB: Transistor de Junção Bipolar.

2.2. Controlador PWM

Este controlador, ao contrário do *On/Off*, apresenta duas etapas de carga: uma sem modulação, até um valor máximo de tensão, e outra com modulação, a fim de manter a bateria em flutuação. Durante o carregamento, o controlador primeiramente permite que a corrente que o gerador fotovoltaico pode fornecer seja entregue à bateria; com isso, a tensão terminal do acumulador se eleva até atingir a TC, quando ocorre a desconexão do gerador. Dessa forma, a tensão terminal da bateria diminui, e, quando esta atingir a TF, a segunda etapa de carregamento é ativada e a tensão da bateria permanece em flutuação através do controle de chaveamento feito por um modulador PWM. O processo da primeira etapa só é reativado caso a tensão do acumulador atinja a TR. A figura 5 ilustra essas duas etapas.

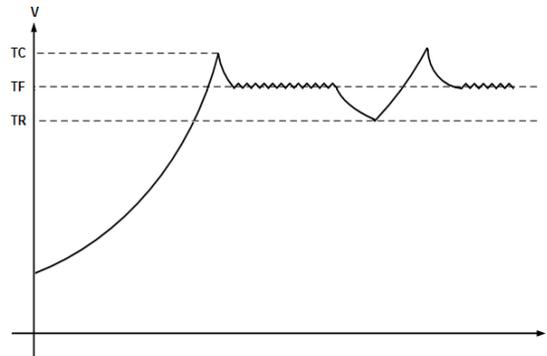


Figura 5 – Representação da tensão terminal da bateria durante o carregamento utilizando-se o controlador PWM.

Os *setpoints* utilizados nesse controlador (tensão de corte do gerador fotovoltaico TC, tensão de flutuação TF, tensão de reconexão do gerador fotovoltaico TR, tensão de reconexão da carga TRC e tensão de desconexão da carga TDC) estão enumerados na Tab. 4, e também foram definidos para baterias automotivas de chumbo-ácido.

Tabela 4 – *Setpoints* do controlador PWM.

TC	TF	TR	TRC	TDC
14,4 V	13,8 V	13,6 V	13,2 V	11,8 V

Assim como o *On/Off*, o controlador PWM foi dividido em três blocos funcionais: bloco de controle, bloco de alimentação e bloco de chaveamento. A Fig. 6 mostra o diagrama de blocos do equipamento.

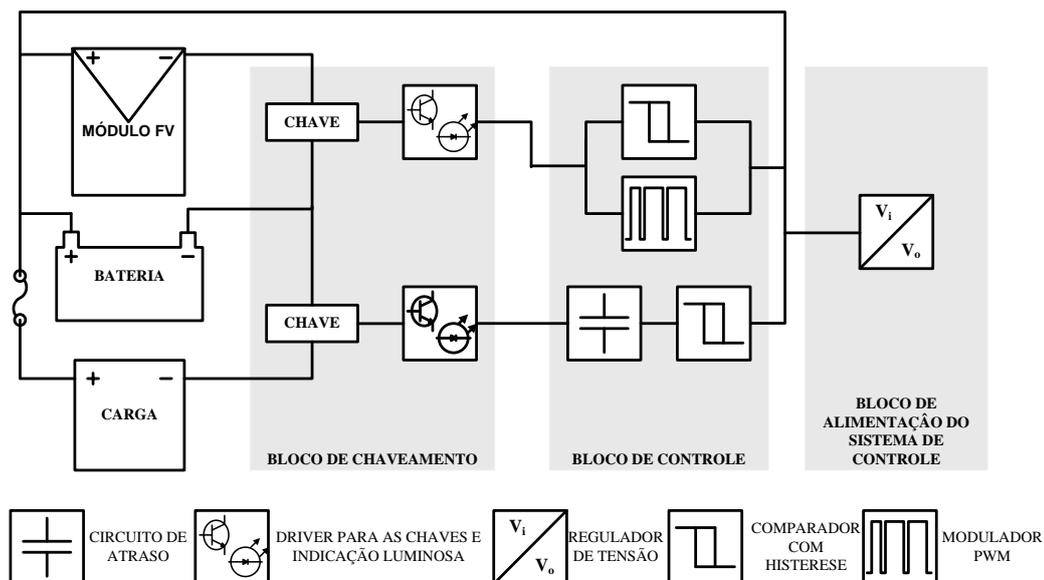


Figura 6 – Diagrama de blocos do controlador de carga PWM.

Percebe-se que poucas alterações foram feitas em relação ao controlador *On/Off*. A principal diferença está no bloco de controle, onde um modulador PWM foi acrescentado. As conexões por onde a corrente nominal deve circular

também foram feitas com cabo de cobre de 6 mm² e um fusível foi posicionado no ramo positivo de conexão entre a bateria e a carga.

O bloco de alimentação do sistema de controle é idêntico ao do controlador *On/Off*, visto que a tensão de alimentação dos componentes deste controlador também é feita em 6 V.

O bloco de controle engloba as estruturas responsáveis pelas duas etapas de carregamento, além do controle responsável pela proteção contra descargas profundas, o qual é exatamente igual ao do controlador *On/Off*. A fim de implementar a etapa de carregamento sem modulação, utilizou-se um comparador com histerese e, para o modulador PWM, foram utilizadas duas estruturas simples: um gerador de onda triangular (Fig. 7) e um comparador de tensão.

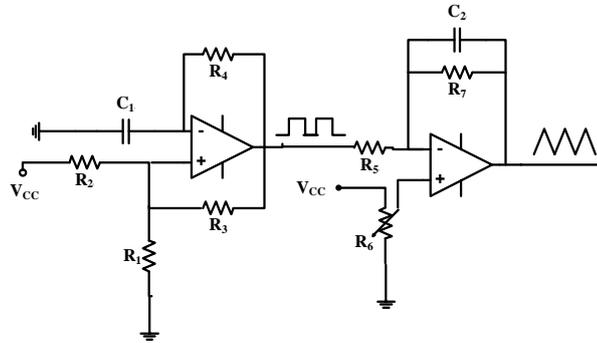


Figura 7 – Gerador de onda triangular.

O gerador de onda triangular consiste em um gerador de onda quadrada cuja saída passa por um integrador, resultando em uma onda triangular. A frequência da onda é dada pela Eq. (3) e o valor pico a pico é dado pela Eq. (4) (Malvino, 1997).

$$f = \frac{1}{2C_1R_4} \quad (3)$$

$$V_{pp} = \frac{V_{OH}}{4fR_5C_2} \quad (4)$$

Ajustando R6 pode-se adicionar um nível CC a onda triangular. Esse nível deve coincidir com a TF, ou seja, o valor médio da onda deve ser igual a TF.

Para se obter a modulação por largura de pulso, o sinal de tensão da bateria é comparado com a onda triangular, cuja frequência foi ajustada em 300 Hz (Oliveira, 2005), de forma que, quando a tensão do acumulador for menor que a onda triangular, um sinal para conectar o gerador fotovoltaico é enviado para o bloco de chaveamento. Na medida em que a tensão da bateria aumenta devido ao carregamento, diminuem o tempo em que ela é menor que a onda triangular e a duração do sinal para manter o gerador conectado, reduzindo, assim, a largura dos pulsos de corrente.

Quando a tensão da bateria ultrapassa o valor máximo da onda triangular, a duração do pulso se torna zero. Sem pulso algum de corrente, a tensão diminui fazendo com que a duração dos pulsos seja diferente de zero novamente. Isso faz com que a tensão da bateria, enquanto o carregamento estiver na etapa de flutuação, sempre esteja dentro dos limites da onda triangular, e, sendo a amplitude da onda bem pequena (no caso a amplitude pico-a-pico escolhida foi de 0,1 V), a tensão média da bateria permanece próxima do valor da componente CC da onda triangular. A Fig. 8 ilustra a modulação da largura dos pulsos com a variação da tensão da bateria.

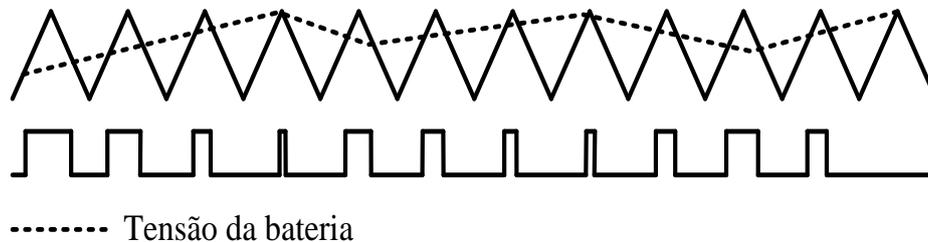


Figura 8 – Variação da largura dos pulsos durante a etapa de flutuação.

Para realizar a mudança entre as duas etapas de carregamento, na saída dos amplificadores operacionais responsáveis pelo sinal que será enviado ao bloco de chaveamento colocou-se uma porta lógica OU feita com diodos. A Fig. 9 mostra a estrutura da porta, onde LED's foram utilizados como diodos a fim de indicar qual etapa de carregamento está ativa.

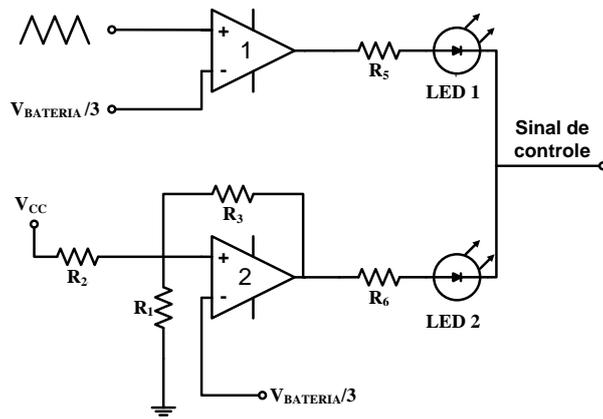


Figura 9 – Amplificadores operacionais (1) do comparador do modulador PWM, responsável pela segunda etapa de carregamento, e (2) do comparador com histerese, responsável pela primeira etapa de carregamento, seguidos da porta lógica OU implementada com LED’s.

Vale ressaltar que o *setpoint* de reconexão do gerador FV (TR) precisa ser inferior à tensão de flutuação do modulador PWM; caso contrário, a etapa de flutuação nunca será ativada. A Tab. 5 mostra a interpretação da sinalização luminosa dos LED’s.

Tabela 5 – Interpretação da sinalização luminosa dos LED’s do bloco de controle do controlador PWM.

LED 1	Indiferente	Etapa de carga sem modulação ativada
LED 2	Ligado	
LED 1	Desligado	Gerador FV desconectado
LED 2	Desligado	
LED 1	Ligado/piscando	Etapa de flutuação ativada
LED 2	Desligado	

Finalmente, o bloco de chaveamento é semelhante ao do controlador *On/Off*; a única diferença está no fato de que os LED’s de indicação do chaveamento do módulo estão no bloco de controle.

Nos testes preliminares do controlador PWM foram utilizados os mesmos equipamentos dos testes do *On/Off*. O controlador funcionou 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 a plena carga para o controlador PWM.

		<i>Setpoint</i>	Tensão (V)	Atraso (s)	Auto-consumo (mA)
Teste a vazio	Gerador FV	TC	14,40	-	8,50
		TF	13,80	-	
		TR	13,57	-	
	Carga	TRC	13,31	5s	
		TDC	11,83	4min50s	
Teste a plena carga	Gerador FV	TC	14,39	-	8,50
		TF	13,80	-	
		TR	13,58	-	
	Carga	TRC	13,32	5s	
		TDC	11,84	4min45s	

As diferenças entre os valores de *setpoints* e atrasos são justificadas da mesma maneira que para o controlador *On/Off*.

3. ESTIMATIVA DE CUSTOS

Na estimativa de custo levaram-se em consideração todos os componentes eletrônicos, a placa de circuito impresso, cabos de cobre, barra de sinal e solda. Custos com acabamento e mão-de-obra não foram considerados. As Tab. 7 e 8 apresentam os resultados para os controladores *On/Off* e PWM, respectivamente, com valores obtidos no mercado local (Belém/PA).

Tabela 7 – Levantamento de custo para o controlador de carga *On/Off* (20 A e 12 V).

Item	Quantidade	Preço Unitário [R\$] ²	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 unidades	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

Tabela 8 – Levantamento de custo para o controlador de carga PWM (20 A e 12 V).

Item	Quantidade	Preço Unitário [R\$] ³	Preço Total [R\$]
Resistor	29 unidades	0,10	2,90
Trimpot de precisão	3 unidade	1,50	4,50
Regulador de tensão ajustável	1 unidade	3,00	3,00
CI com 4 amplificadores oper.	2 unidade	1,00	2,00
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	3 unidades	0,20	0,60
Opto acoplador	1 unidade	3,00	3,00
TBJ	1 unidade	0,30	0,30
Capacitor	5 unidades	0,40	2,00
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	36,05

4. RESULTADOS DOS TESTES OPERACIONAIS

Os testes operacionais dos controladores consistiram em avaliar os ciclos de carga e descarga, possibilitando observar o chaveamento adequado para cada *setpoint*. Cada 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.

4.1. Sistemas fotovoltaicos montados para os testes

Foram montados dois sistemas fotovoltaicos autônomos, cada um possuindo 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; um dos controladores de carga desenvolvidos; e um banco de lâmpadas halógenas CC utilizado como carga, com potência total de 100 W. Deve-se lembrar de que as mesmas precauções para descargas profundas e sobrecargas tomadas para as baterias automotivas também são válidas para as estacionárias. A Fig. 10 ilustra os sistemas montados.

² Data do levantamento de preço: junho de 2008.

³ Data do levantamento de preço: junho de 2008.

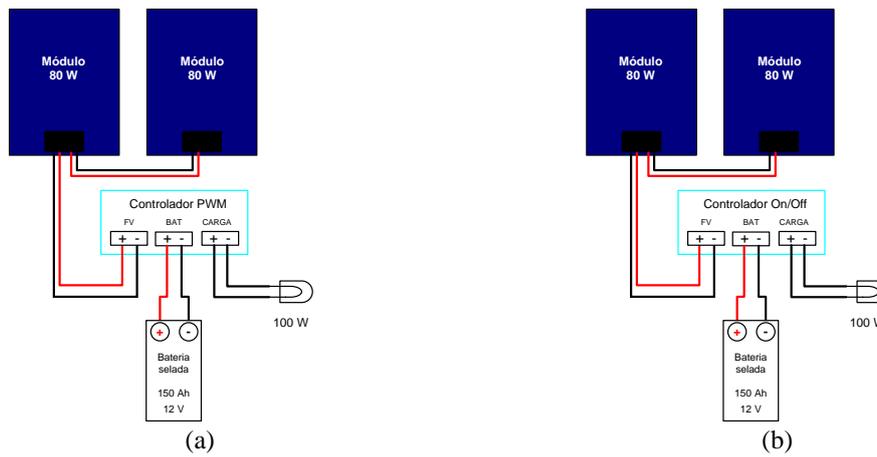


Figura 10 – Sistemas fotovoltaicos montados para os testes operacionais com (a) o controlador PWM e com (b) o controlador *On/Off*.

4.2. 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 para cada sistema fotovoltaico.

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. As Fig. 11a e 11b mostram a interface do *software* para cada sistema.

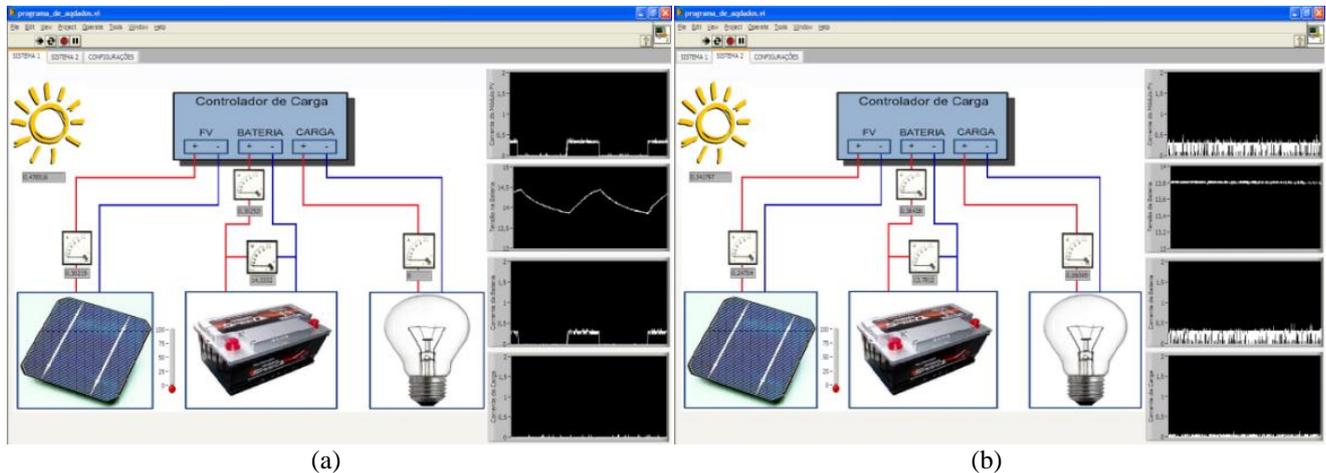


Figura 11 – Interface do *software* de aquisição de dados para o sistema com (a) o controlador *On/Off* e (b) o controlador PWM. Pode-se perceber o chaveamento característico para cada tipo de controlador.

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.

4.3. Procedimentos adotados nos testes operacionais

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

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

4.3. Resultados

As curvas de carga e descarga da bateria para o sistema com o controlador *On/Off* são mostradas nas Fig. 13 e 14, respectivamente. As curvas para o sistema com o controlador PWM são mostradas nas Fig. 15 e 16, respectivamente para a carga e descarga. As curvas de carregamento para ambos os controladores apresentam falhas devido a quedas de energia que ocorreram na rede convencional durante o período dos testes, desligando o sistema de supervisão.

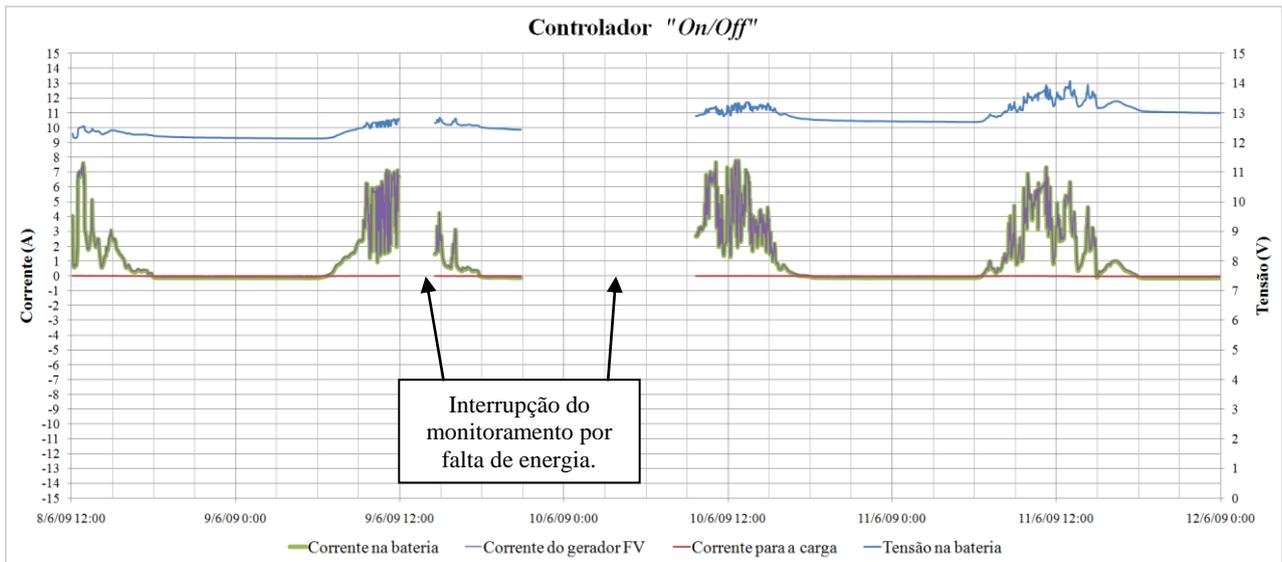


Figura 13 – Curva de carga da bateria para o sistema com o controlador *On/Off*.

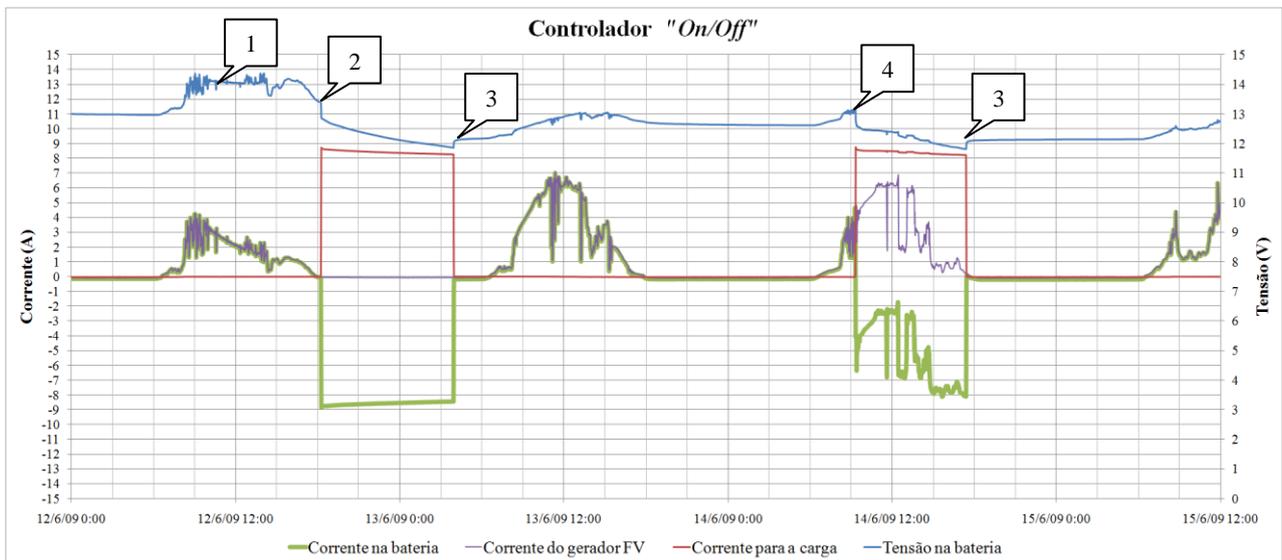


Figura 14 – Curva de descarga da bateria para o sistema com o controlador *On/Off*. 1: Regulação de tensão pelo controlador *On/Off*; 2: Conexão manual da carga; 3: Desconexão da carga pelo controlador por baixa tensão (TDC); 4: Reconexão da carga pelo controlador (TRC).

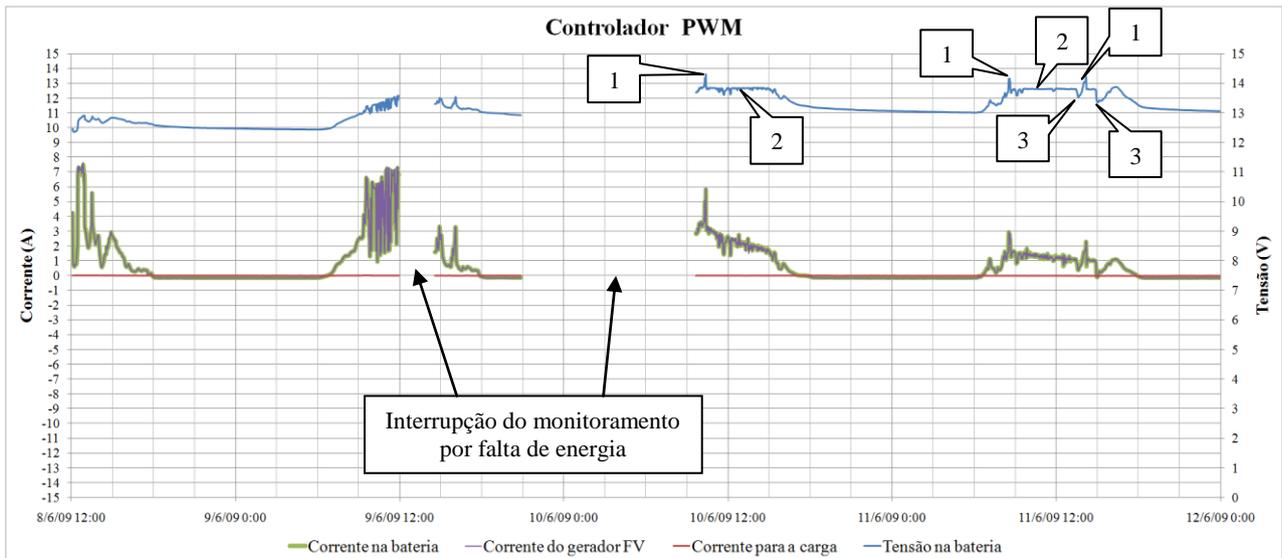


Figura 15 – Curva de carga da bateria para o sistema com o controlador PWM. 1: Término da primeira etapa de carregamento e início da modulação por PWM (TC); 2: Regulação de tensão por modulação PWM (TF); 3: Término da modulação por PWM e retorno à primeira etapa de carregamento (TR).

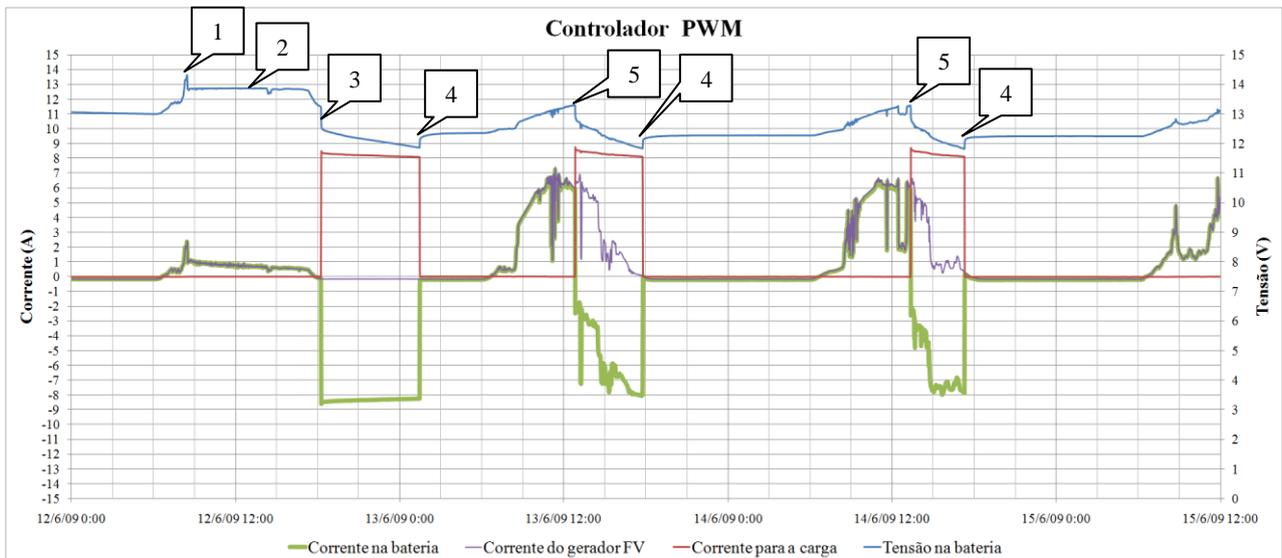


Figura 16 – Curva de descarga da bateria para o sistema com o controlador PWM. 1: Término da primeira etapa de carregamento e início da modulação por PWM (TC); 2: Regulação de tensão por modulação PWM (TF); 3: Conexão manual da carga; 4: Desconexão da carga pelo controlador por baixa tensão (TDC); 5: 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.

Outra curva interessante é a da forma de onda da corrente do módulo quando o PWM está operando. A Fig. 17 mostra três momentos diferentes durante a operação do PWM, registrados com um osciloscópio analógico conectado à saída do transdutor de corrente do módulo. Pode-se perceber a variação da amplitude dos pulsos de corrente de maneira inversamente proporcional à intensidade da corrente com o objetivo de manter a tensão média constante na bateria.

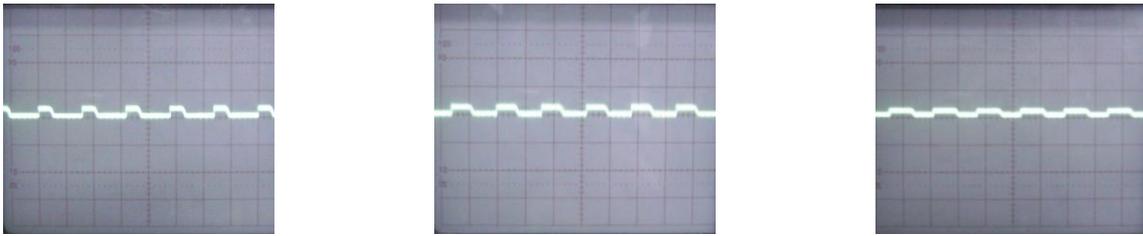


Figura 17 – Curvas da forma de onda da corrente do módulo durante a operação do PWM.

8. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o projeto e os resultados dos testes operacionais de dois controladores de carga desenvolvidos para pequenos sistemas fotovoltaicos. Eles se mostraram competentes no desempenho de suas funções, podendo ser utilizados na prática. Além disso, são de fácil construção, podendo ser montados por qualquer pessoa com alguma experiência com circuitos eletrônicos.

Os *setpoints* foram definidos para baterias de chumbo-ácido genéricas, contudo, com um pequeno ajuste dos valores dos resistores dos circuitos comparadores pode-se obter valores de *setpoints* desejados. Dessa forma, os controladores podem ser utilizados com uma grande variedade de baterias.

9. 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.

REFERÊNCIAS

- 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.
- Malvino, Albert Paul, “Eletrônica”. Makron Books (Grupo Pearson), 4ª edição. São Paulo, 1997.
- Oliveira, L. G. M., 2005. Estratégias de Controle de Carga e Descarga em Sistemas Fotovoltaicos. Dissertação de Mestrado, PIPGE, USP. São Paulo, 2005.

DEVELOPMENT OF AN ON/OFF AND A PWM CHARGER CONTROLLERS

Abstract. *This paper presents the development of low complexity and low self-consumption charger controllers for the management of loading and discharging processes of lead-acid batteries used in small stand-alone photovoltaic systems. Two controllers were designed and built: a PWM and an On / Off, which do not use microcontroller and operate only with DC loads. Concerning the controllers, it is shown the specificities of each functional block that constitute them, their estimated cost, the operational test results and details of the physical structure and the data acquisition system developed for the tests.*

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