

CONTROLE DE CARGA DE BANCOS DE BATERIAS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO UMA ARQUITETURA SEGMENTADA

Arthur Ribeiro Pereira Lugon (UFES) - arthurlugon@gmail.com

Marco Galdino (Cepel) - marcoag@cepel.br

Eduardo Amorim Benincá (UFES) - eduardoamorimb@hotmail.com

Claudio Moises Ribeiro (UFES) - claudio.ribeiro@ufes.br

Resumo:

O amplo uso de sistemas fotovoltaicos isolados operando em baixa tensão (12 ou 24 Volts) levou à disponibilidade de controladores de carga e inversores off-grid de boa qualidade e baixo custo para estas faixas de tensão de operação. A adoção de bancos de baterias operando com tensões mais elevadas enfrenta uma menor disponibilidade de produtos, além de custos proporcionalmente mais altos. Contudo, eficiências mais elevadas podem ser alcançadas com tensões mais altas devido às menores correntes e, conseqüentemente, menores perdas ôhmicas, além de possivelmente melhores eficiências dos inversores. Este artigo descreve uma experiência de implantação de um sistema fotovoltaico com o uso de cinco controladores 12/24 V para gerenciar a carga de um banco de baterias com tensão nominal de 108 V, com 9 unidades Chumbo-ácido 12 V em série. Este objetivo foi alcançado com a segmentação do painel fotovoltaico em subpainéis operando em potencial flutuante. A referida estratégia foi adotada na reforma do carrinho elétrico do Cresesb/Cepel, movido por um motor de indução trifásico, acionado por um inversor de frequência, e alimentado com energia solar. O objetivo principal do uso da tensão DC de 108 V foi alimentar diretamente o inversor de frequência, o que não se mostrou viável, exigindo assim também o uso de um inversor de tensão. A estratégia foi testada e mostrou-se adequada e suficientemente robusta no que tange ao controle de carga do banco, permitindo operá-lo nesta tensão não convencional, utilizando equipamentos comercialmente disponíveis, demonstrando que esta pode ser uma opção tecnicamente viável. Ensaios de longo prazo são necessários para avaliar seu desempenho e prováveis vantagens. Um sistema de aquisição de dados foi projetado para operar embarcado no carrinho e encontra-se em fase final de testes. Dados correspondentes a um dia de operação são mostrados e analisados.

Palavras-chave: controle de carga de baterias, bancos de baterias, veículos elétricos

Área temática: Conversão Fotovoltaica

Subárea temática: Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados

CONTROLE DE CARGA DE BANCOS DE BATERIAS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO UMA ARQUITETURA SEGMENTADA

Arthur Ribeiro Pereira Lugon – arthurlugon@gmail.com

UFES-Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde (CCENS)

Marco Antonio Galdino – marcoag@cepel.br

Eletrobras Cepel-Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Rio de Janeiro-RJ

Eduardo Amorim Benincá - eduardoamorimb@hotmail.com

Claudio Moises Ribeiro – claudio.ribeiro@ufes.br

UFES-Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde (CCENS)

Resumo. O amplo uso de sistemas fotovoltaicos isolados operando em baixa tensão (12 ou 24 Volts) levou à disponibilidade de controladores de carga e inversores off-grid de boa qualidade e baixo custo para estas faixas de tensão de operação. A adoção de bancos de baterias operando com tensões mais elevadas enfrenta uma menor disponibilidade de produtos, além de custos proporcionalmente mais altos. Contudo, eficiências mais elevadas podem ser alcançadas com tensões mais altas devido às menores correntes e, consequentemente, menores perdas ôhmicas, além de possivelmente melhores eficiências dos inversores. Este artigo descreve uma experiência de implantação de um sistema fotovoltaico com o uso de cinco controladores 12/24 V para gerenciar a carga de um banco de baterias com tensão nominal de 108 V, com 9 unidades Chumbo-ácido 12 V em série. Este objetivo foi alcançado com a segmentação do painel fotovoltaico em subpainéis operando em potencial flutuante. A referida estratégia foi adotada na reforma do carrinho elétrico do Cresesb/Cepel, movido por um motor de indução trifásico, acionado por um inversor de frequência, e alimentado com energia solar. O objetivo principal do uso da tensão DC de 108 V foi alimentar diretamente o inversor de frequência, o que não se mostrou viável, exigindo assim também o uso de um inversor de tensão. A estratégia foi testada e mostrou-se adequada e suficientemente robusta no que tange ao controle de carga do banco, permitindo operá-lo nesta tensão não convencional, utilizando equipamentos comercialmente disponíveis, demonstrando que esta pode ser uma opção tecnicamente viável. Ensaios de longo prazo são necessários para avaliar seu desempenho e prováveis vantagens. Um sistema de aquisição de dados foi projetado para operar embarcado no carrinho e encontra-se em fase final de testes. Dados correspondentes a um dia de operação são mostrados e analisados.

Palavras-chave: controle de carga de baterias, bancos de baterias, veículos elétricos

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do presente trabalho foi efetuada uma reforma e atualização (*upgrade*) no carrinho elétrico solar do Cresesb/Cepel, adotando-se uma configuração mais eficiente para seu sistema elétrico e melhorando seu desempenho. Entre as condicionantes deste trabalho estava ainda a de utilizar, onde possível, os equipamentos já disponíveis em estoque no Cepel, principalmente controladores de carga e módulos fotovoltaicos, embora não sendo de fabricação recente. Não foram considerados aspectos econômicos no projeto, uma vez que um melhor desempenho do carrinho, utilizando itens disponíveis, foi a prioridade. Também não se considerou por ora uma maior modificação no sistema mecânico de tração original, baseado em um motor de indução trifásico com caixa de redução e transmissão por corrente. Optou-se por limitar as mudanças à parte elétrica do carro, mantendo-se, inclusive, o motor original.

Visando melhorar a eficiência e o desempenho do carrinho solar, uma das opções adotadas foi o aumento de sua tensão DC de operação, originalmente de 24 V_{dc}. Uma tensão mais elevada no banco de baterias reduz quedas de tensão e perdas ôhmicas e permite o uso de condutores de menor bitola e custo. Os inversores geralmente também têm melhor eficiência. Por outro lado, componentes e equipamentos eletrônicos para níveis de tensão de operação mais elevados são mais caros e mais difíceis de encontrar no mercado.

No que se refere ao controlador de carga para o banco de baterias, havia disponibilidade de unidades MorningStar ProStar-12, com tensão de operação 12 ou 24 V, com detecção automática. De forma a permitir a utilização destes controladores num banco de tensão mais elevada, optou-se por segmentar o banco de baterias, e, por conseguinte, também o painel fotovoltaico. Esta arquitetura é mostrada com mais detalhes adiante no item 2.

O dimensionamento de bancos de baterias implica, normalmente, na associação de unidades em série e/ou em paralelo. Ambas as alternativas têm desvantagens relacionadas a uma possível dispersão de parâmetros elétricos na fabricação e durante a operação das baterias, levando a regimes de uso diferenciados e, consequentemente, desempenho e vida útil distintos. No caso do carrinho, trata-se apenas de associação em série.

Gallardo-Lozano *et al.* (2014) mencionam que o desbalanceamento das células é causado por duas principais razões: internas, consistindo de diferenças na fabricação como variação do volume físico, variação na impedância

interna e diferenças na taxa de autodescarga; e externas, como variação de temperatura ao longo de uma unidade (monobloco de 12 V, com 6 células). Esta análise, conduzida para uma célula dentro de uma unidade pode ser extrapolada para uma unidade dentro de um banco de baterias. Gallardo-Lozano *et al.* (2014) sustentam, ainda, que um sistema de baterias sem uma técnica de balanceamento de carga pode levar algumas de suas células a serem sobrecarregadas, insuficientemente carregadas ou mesmo excessivamente descarregadas. Danos causados pelo desbalanceamento podem ser classificados em quatro grupos: o primeiro está relacionado com a degradação prematura em função da exposição a sobretensões; o segundo grupo engloba riscos à segurança associados a células sobrecarregadas que podem induzir reações entre os elementos ativos e/ou superaquecer, resultando em explosão e fogo; o terceiro grupo é baseado na interrupção prematura do carregamento, resultando em capacidade reduzida se o processo de carga é interrompido quando a tensão de uma das células excede o limite superior estabelecido; finalmente, o quarto grupo contempla a interrupção prematura da descarga quando uma das células atinge seu limite inferior de tensão.

Embora não apresentem lastro para tal afirmação, Kutkut *et al.* (1998) afirmam que a vida útil de baterias sob ciclos de operação normais, tendem a degradar quase exponencialmente quando o número de unidades conectadas em série (*string*) aumenta. Eles também reforçam que equalização da carga para baterias conectadas em série possui importantes implicações na vida das baterias. Baterias conectadas em série estão sujeitas a uma redução dramática na vida útil e dano potencial se correntes elevadas são mantidas após o início da gaseificação (borbulhamento). Segundo Gallardo-Lozano *et al.* (2014) equalização é necessária para manter a energia das células balanceada e estender a vida. Sugerem que os métodos de balanceamento podem ser divididos em três grupos principais: seleção de baterias com propriedades similares durante a construção do banco; métodos passivos; e métodos ativos, quando circuitos externos com controle ativo são utilizados.

Uma alternativa para lidar com o problema associado à conexão série de baterias (e/ou módulos fotovoltaicos) é através de estruturas segmentadas ou em cascata. Bancos de baterias (ou painéis fotovoltaicos) são subdivididos de forma que cada bloco trabalhe com tensões mais baixas, tendo, cada bloco, um número menor de unidades conectadas em série. Desconzi *et al.* (2011), Bratcu *et al.* (2011) e Walker & Sernia (2004) tratam de estruturas em cascata sob diferentes perspectivas. Nota-se que estas estruturas em cascata podem ser encontradas antes ou depois dos barramentos DC, com subpainéis (painéis segmentados), ou inversores de múltiplos níveis, respectivamente. Estas estruturas são mais comuns nos sistemas conectados à rede.

Desconzi *et al.* (2011), propõe uma estrutura em que a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos em um sistema autônomo é processada por diversos conversores MPPT, cada conversor com sua respectiva *string*. O sistema de armazenamento também é subdividido de acordo com o número de strings do painel fotovoltaico. E a saída pode ser entendida como um inversor multiníveis em que se trabalha com dispositivos eletrônicos de tensão mais baixa.

Walker & Sernia (2004) propõem uma topologia em que cada módulo fotovoltaico é conectado a um conversor DC-DC e os mesmos são conectados em série para alimentar um único conversor DC-AC. Sustentam que a alternativa proposta é mais atraente que a ideia de um inversor (conversor DC-AC) por módulo (microinversor).

Este trabalho trata da aplicação de uma estrutura em cascata (*multi-string*) usando controladores de carga convencionais em um pequeno veículo elétrico solar.

2. SISTEMA ELÉTRICO DO CARRINHO SOLAR

A Fig. 1 mostra a configuração anterior e a Fig. 2 a configuração atual, detalhada a seguir. Essencialmente o que muda é a tensão do banco de baterias e o fato de que o banco e o painel foram segmentados, além da incorporação de um sistema de aquisição de dados.

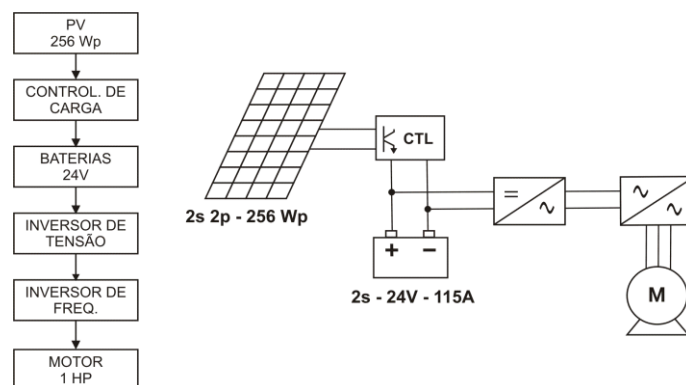


Figura 1 - Configuração anterior do sistema elétrico do carro

Nos subitens a seguir são descritas as características dos equipamentos utilizados e da configuração adotada para a atualização do sistema elétrico do Carrinho Solar do Cresesb.

2.1 Equipamentos utilizados

O propósito do sistema fotovoltaico do carrinho elétrico solar (Cresesb, 2009 e Lugon, 2018) é o acionamento de seu motor elétrico de tração, um motor de indução trifásico, 1 HP, 220/380 V, sendo algumas de suas características disponibilizadas na Tab. 1, transcritas de seus dados de placa. Este motor era originalmente acoplado a uma ventoinha para arrefecimento independente, dotada de motor próprio (*blower*) de ½ HP, de forma que o conjunto totalizava 1,5 HP.

Tabela 1 – Motor elétrico do Carrinho Solar

Motor Elétrico	Potência	1 HP
	Tensão de operação	220/380 V
	Rotação	1725 rpm
	Eficiência	78%
	Fator de potência	0,8
Arrefecimento (<i>blower</i>)	Potência	0,5 HP
	Tensão de operação	220/380 V
	Rotação	3360 rpm
	Eficiência	68,4%
	Fator de potência	0,83

No *upgrade* efetuado, foi mantido o motor elétrico de tração original, todavia, o *blower* foi eliminado e uma ventoinha convencional foi adaptada mecanicamente ao eixo deste motor. Para o acionamento do motor, foi utilizado um inversor de frequência WEG modelo CFW-10, o qual aciona o motor elétrico de tração em velocidade variável. O CFW-10 possui entrada monofásica de 127 V e saída trifásica de 220 V sendo, por sua vez, alimentado por um inversor de tensão ICHM 125-100C, modelo PlusWatt 1000, fabricado pela Empresa Powerbras (Rio de Janeiro-RJ). Este inversor possui tensão de saída AC com forma de onda quase-senoidal de 127 V e tensão DC nominal de entrada de 125 V, esta com faixa de operação permitida entre 100 e 144 V.

Conforme já mencionado, foi adotado o controlador de carga tipo PWM fabricado pela empresa MorningStar, modelo ProStar-12, disponível no Cepel, cujas características relevantes são mostradas na Tab. 2, extraídas do *datasheet* do fabricante. Este modelo de controlador permite ajuste dos valores de tensão de operação (*set-points*), tendo sido adotado o ajuste destinado a baterias seladas (*sealed*). Não foi utilizado sensor externo de temperatura da bateria no controlador de carga, desta forma, a compensação de temperatura das tensões de carga ($-5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C.célula}$) é feita por meio da temperatura ambiente medida pelo sensor interno do controlador.

Tabela 2 – Controlador de carga MorningStar Prostar PS-12
(tensões referidas à temperatura de 25°C, baterias seladas)

Corrente máxima do painel fotovoltaico	12 A
Tensão máxima do painel fotovoltaico	50 V
Corrente máxima da carga	8 A
Autoconsumo	10 – 12 mA
Tensão de desconexão por baixa tensão – LVD (<i>low voltage load disconnect</i>)	11,4 / 22,8 V
Tensão de reconexão da carga – LVR (<i>low voltage load reconnect</i>)	12,5 / 25,0 V
Tensão de carga (<i>constant voltage regulation</i>)	14,1 / 28,2 V
Tensão de flutuação	13,7 V / 27,4
Tensão de equalização	14,35 / 28,7 V
Tensão de desconexão por sobretensão – HVD (<i>high voltage disconnect</i>)	15,5 / 31,0 V

A bateria selecionada foi a Unipower modelo UP12280, que é uma bateria Chumbo-ácido selada (sem manutenção) tipo VRLA (*valve regulated lead acid*), de tensão nominal 12V_{dc}, cujas características são disponibilizadas na Tab. 3.

Tabela 3 – Bateria Unipower UP12280

Capacidade nominal @C ₂₀ (descarga até 10,5 V)	28 Ah
Tensão de carga em tensão constante	14,1 – 14,4 V
Tensão de flutuação	13,5 – 13,8 V
Autodescarga (25°C)	3%/mês (equivalente a 1,17 mA)
Peso	8,38 kg

Foram utilizados módulos fotovoltaicos Solarex modelo MSX-20, de silício multicristalino, cujos dados são apresentados na Tab. 4. A utilização deste modelo de módulo também se deu em função de sua disponibilidade no estoque do Cepel, além de sua adequação às dimensões físicas do carrinho solar existente.

Tabela 4 – Módulo Fotovoltaico Solarex MSX-20 (condições padrão)

Número de células	36
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	21,0 V
Corrente de curto-circuito (I _{sc})	1,29 A
Tensão de máxima potência (V _{mp})	16,8 V
Corrente de máxima potência (I _{mp})	1,19 A
Peso	3,0 kg
Área	0,22 m ²

2.2 Dimensionamento

Para obter-se a tensão no barramento DC compatível com a faixa de operação do inversor ICHM 125-100C optou-se por utilizar nove baterias UP12280 em série, totalizando, nominalmente, 108 V. Considerando os valores de tensão dos ajustes (*set-points*) do controlador de carga ProStar-12 (Tab. 2), este banco opera entre 11,4 e 14,35 V por unidade, o que totaliza 102,6 e 129,15 V, respectivamente, para a associação das nove baterias em série, faixa compatível com o inversor de tensão. Uma alternativa considerada foi a de alimentar o inversor de frequência diretamente no barramento DC, dispensando o uso de um inversor de tensão, mas o modelo CFW-10 não funcionou desta forma. Sabe-se que o uso de um inversor de frequência com tensão de entrada de 220 V, a depender do modelo (Brito, 2006), poderia permitir a alimentação diretamente no barramento DC, mas esta opção implicaria numa associação de um número muito maior de módulos e baterias em série, o que se tornava incompatível com as dimensões do carrinho, para uso dos equipamentos disponíveis.

Para operar com o banco de baterias descrito, são necessários nove módulos fotovoltaicos MSX-20 conectados em série. Tanto este painel fotovoltaico, quanto o banco de baterias, foram segmentados em cinco partes, de forma que as baterias são carregadas de maneira independente por cinco controladores de carga, quatro deles operando em 24 V_{dc} e um operando em 12 V_{dc}. A Fig. 2 mostra o esquema de ligação da configuração adotada para o sistema fotovoltaico além de um conjunto de sensores, explicados mais adiante, no item 3.

Conforme demonstrado, o inversor de tensão é compatível com o banco de baterias com nove unidades em série, embora o valor de LVD do controlador (11,4 V_{dc}) não permita que a bateria descarregue toda a sua capacidade nominal, que é especificada para 10,5 V. Por outro lado, desta forma, as baterias são protegidas contra descargas profundas, preservando sua vida útil.

A corrente DC para operação do carrinho com o motor elétrico em potência nominal foi calculada em 14,08 A, considerando-se as eficiências nominais do motor (78%), do inversor de frequência WEG CFW-10 (92,5%) e do inversor de tensão Powerbras ICHM 125-100C (85%). Para fins de comparação, na configuração original do carrinho, que operava em 24 V, esta corrente DC era de 56,48 A (a corrente para alimentação do *blower* se soma a esta). A autonomia do carrinho para a corrente de descarga das baterias de 14,08 A foi calculada em 1,27h, a partir da curva de tempo de descarga (h) X corrente (A) da bateria Unipower UP12280, disponibilizada pelo fabricante. De forma análoga, a autonomia da configuração anterior foi calculada em 53 minutos (considerando o motor e o *blower*). Nesta análise simplificada não foram consideradas as perdas ôhmicas, o que tornaria ainda mais desfavorável a configuração original.

Deve-se observar que, em termos de energia disponível no banco de baterias, a nova configuração adotada possui cerca de 10% maior capacidade (3.024 Wh, 108 V) do que a configuração original (2.760 Wh, 24 V). Quanto ao peso, porém, o novo banco fica em desvantagem, pois pesa 75,42 kg, o que representa cerca de 38% a mais do que o banco da configuração original (54,6 kg). Em termos de densidade energética verifica-se que a da nova configuração (40,1 Wh/kg) é 20% menor do que a anterior.

Observa-se que a potência de pico do novo painel é de 180 Wp, bastante inferior à do painel original, de 256 Wp, porém, uma vez que o carrinho é utilizado por períodos curtos e permanece a maior parte do tempo em carga, isso não

foi considerado um fator limitante. Por outro lado, o novo painel ocupa uma área ($1,98 \text{ m}^2$) um pouco menor e tem um peso (27 kg) também menor, em relação ao painel original ($2,24 \text{ m}^2$ e 28,8 kg), que são vantagens para o carrinho.

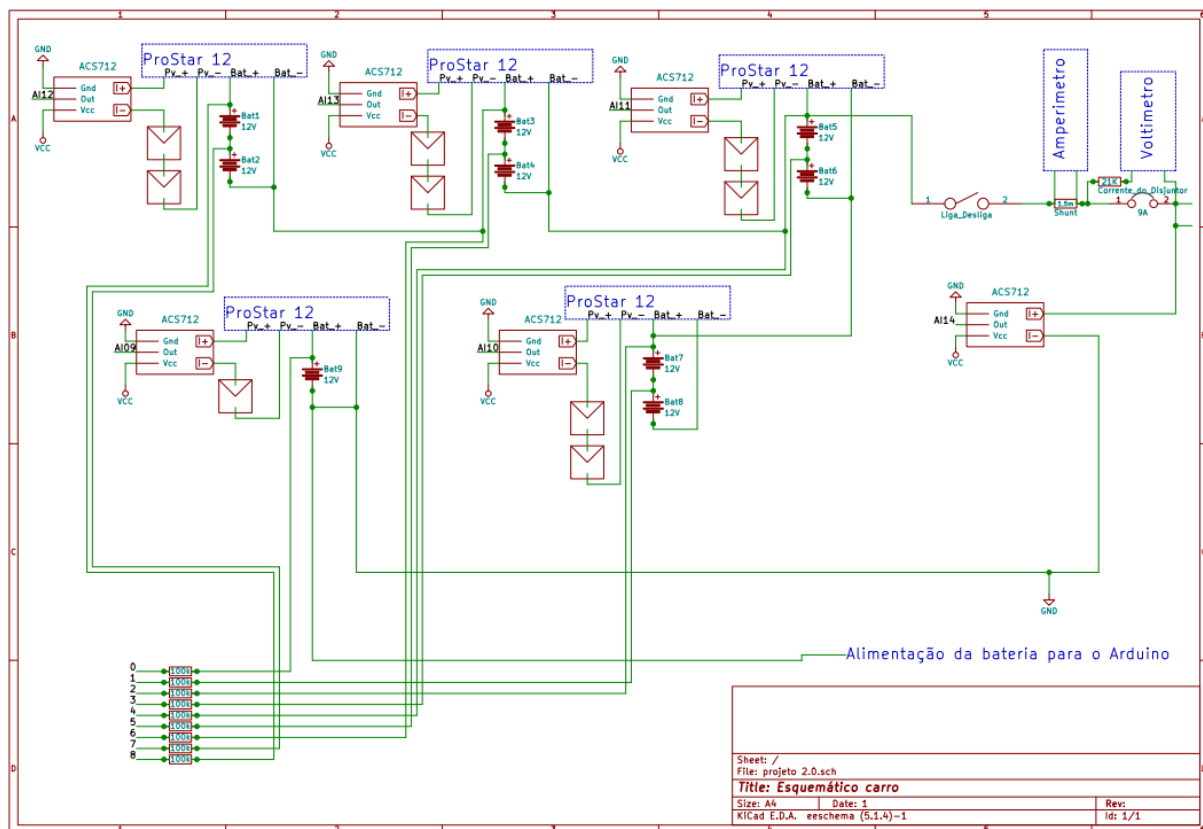


Figura 2 - Esquema elétrico da configuração atual do banco de baterias e do painel FV do carro

Para a proteção contra descarga do banco, as saídas para a carga (*load*) dos cinco controladores ProStar-12 teriam de ser conectadas em série na alimentação DC do inversor de tensão ICHM 125-100C. Porém, esta saída do controlador não pode ser utilizada diretamente por não suportar os valores de tensão e corrente necessários. A corrente máxima drenada no barramento DC quando o motor do carrinho é acionado ultrapassa muito seu limite de corrente (8 A). Além disso, os semicondutores utilizados na saída também poderiam queimar por exceder sua tensão máxima suportável. O ProStar12 utiliza transistores FET do modelo IRFIZ48G, com tensão de *breakdown* de 60 V.

O fato de não utilizar a saída para a carga do controlador (terminais *load*) não resultou em problema para o funcionamento do carrinho, pois o inversor de tensão ICHM 125-100C possui proteção contra subtensão de $100 \text{ V}_{\text{dc}}$, ou seja, $11,1 \text{ V}_{\text{dc}}$ /bateria, valor considerado satisfatório. Caso necessário, seria relativamente simples acrescentar um relé que efetuasse a função de desconexão do banco de baterias, acionado pelas saídas dos cinco controladores, com seus contatos conectados de forma apropriada. Há um voltímetro analógico no painel do carrinho que indica ao condutor a tensão do banco de baterias. Além disso, os LEDs vermelhos dos controladores de carga também são indicadores visuais de descarga excessiva. A situação que deve ser evitada é deixar o sistema inativo por longos períodos, sem exposição à radiação solar, capaz de compensar a autodescarga das baterias e o consumo próprio dos controladores de carga.

A conexão elétrica dos controladores, módulos fotovoltaicos e baterias foi feita levando-se em conta a necessidade de se manter os subpainéis em potencial flutuante, de forma que os mesmos pudessem ser conectados em série, obtendo-se a tensão desejada, como detalhado na Fig. 2.

3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para monitoração do sistema elétrico do carrinho, um sistema de aquisição de dados (SAD) foi desenvolvido, baseado na plataforma Arduino Mega, que conta com 16 entradas analógicas e 54 entradas/saídas digitais. No presente projeto, nove entradas analógicas são usadas para a leitura de tensão de cada elemento do banco de baterias, como mostrado na Fig. 2. Outras cinco entradas analógicas monitoram a corrente proveniente de cada subpainel, utilizando sensores ACS712. E, finalmente, uma entrada faz a medição da corrente na entrada DC do inversor de tensão, também por meio de um sensor ACS712. Mais adiante, a medição de parâmetros ambientais também será incluída. Dados de temperatura e umidade ambientes serão lidos por meio de um sensor DHT11.

Todos os dados lidos são armazenados em um cartão SD em intervalos de aproximadamente 2 s, podendo ser analisados *offline* com o auxílio de uma ferramenta de planilha eletrônica. As constantes de conversão para as medidas de tensão e corrente no Arduino foram ajustadas em função de valores obtidos com um multímetro True-RMS Politem A9 e os canais foram ajustados. A alimentação para o sistema de aquisição de dados é obtida no segmento do banco de baterias que opera na tensão de 12V (Bateria 1).

4. DADOS MEDIDOS

As Figs. 3 e 4 mostram dados medidos de tensão das baterias, não equalizadas inicialmente, referentes a um período de cerca de um dia, de céu claro (poucas nuvens). Nos gráficos pode-se observar claramente o período diurno de carga das baterias e o período de inatividade noturna. É fácil observar na Fig.4 a dispersão das características das baterias, conforme menciona o Item 1 do artigo, assim como a forma como os controladores atuam independentemente para compensar tais diferenças. Constata-se que a Bateria 9 (V9) apresenta tensão sempre abaixo das demais e uma descarga significativa durante a noite, fortes indícios de que a unidade não se encontra em bom estado. A citada descarga noturna é decorrente da autodescarga própria da bateria, somada ao autoconsumo do controlador de carga. A queda de tensão da Bateria 9 durante o período noturno é muito maior do que a da Bateria 1 (V1), sendo que esta bateria alimenta permanentemente o SAD, apresentando portanto uma descarga superior às demais. Constata-se ainda que a Bateria 4 também apresenta uma queda apreciável, enquanto que as unidades 2, 3, 6, 7 e 8 apresentam condições próximas entre si. Reitera-se que as unidades não foram equalizadas antes deste período de medição.

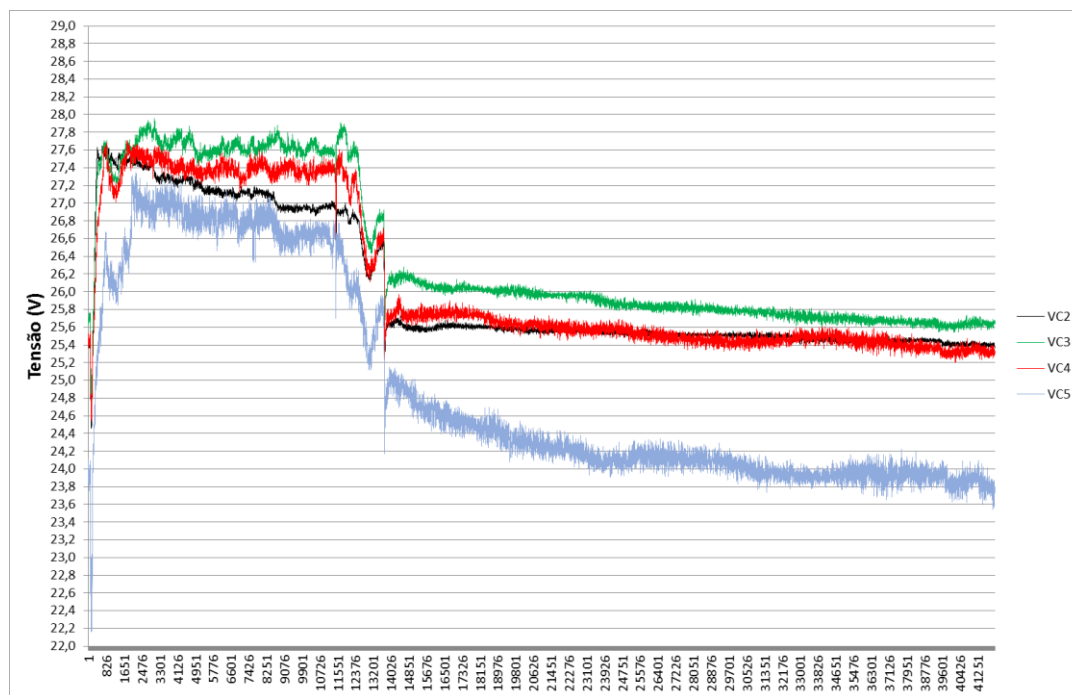


Figura 3 – Evolução da Tensão (V) de cada controlador de carga (24 Volts) durante um período de cerca de 24 h (VC2- Controlador 2: Baterias 2 e 3; VC3 – Controlador 3: Baterias 4 e 5; VC4 - Controlador 4: Baterias 6 e 7; VC5 - Controlador 5: Baterias 8 e 9)

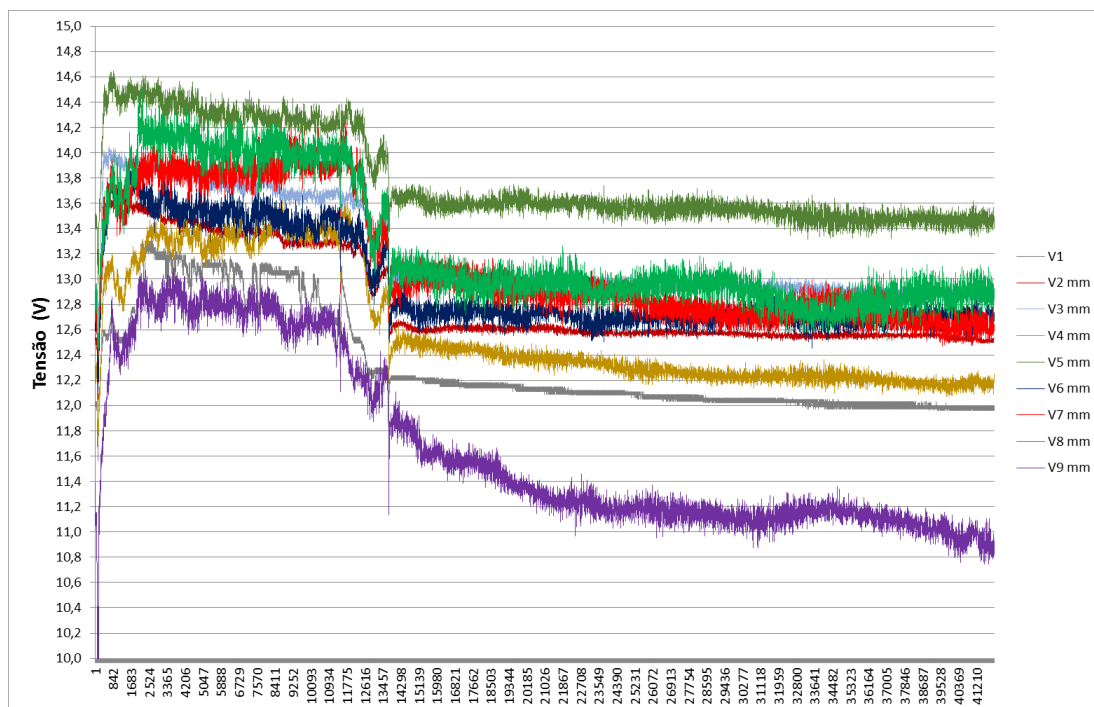


Figura 4 – Evolução da Tensão (V) de cada bateria durante um período de cerca de 24 h.

A Fig. 5 mostra os dados medidos de corrente dos controladores de carga e do inversor durante um período de cerca de 8 h, correspondendo ao período diurno contido nas Figs. 3 e 4. Observa-se que a corrente do Controlador 1 (IC1), que opera em 12 V e alimenta a Bateria 1, é maior do que as demais, o que é esperado, uma vez que esta unidade, conforme já informado, alimenta o SAD. O Controlador 5 (IC5), que alimenta as Baterias 8 e 9, também tem corrente de carga sempre superior aos demais. Conforme já mencionado, a unidade 9 encontra-se provavelmente em mau estado. As correntes nos demais controladores (IC2, IC3 e IC4) são bastante próximas entre si, o que outra vez indica que as unidades alimentadas por eles estão em condições semelhantes. A corrente no inversor é apresentada como negativa, uma vez que corresponde à descarga das baterias, e só aparece nos momentos em que o carrinho é movimentado, geralmente por curtos períodos durante a manhã, quando o carrinho é exposto ao Sol, e à tarde, quando o carrinho é recolhido, além de momentos durante o dia em que é eventualmente reposicionado.

A Tab. 5 mostra os montantes de energia carregada em cada bateria pelos respectivos controladores de carga, durante o período de 24h. Observa-se que a Bateria 1 é a mais usada, conforme esperado pelos motivos já mencionados. Também se confirma que as Baterias 8 e 9 operam de forma diferente das demais, devido ao estado da Bateria 9.

Tabela 5 – Carga das baterias durante o período de 24h

Controlador	Bateria	Energia (Wh)	Ah
C1	B1	40,19	3,10
C2	B2	19,31	1,44
	B3	19,85	
C3	B4	20,12	1,52
	B5	21,74	
C4	B6	23,96	1,78
	B7	24,48	
C5	B8	34,78	2,49
	B9	31,50	
Inversor	B1-B9	-22,65	-0,198

O sistema elétrico do carrinho está operando satisfatoriamente, apesar de diferenças nos regimes de operação (Bateria 1) e nas condições de algumas unidades que compõem o banco de baterias (Baterias 4 e 9). Isto provavelmente seria ainda mais prejudicial numa configuração convencional não segmentada com um controlador de carga único. Em particular, caso fosse adotada uma tal configuração convencional, a Bateria 9, em função de seu estado, iria prejudicar as demais e reduzir a vida útil do banco. Com base no exposto, pode-se afirmar que a arquitetura segmentada permite operar um banco de baterias de forma mais eficiente e resiliente a falhas e/ou eventuais diferenças entre as condições das unidades que compõem o banco.

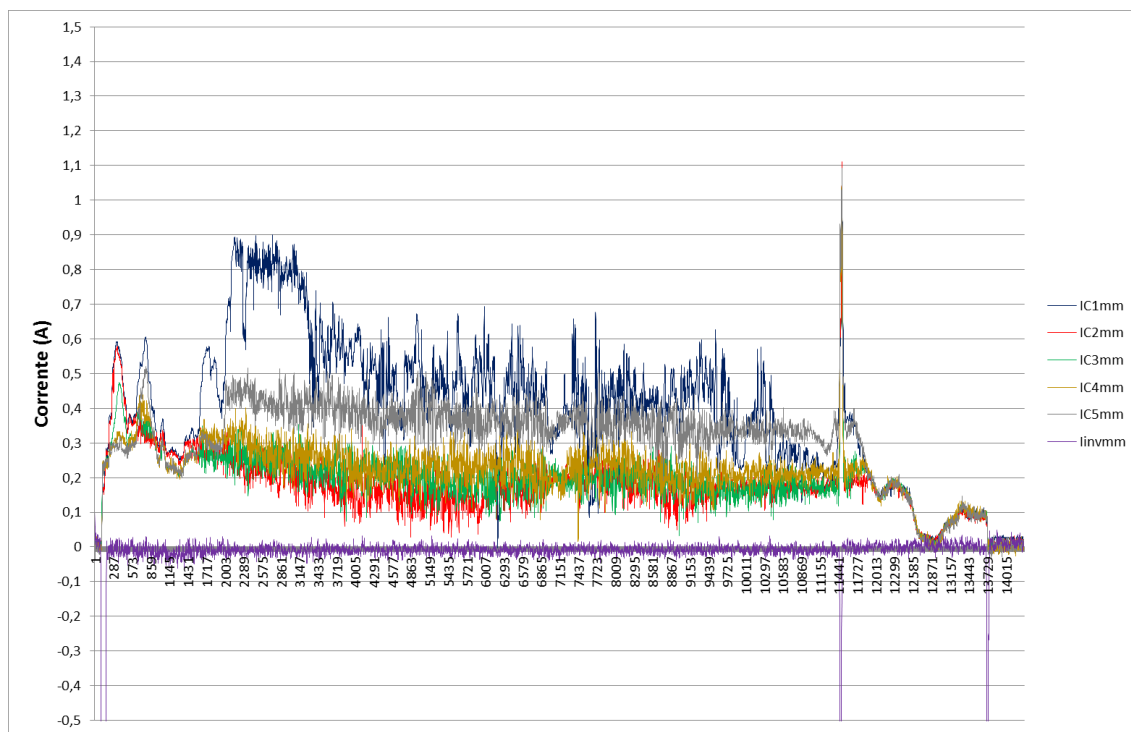


Figura 5 – Evolução da Corrente (A) de cada Controlador e do inversor durante cerca de 8 h. (IC1 - Bateria 1, IC2 - Baterias 2 e 3, IC3 - Baterias 4 e 5, IC4 – Baterias 6 e 7, IC5 – Baterias 8 e 9, linv – Inversor)

5. CONCLUSÕES

Como não há dados de desempenho da configuração anterior não é possível fazer algumas comparações importantes. Preliminarmente, o funcionamento da nova configuração adotada no carrinho solar do Cresesb tem se mostrado adequado, não tendo sido observados problemas em relação à operação do sistema fotovoltaico utilizando controladores de carga, baterias e módulos fotovoltaicos conectados de forma não convencional, segmentada, a partir de equipamentos comuns comercialmente disponíveis. Embora o carro tenha tido uso intermitente e seu uso tenha sido pouco intenso em função da redução no fluxo de visitantes na Casa Solar do Cepel/Cresesb, a citada configuração está montada desde jun/2017 não tendo sido observado dano nem aos controladores nem às baterias. Este tipo de controle individual de corrente/tensão de carga/descarga de cada elemento de um banco de baterias vai inclusive ao encontro das estratégias de controle que estão sendo empregadas para os bancos de baterias avançadas, como as de Lítio. Com base em avaliações a partir de dados medidos, pode-se afirmar que a arquitetura segmentada permite operar um banco de baterias de forma mais eficiente e resiliente a falhas e/ou eventuais diferenças entre as condições das unidades que compõe o banco.

Neste projeto do carrinho solar, considera-se ainda necessária uma avaliação a mais longo prazo, no sentido de se obter um resultado conclusivo quanto à sua viabilidade e, principalmente, quanto à durabilidade dos controladores e das baterias. Em função da segmentação efetuada, é esperado que o desempenho do sistema fotovoltaico seja melhor do que a configuração convencional em condições de sombreamento parcial do painel, mas isso não foi quantificado no presente estudo.

Melhorias adicionais no sistema fotovoltaico do carrinho podem ser implementadas facilmente, caso existam recursos disponíveis. A melhoria mais óbvia seria a utilização de módulos fotovoltaicos mais modernos, os quais disponibilizam uma potência de pico muito superior à dos MSX-20 para as mesmas dimensões e peso. Neste escopo, foram, por exemplo, identificados no mercado módulos de 30 Wp, com área de 0,23 m² e peso de 2,6 kg, cuja utilização resultaria em ganho de energia/potência e menor peso. O mesmo vale em relação a adotar controladores de carga MPPT (*maximum power point tracking*), já amplamente disponíveis no mercado e que poderiam proporcionar correntes e potências DC maiores. Isto tudo, todavia, em princípio não seria determinante para o desempenho do carrinho, mas somente para o seu tempo de recarga.

Outra melhoria imediata seria, ao invés do motor padrão atualmente utilizado (eficiência de 78%), a utilização de um motor elétrico de maior rendimento. Um motor 1 HP com rendimento 83%, já disponível no mercado, resultaria em menores correntes, menores perdas e maior autonomia. Outros aperfeiçoamentos implicariam uma completa revisão do sistema de tração, como uma caixa de redução e sistema de transmissão com menores perdas, o que não foi considerado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Gallardo-Lozano, J., Romero-Cadaval, E., Milanés-Montero, M. I., Guerrero-Martinez, M. A., 2014. Battery equalization active methods. *Journal of Power Sources*, 246, pp. 934-949.
- Kutkut, N. H., Wiegman, H. L. N., Divan, D. M., Novotny, D. W., 1998. Charge equalization for an electric vehicle battery system. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, vol. 34, no. 1, pp 235-246.
- M. I. Desconzi, R. C. Beltrame, C. Rech, L. Schuch, and H. L. Hey, 2011. Photovoltaic stand-alone power generation system with multilevel inverter. *E&PQJ*, vol. 1, no. 9, pp. 866 -871.
- Walker, G. R., Sernia, P. C., 2004. Cascaded DC–DC converter connection of photovoltaic modules. *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1130-1139.
- Bratcu, A. I., Munteanu, I., Bacha, S., Picault, D., Raison, B., 2011. Cascaded DC–DC converter photovoltaic systems: power optimization issues. *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 403-411.
- Cresesb, 2009. Manual de Utilização do Carro Solar.
- Lugon, A. R. P., 2018. Coletor de variáveis elétricas projetado para ser embarcado em um sistema fotovoltaico isolado integrado a um carrinho solar. Trabalho de Conclusão de Curso. UFES. 2018.
- Brito, U. B., 2006. Otimização do acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada através de conversores de frequência comerciais para acionar bombas centrífugas. Tese apresentada ao Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo-SP.

CHARGE CONTROL OF BATTERY BANKS OF PV PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USING A SEGMENTED ARCHITECTURE

Abstract. *The wide use of isolated photovoltaic (PV) systems operating at low dc voltages (12 or 24 Volts) has resulted in the availability of good quality and low-cost charge controllers and inverters for operation at these voltages. The adoption of higher dc voltages, however, faces lower product availability along with proportionally higher costs. Nevertheless, higher efficiencies can be obtained with higher voltages, due to lower current levels, hence lower ohmic losses, as well as possibly higher inverter efficiencies. This paper describes a configuration for a PV system with five 12/24 V charge controllers designed to manage a 108 V battery bank, comprising nine Lead –acid 12 Volts batteries connected in series. This was made possible with the segmentation of the PV panel into five subpanels working on floating potential. The strategy described was put into operation during the overhaul of a small solar car originally built by Cresesb/Cepel, based on a three-phase ac induction motor operated at variable speed by a frequency inverter. The initial goal was to apply the 108 V dc bus voltage directly to the frequency inverter, what has showed not to be possible with the equipment available, so that a voltage inverter was also necessary. The proposed configuration was tested and showed to be adequate and sufficiently robust regarding battery bank charge control, allowing it to operate at this non-conventional voltage level and also non-conventional architecture, making use of low-cost commercially available products, demonstrating that this can be technically feasible. Long term tests are still necessary for detailed performance evaluation and identification of potential benefits. An onboard data acquisition system was also designed to monitor the performance of the PV system.*

Key words: *battery charge controller, photovoltaic system, solar vehicle*