



ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE CAPACITORES DE GRANDE PORTE PARA SUBSTITUIÇÃO DAS BATERIAS CONVENCIONAIS

João Batista Rodrigues¹, Clovis Antônio Petry²

Resumo: O objetivo deste trabalho é aplicar capacitores de grande porte no armazenamento de energia elétrica, com o intuito de proporcionar uma maior portabilidade quanto à massa, ao volume e à energia disponível, especificamente em sistemas de iluminação. Sua utilização resulta em uma solução sustentável no que se refere, principalmente, ao seu descarte e à ausência de compostos químicos nocivos ao meio ambiente. Utilizando os conceitos técnicos de eletrônica e mediante técnicas aplicadas em *softwares* de simulação e projetos, é possível realizar uma explanação teórica sobre módulos fotovoltaicos, conversor Buck, microcontroladores, indutores e baterias. Para constatar a eficiência da solução apresentada, foi elaborado um projeto com uma estrutura microcontrolada capaz de extrair energia de um módulo fotovoltaico, operando em seu ponto de máxima potência, com capacidade de carregar esses capacitores de grande porte, os “supercapacitores”. A estrutura conta com um painel fotovoltaico monitorado por conversores analógico/digital de um microcontrolador, os quais mantêm o sistema funcionando continuamente sobre o ponto de máxima eficiência energética (MPP). Um conversor CC-CC tipo Buck, que se encarrega da transferência de parte dessa energia retirada do painel fotovoltaico para os supercapacitores, criando um novo conceito de armazenamento de energia, em substituição às baterias convencionais.

Palavras-chave: Supercapacitor. Conversor CC-CC. Bateria.

Abstract: *The proposal of this work is to apply large capacitors to storage power, allowing a larger portability regarding the mass, the volume and the available power. This product results in a sustainable solution concerning the disposal and the absence of hazardous chemicals. Using the theory from electronics and software for design and simulation, a theoretical explanation about photovoltaic modules, Buck converter, microcontrollers, inductors and batteries was done. To prove the product's efficiency, a microcontroller structure able to extract energy from a photovoltaic module and operating at the maximum power, was implemented to charge these large scale capacitors. The structure contains a photovoltaic panel, a microcontroller A/D converter, which keeps the system operating continuously around the maximum energetic efficiency (MPPT), and a DC-DC Buck converter, which is responsible for transferring energy from photovoltaic panel to capacitors, generating a new battery concept.*

Keywords: Ultracapacitor. DC-DC converter. Battery.

¹ Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos pelo IFSC, *campus* Florianópolis <jbr.rodriques@gmail.com>.

² Professor do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN), *campus* Florianópolis, IFSC <petry@ifsc.edu.br>.

1. INTRODUÇÃO

Energia elétrica é um tipo de energia que se baseia na diferença de potencial entre dois pontos, diferença essa que permite conceber uma corrente elétrica capaz de produzir trabalho se condicionada e estabelecida adequadamente.

Atualmente, a energia elétrica tornou-se a principal forma de energia utilizada pela sociedade e um dos principais pilares econômicos do mundo

moderno. A cada dia, seu desenvolvimento e suas aplicações viabilizam os atuais níveis de produção industrial, permitem a integração dos povos e auxiliam na evolução da ciência e da engenharia. É a energia elétrica a responsável direta pela grande melhora na qualidade de vida do homem.

O transporte de energia elétrica das unidades de geração até os centros de consumo deve-se a cabos e outros condutores, que formam as linhas de transmissão.

Para que essa energia estivesse presente no cotidiano das pessoas, seu armazenamento tornou-se importante e sua portabilidade indispensável para que se tivesse esse conforto em todo lugar e a todo instante. Para que a portabilidade energética se fizesse capaz, foram desenvolvidos acumuladores com base em reações químicas de metais tóxicos.

Durante muitos anos e até os dias de hoje o homem utiliza esse tipo de acumulador como dispositivo de armazenamento de energia elétrica. As reações químicas de metais pesados como o chumbo-ácido e níquel-cádmio são responsáveis por fornecer a energia elétrica adequada para o equipamento do usuário.

A utilização desses materiais na indústria tem sido cada vez mais criticada pela sociedade ambientalista, pois além de serem altamente tóxicos estes dispositivos podem gerar problemas quanto à sua disposição final. Esses acumuladores, portanto, devem ter o seu descarte controlado.

Há anos o homem estuda formas de armazenar energia que possam minimizar esses problemas, desde a retirada de energia na fonte até o armazenamento, o condicionamento e o transporte. Por esses motivos, este trabalho tem o objetivo de explorar a capacidade dos supercapacitores no acúmulo de energia elétrica para utilização posterior.

Esse componente foi escolhido por não apresentar de maneira tão intensa problemas causados pelas baterias de uso comercial, utilizadas nos dias atuais, que possuem metais pesados na sua constituição.

Essas baterias são cada vez mais criticadas pela sociedade, pois remetem a um risco ambiental, principalmente quanto ao descarte, resíduos durante sua utilização e por sua produção em escala industrial, acarretando grandes gastos com o controle deste produto.

Assim, o problema a ser estudado neste trabalho é a forma de armazenamento de energia elétrica, seus conceitos e produtos utilizados na atualidade, capacidades de cargas e descargas repetitivas e seu descarte após a vida útil.

Como uma opção para a solução desse problema propõe-se elaborar um protótipo capaz de armazenar a energia elétrica em supercapacitores. Essa energia será proveniente de painéis fotovoltaicos e se comprovará mediante este estudo se a utilização de capacitor de grande porte como acumulador, pode ser viável. Neste trabalho, deve-se entender capacitor de grande porte como um capacitor que ultrapasse o limite de um farad de carga acumulada. A acentuada capacidade de armazenamento de energia elétrica pelos supercapacitores é um diferencial para a sua utilização em sistemas eletrônicos e elétricos, nos

quais se fazem necessários o acúmulo e a portabilidade para uso posterior.

A partir deste protótipo serão realizados testes pertinentes para comprovar, ou não, a possibilidade de se armazenar energia elétrica em supercapacitores, sua confiabilidade e custos. Pretende-se ainda substituir alguns dos tipos de acumuladores utilizados nos dias atuais, especificamente em sistemas de iluminação.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um carregador eletrônico, que utilizará energia proveniente de um painel solar fotovoltaico e armazenará a energia em capacitores de grande porte, para uso posterior em sistemas de iluminação.

2. METODOLOGIA

A pesquisa científica é um estudo sistêmico da construção do conhecimento em busca das respostas para os problemas propostos.

O assunto abordado apresenta uma pesquisa aplicada e quantitativa, buscando o desenvolvimento e a compreensão de componentes e conceitos consagrados no meio acadêmico. Esses são necessários para desenvolver e aprimorar os processos ou sistemas já existentes, com vistas a satisfazer uma necessidade específica e reconhecida do problema proposto.

[...] a pesquisa aplicada toma certas leis ou teorias mais amplas como o ponto de partida, e tem por objetivo investigar, comprovar ou rejeitar hipóteses sugeridas pelos modelos teóricos. (RUIZ, 2008, p. 50).

A pesquisa aplicada neste trabalho é quantitativa do tipo exploratória e explicativa. A pesquisa exploratória é utilizada no levantamento de informações sobre um determinado objeto, delimitando, desta forma, o campo de trabalho. Desta etapa fazem parte o levantamento bibliográfico e a análise de exemplos, se houver. Na pesquisa bibliográfica foram buscados materiais editados, como artigos, revistas de componentes eletrônicos e pesquisas científicas em diversas áreas, desde eletrônica de potência, microcontroladores, métodos de controle e painéis fotovoltaicos.

A pesquisa explicativa possibilitou a identificação de causas por meio do método experimental e/ou matemático, ou mediante interpretações de métodos qualitativos, além de registrar e analisar os fenômenos estudados.

Com o objetivo de realizar uma avaliação prévia do comportamento do sistema proposto, foi utilizado o *software* PSIM nas simulações realizadas, a partir do qual foram obtidos os resultados esperados.

O desenvolvimento do protótipo foi dividido em quatro etapas, sendo a elaboração do projeto do conversor CC-CC tipo Buck, a primeira. Inicialmente, este circuito foi simulado no *software* PSIM e os resultados foram satisfatórios. Na segunda etapa foi escolhida a técnica de rastreamento do ponto de máxima potência, a partir do uso do microcontrolador. Essa técnica foi simulada no mesmo *software* e também se mostrou adequada para o protótipo. A terceira etapa, por sua vez, contou com o projeto prático de um indutor para o circuito de potência. O indutor foi projetado e confeccionado para operar continuamente no protótipo, confirmando a eficiência que já havia sido simulada no *software* PSIM. Na última etapa, com a interligação de todos os componentes, foram avaliadas as respostas do projeto proposto, finalizando o estudo. A partir deste protótipo, todo o conceito estudado pode, enfim, ser confirmado, e as variações das grandezas medidas foram consideradas desprezíveis ao se tratar de valores absolutos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste item, almeja-se fundamentar este trabalho por meio da revisão bibliográfica de tópicos como baterias e alguns de seus derivados tipos, capacitores de grande capacidade, os “supercapacitores”, painéis fotovoltaicos, circuitos integrados de controle, microcontroladores, energia limpa e desenvolvimento de produtos eletrônicos. Todos esses assuntos fazem parte do domínio do presente estudo.

Na Figura 1, um diagrama de blocos fornece um esquema das etapas a serem cumpridas.

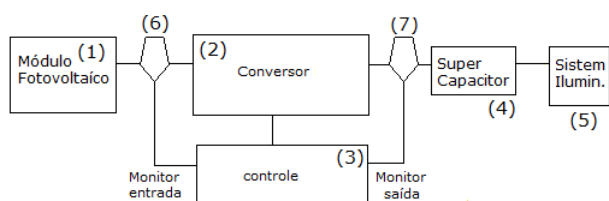


Figura 1 – Diagrama em blocos da estrutura do trabalho.

Em um primeiro momento, será feita uma revisão sobre painéis fotovoltaicos de maneira geral. Em seguida, serão abordadas sua aplicabilidade e expansão como produto, bem como o acumulador que será utilizado, comparando-o com os comercialmente existentes. Após essas explanações, inicia-se a etapa de potência mediante o projeto do conversor para a aplicação neste trabalho. Realimentação, monitoração e controle serão também explanados em cada etapa a seguir discriminada. Por último, será planejado um sistema de iluminação de emergência com base em uma

unidade de uso comercial. Essa luminária de emergência típica fornecerá os dados de consumo e capacidades energéticas para os cálculos da previsão de carga dos supercapacitores.

3.1. Baterias

A bateria é um dispositivo que armazena energia elétrica para uso imediato ou posterior, atendendo à necessidade do dispositivo a ser alimentado. No projeto, esse componente deverá ser substituído por capacitores de grande porte.

As baterias ou acumuladores são dispositivos que, durante a descarga, transformam a energia química diretamente em energia elétrica, por meio de uma reação eletroquímica de óxido-redução e, em alguns tipos, permitem sua recarga transformando energia elétrica novamente em energia química, a qual ficará armazenada e disponível para uso.

Esses acumuladores são compostos por células ou elementos conectados em arranjos do tipo série ou paralelo, de maneira a fornecer determinada tensão e capacidade de carga. Cada célula pode apresentar valores de tensão característica, que depende do material do qual foi construída.

A bateria tem um importante papel nos dias de hoje, sendo responsável por permitir a portabilidade dos dispositivos e componentes eletroeletrônicos. Sua capacidade de armazenamento de carga e volume determina sua duração e portabilidade.

O principal obstáculo, no entanto, é que a energia elétrica dificilmente pode ser armazenada de forma eficiente. Capacitores podem permitir o seu armazenamento direto, mas em pequenas quantidades quando comparadas com as demandas de aplicações.

Atualmente, o armazenamento de energia elétrica geralmente requer a sua conversão em outra forma de energia. Entre as baterias mais usuais e conhecidas, estão aquelas utilizadas nos veículos automotores, por exemplo. Esta energia é obtida por meio de reações de compostos químicos nelas inseridas como meio de armazenamento de energia elétrica. Seu funcionamento depende de reações químicas que geram a energia a ser retirada da bateria em forma de corrente elétrica com certo nível de tensão.

Para alguns tipos de baterias o processo pode ser revertido, e, se for aplicada energia elétrica em seus terminais, as características químicas podem ser restauradas. Desse modo, existem dois sistemas diferentes de bateria:

- baterias primárias – projetadas para converter a energia química em energia elétrica e ser descartada;

- baterias secundárias – projetadas para converter a energia química em energia elétrica, realizando vários ciclos de descargas e recargas.

Esta última é, ainda, o armazenamento eletroquímico genuíno de vários sistemas, porém a sua quantidade de recarga é bastante limitada, o que justifica o estudo de alternativas para a substituição desse componente.

A bateria secundária tem a vantagem de poder ser recarregada. Isto é possível graças aos íons móveis que, ao receberem energia elétrica, invertem a reação química de descarga, sendo uma reação química não espontânea, que regenera os reagentes. Quando são recarregados, esses acumuladores precisam ser monitorados, pois liberam gases inflamáveis como hidrogênio e oxigênio, além disso, se forem recarregados por tempo maior que o necessário, podem explodir.

Para que a bateria volte a ter carga novamente, um dispositivo controlador fará esse serviço, porém ele deve ser dimensionado para cada tipo de bateria.

Devido ao aumento da necessidade de fontes de energia para os dispositivos móveis, é de suma importância o aperfeiçoamento desse dispositivo.

Existem diferentes tipos de baterias com as mais diferentes aplicações. Considerando as diversas tecnologias, questiona-se qual seria a escolha correta do tipo de bateria a ser utilizada.

Em toda a circunstância, para a correta escolha de uma bateria devem ser observadas as características a seguir:

- densidade de energia acumulada em relação ao tamanho e ao peso para atender o especificado;
- necessidade de ciclos de carga e descarga, que determinam a vida útil;
- capacidade de carga relativa ao tempo de duração do dispositivo móvel em uso.

3.2. Supercapacitores

Um supercapacitor ou capacitor de grande porte é um tipo de condensador eletroquímico que apresenta um excelente desempenho no quesito capacidade de armazenamento de energia elétrica com relação ao seu tamanho, se comparado a capacitores de uso comum. Atualmente, existe grande interesse no meio acadêmico para aplicações em potencial desses capacitores em diversos tipos de utilização como armazenamento suplementar de energia para uso como bateria em dispositivos móveis.

Supercapacitores tratam a eletricidade de maneira separada fisicamente por cargas positivas e negativas, diferente de baterias que o fazem

quimicamente, por esse motivo possuem cargas e descargas mais rápidas, pois não necessitam que uma reação química aconteça (WU, 2012).

3.2.1. Vantagens dos Supercapacitores

As principais vantagens da utilização desses componentes para armazenamento de energia estão listadas a seguir e devem ser consideradas:

- os custos desses componentes estão caindo devido às pesquisas de novos materiais para sua fabricação;
- sofrem pouca degradação em relação às baterias mais usuais se comparado em número de ciclos de carga e descarga;
- reversibilidade muito boa;
- pouco peso, implicando maior portabilidade;
- o material para a sua confecção apresenta baixa toxicidade;
- sua eficiência nos ciclos de carga e descarga é alta, ficando em torno de 95% ou mais.

3.2.2. Desvantagens dos supercapacitores

As principais desvantagens da utilização desses componentes para armazenamento de energia também devem ser consideradas e estão listadas:

- a quantidade de energia armazenada por peso de unidade é consideravelmente mais baixa que o de uma bateria eletroquímica, porém estudos de materiais estão começando a melhorar esta relação;
- a tensão desses componentes varia com a energia armazenada;
- para armazenar efetivamente ou recuperar sua energia é necessário um controle eletrônico sofisticado, que resulta perda de energia e aumento de custos com controle, reduzindo a eficiência do sistema.

3.2.3. Aplicações dos supercapacitores

Todos os elementos citados anteriormente podem atuar como acumuladores de energia e devem atender a algum dispositivo para o qual o mesmo foi concebido. Os supercapacitores têm cada vez mais aplicações. As pesquisas em materiais com características desejadas favorecem a confecção desses componentes, aumentando ainda mais a quantidade de produtos que esse novo dispositivo de armazenamento de energia elétrica pode atender. Seu peso é muito reduzido, o que permite uma excelente portabilidade e vantagens que são cada vez mais priorizadas.

Esses elementos são atualmente encontrados em placas eletrônicas de circuito impresso. Eles

devem manter a energia por um curto período de tempo, mantendo assim a condição da informação disponível a cada interrupção de energia ocasional, em diversos produtos e sistemas de segurança.

Ao elemento que utilizará esta energia acumulada dá-se o nome de carga, e que pode, a critério do projeto, ser uma iluminação de ambientes, balizadores de jardins ou apenas acumuladores de energia para uso posterior. Na Tabela 1 são apresentados os componentes do protótipo, e na Tabela 2, um comparativo entre diferentes elementos acumuladores de energia.

Tabela 1 – Componentes, custo e especificações (GLAVIN *et al.*, 2009).

	Painel fotovoltaico	Baterias VRLA	Supercapacitores
Eficiência	15-20%	70-85%	85-98%
Custo (euros)	375	72	51
Tempo de vida	25 anos	3-5 anos	25 anos
Volume	81,28 x 53,84 x 5 cm	16,7 x 18,1 x 7,6 cm	9 x 6 x 2,8 cm
Peso	6 kg	6,2 kg	200 g

Tabela 2 – Tabela comparativa entre bateria x capacitor (MAXWELL INC, 2012).

Característica	Bateria Chumbo-Ácido	Ultracapacitor	Capacitor Convencional
Energia específica (Wh/kg)	10 a 100	1 a 10	< 0,1
Potência específica (kW/kg)	< 1	< 10	< 100
Tempo de carga	1 a 5 hr	0,3 a 30s	10^{-3} a 10^{-6} s
Tempo de descarga	0,3 a 3 hr	0,3 a 30s	10^{-3} a 10^{-6} s
Vida útil (ciclos)	1.000	> 500.000	> 500.000
Eficiência (carga/desc.)	0,7 a 0,85	0,85 a 0,98	> 0,95

3.3. Painéis fotovoltaicos

É possível observar no diagrama de blocos (Figura 1) que o painel solar fornece toda a energia elétrica que será utilizada para armazenamento nos supercapacitores.

Os painéis solares fotovoltaicos (PV) são o elemento alvo deste trabalho no quesito origem da energia elétrica para armazenamento. Nesses, a energia será tratada desde sua aquisição até o destino final de maneira limpa e segura, isto é, sem os transtornos ambientais de alguns modelos de geradores de energia elétrica. O painel solar fotovoltaico é um dispositivo geralmente utilizado para converter a luz solar diretamente em energia elétrica.

Esse painel, representado no diagrama em blocos pelo número (1), é composto por células solares, que assim são chamadas, pois captam a luz do Sol. Essas células também são conhecidas como células fotovoltaicas, pois criam uma diferença de potencial elétrico por ação da luz do Sol em seus terminais. As células solares contam com o efeito fotovoltaico para que, quando expostas à luz solar, sua energia faça a corrente elétrica fluir entre os seus terminais que possuem cargas opostas. Apesar de cada célula solar fornecer uma quantidade pequena de energia elétrica, um conjunto de células solares com essas características pode gerar quantidade de energia elétrica significativa ao longo do tempo (de miliwatts a quilowatts). Cabe salientar que, para receber maior e melhor quantidade de energia, os painéis solares devem estar direcionados para o Sol e possuírem um dispositivo eletrônico de controle que aumente a eficiência de drenagem para o armazenamento desta energia.

Os painéis solares, que outrora eram muito dispendiosos, apresentam-se cada vez mais como uma excelente alternativa para o futuro da geração de energia elétrica. Aliada ao aumento do custo dos combustíveis fósseis e sua provável extinção num futuro próximo, esta opção torna-se cada vez mais promissora, rentável e eficiente.

Estudos de materiais diferenciados aliados à diminuição do custo da tecnologia de eletrônica de controle estão levando a um maior rendimento na produção de células solares, juntamente à redução de custos de produção. Isto indica que, em breve, esse processo dispensará qualquer estudo de viabilidade e tendencialmente será um dos mais utilizados pela população.

3.3.1. Construção da célula solar

Os materiais mais comumente utilizados na construção de uma célula solar são o silício cristalino e o arsenieto de gálio. Os materiais como os cristais de arsenieto de gálio são produzidos com esta finalidade, porém, os cristais de silício são uma opção mais econômica, os quais são produzidos para utilização na indústria da microeletrônica.

O silício policristalino apresenta uma percentagem de conversão menor. Todavia, o custo reduzido de produção faz dele o mais utilizado por apresentar o melhor custo/benefício de mercado. Quando expostos à luz direta do Sol, uma célula de silício de 6 centímetros de diâmetro pode produzir corrente de 0,5 A na tensão de 0,5 V, ou seja, cerca de 250 mW. Uma célula solar pode ser observada na Figura 2.

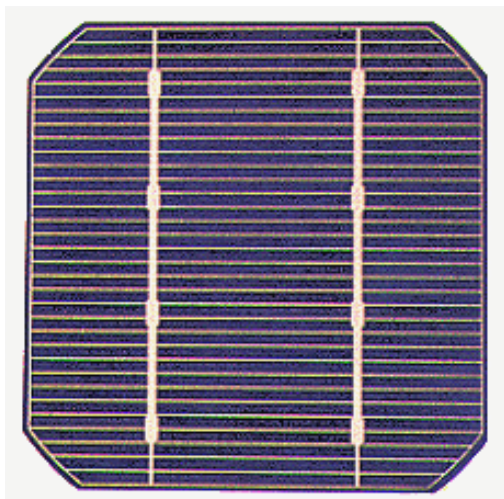


Figura 2 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino (CRESESB, 2012).

Os painéis solares fotovoltaicos são construídos dessas células, que são cortadas em formatos apropriados, são protegidas da radiação e de danos devido ao manuseio por uma capa de vidro e cimentadas numa superfície. As suas conexões elétricas são feitas em esquemas de série e paralelo, conforme a tensão ou intensidade de corrente que se deseja. A capa que o protege deve ser feita com um bom condutor térmico, pois a célula fotovoltaica aquece ao absorver a energia infravermelha do Sol. Com o aquecimento da célula, sua eficiência de operação diminui e, por esse motivo, é desejável reduzir esse calor. O resultado da construção e integração deste conjunto é chamado de painel solar.

3.3.2. Busca do ponto de máxima potência dos painéis fotovoltaicos – MPPT

Devido à crescente demanda de energia pela população mundial e à possível redução de oferta dos combustíveis fósseis, novas fontes de energia estão sendo estudadas, aliadas a uma nova política ambiental.

Como enfatizado anteriormente, os painéis fotovoltaicos produzem energia limpa, mas ainda em proporções ínfimas, se comparado à necessidade atual. Devido ao baixo rendimento de uma célula solar, a maioria variando entre 16 a 20%, algumas técnicas são utilizadas para minimizar as perdas durante o processo de aquisição desta energia.

3.3.2.1. Método da Razão Cíclica Fixa

Esse método representa o mais simples entre os métodos apresentados. Por não apresentar nenhum tipo de realimentação, o valor da tensão de trabalho é ajustado ao mais pertinente, em torno de 70 a 80% da tensão máxima do painel solar. Essa condição de funcionamento é constante, sendo conhecido como um método *off-line*. Nesse método, a resistência

aparente da carga é ajustada uma única vez para a potência máxima do painel.

3.3.2.2. Método da Tensão Constante

Este método utiliza apenas um sensor de tensão. Para a condição atmosférica padrão, a tensão no painel é da ordem de 70 a 80% da condição de circuito aberto. Essa tensão varia pouco nos terminais do módulo mesmo com a alteração da intensidade da radiação solar. Desse modo, fica assegurado que a tensão sobre a placa solar permaneça constante, sendo possível operar próximo ao maior rendimento.

3.3.2.3. Método Perturba e Observa (P&O)

Esse método opera incrementando ou decrementando periodicamente a tensão de saída do painel fotovoltaico e comparando a potência obtida no ciclo atual com a do ciclo anterior, mudando o ponto de operação para a direção desejada. Caso a tensão varie e a potência do sistema aumente, o controle muda o ponto naquela direção, caso contrário ele o fará na direção oposta. Este método necessita de sensores de corrente e tensão e pode ser melhorado através da variação do passo de incremento da correção da razão cíclica do conversor. Quando este passo é variado, o sistema chama-se P&O modificado.

3.3.2.4. Método da Condutância Incremental (IC)

Esse método é baseado no fato de que a inclinação da curva de potência do painel solar é nula no ponto de máxima potência, em que a variação desse ponto é considerada positiva à esquerda e negativa à direita. Esse método busca o MPP da mesma forma que o método P&O, e apresenta, também, a versão modificada. Esse método necessita dos sensores de tensão e de corrente, mas não calcula a potência do painel.

3.3.2.5. Método Beta

Para esse método, conforme variam as condições de operação do painel, o valor de β no melhor ponto permanece praticamente constante. Assim, β pode ser calculado periodicamente, utilizando a tensão e a corrente do painel, sendo realimentado em uma malha fechada com referência constante.

3.3.2.6. Método da Oscilação do Sistema

Baseando-se nos princípios da máxima transferência de potência, o método utiliza as oscilações para determinar o melhor ponto de operação, no qual a razão entre a amplitude da oscilação e o valor médio da tensão é constante. Seu projeto é caracterizado basicamente pela utilização de filtros, necessitando apenas do sensor de tensão.

3.3.2.7. Correlação de Ripple

O método também é baseado nos princípios da máxima transferência de potência e também faz uso das oscilações na potência, entretanto, o método faz uso de filtros do tipo passa alta, sendo necessários sensores de tensão e de corrente, sendo realizado o cálculo posterior da potência do módulo fotovoltaico.

3.4. Iluminação

O sistema de iluminação é o dispositivo responsável por utilizar a carga elétrica armazenada nos supercapacitores. Para determinar qual componente seria utilizado no presente trabalho, foram averiguados alguns exemplos de equipamentos de iluminação de emergência de uso comercial e verificou-se que este tipo de iluminação ainda utiliza baterias de chumbo ácido.

Esse componente forneceu os dados necessários para os parâmetros de necessidade desse tipo de iluminação, principalmente pelo fato do propósito deste trabalho objetivar o uso de supercapacitores em vez deste tipo de baterias.

A partir de modelos comerciais de luminárias de emergência, observou-se que as mesmas possuem autonomia de aproximadamente 2 horas, fornecendo corrente menor do que duas centenas de miliampères (em torno de 130 mA) sob tensão mínima de aproximadamente 3,3 V.

Dessa forma, foi possível dimensionar os componentes necessários ao trabalho, dando continuidade às próximas etapas de metodologia e desenvolvimento.

3.5. Componentes

Nesta etapa, serão citados alguns dos componentes estudados na confecção deste projeto, permitindo, assim, entender o processo como um todo.

Para validar este trabalho, que consiste na construção de um sistema de aquisição e armazenamento de energia elétrica em capacitores de grande porte, muitos componentes eletrônicos foram consultados, estudados e analisados. Alguns problemas de importação e dúvidas quanto às técnicas que deveriam ser utilizadas ao executar este processo por meio de um circuito eletrônico surgiram. Várias características implicariam em múltiplas escolhas de aplicações. Optou-se por aquela que apresentou, de uma forma clássica, uma resposta satisfatória ao problema proposto, não se situando entre a opção ideal, mas evidenciando um bom desempenho.

É válido salientar que o painel solar possui característica ímpar de produção de energia elétrica, pois seu desempenho depende de um controle acertado e eficiente, voltado ao melhor rendimento

possível. Das técnicas de controle estudadas anteriormente, foi escolhido o método de tensão constante, o qual, para este projeto, apresentaria uma solução adequada, fácil de programar e manteria um bom rendimento do aproveitamento do ponto de máxima potência do painel solar. Para esse controle alguns componentes foram considerados. Dentre eles, foram avaliados o regulador da Fairchild, modelo FAN8303, cuja corrente de trabalho é de 2 A e tensão de até 23 V, o PROFET da Siemens e, para as medições, foram observados alguns outros componentes, como o transdutor de corrente da LEM, o LTSP 25, e o ACS712 da Allegro. Alguns microcontroladores também foram testados, como o Atmega328. Não serão referenciadas aqui as características de cada elemento devido à longa revisão bibliográfica que seria necessária, além de não agregar informações relevantes para este trabalho. Além disso, alguns dos componentes não foram utilizados no protótipo final.

O elemento escolhido para estabelecer o chaveamento no conversor tipo Buck, foi o CI PROFET de código comercial BT410E2. Essa chave será controlada por meio da saída PWM número 3 do kit de desenvolvimento Arduino.

4. DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO

4.1. Sistema Proposto

Os principais componentes deste trabalho estão ilustrados na Figura 3 e consistem em um painel fotovoltaico, construído de silício policristalino e um conversor Buck projetado para integralizar a etapa de captura de energia elétrica e enviá-la aos supercapacitores. Toda essa operação é controlada por um sistema eletrônico cujo principal componente é um microcontrolador.

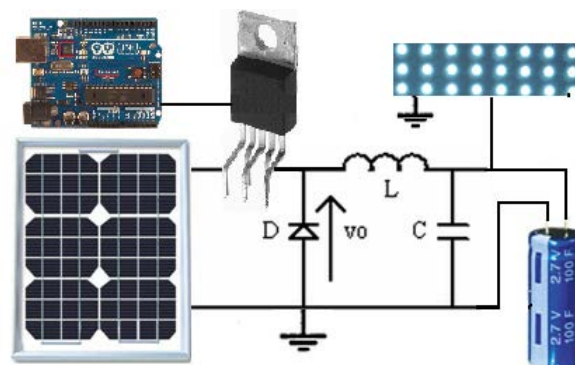


Figura 3 – Diagrama em blocos do sistema.

O conjunto de supercapacitores tem a função de acumular energia. Em outro momento, quando a luz solar não estiver presente, esse conjunto de supercapacitores fornecerá a energia que estava acumulada para LEDs que serão ligados e fornecerão iluminação ao ambiente desejado.

O fluxograma da Figura 3 destaca cada etapa deste estudo e exemplifica a proposta de solução.

A interligação desses módulos será possível mediante arranjos de componentes eletrônicos, que possibilitarão as medições realizadas pelo microcontrolador escolhido, por meio dos quais será possível realizar as leituras com níveis compatíveis com as entradas do conversor A/D do microcontrolador. Essa medição monitora as grandezas seguidamente, atuando no sinal PWM que controlará a tensão sobre o banco de supercapacitores. Desse modo, o sistema carrega os supercapacitores de maneira controlada durante o período de incidência da luz solar sobre o painel conectado ao produto.

Na etapa seguinte, quando a luz solar não estiver presente, um dispositivo que controla a sensibilidade de iluminação dirigirá a energia acumulada nos supercapacitores para um banco de LEDs, acionando-os. Este poderá simular um produto como uma iluminação de emergência, iluminação de balizadores de garagem ou iluminação de calçada para passeio.

Com este projeto, pretende-se verificar se o bloco de supercapacitores atende as necessidades energéticas de maneira satisfatória, como as baterias de chumbo-ácido, e indicar a utilização dos mesmos para outros projetos acadêmicos.

Para desenvolver essa solução, foi necessária a realização de estudos das características dos componentes eletrônicos utilizados e das etapas a seguir descritas. Após, acontece o desenvolvimento total do projeto, apresentando seus recursos, sua otimização e seus resultados.

4.2. Projeto dos elementos

4.2.1. Capacidade dos supercapacitores

Nos testes executados com luminárias de emergências de uso comercial, foi constatado que suas baterias mantiveram o circuito alimentado por duas horas, fornecendo corrente de 125 mA e tensão mínima de até 3,325 V. A partir deste nível mínimo de tensão, os LEDs da luminária apagaram. Com esses dados, será dimensionado o bloco de supercapacitores e comparada a sua autonomia com as baterias de uso comercial.

Para que o bloco de supercapacitores pudesse substituir a bateria de chumbo-ácido, este deveria apresentar capacidade de carga compatível. Por esse motivo, foi dimensionado o supercapacitor que substituiria a bateria, resultando em um valor em torno de 360 F. Nas Equações 1 a 3 estão apresentados os cálculos do valor do bloco de supercapacitores, representado por SC.

$$P = V \cdot i$$

$$P = 3,325 \cdot 0,125 \quad [1]$$

$$P = 415,625 \text{ mW}$$

$$E_c = P \cdot t$$

$$E_c = 415,625 \cdot 10^{-3} \cdot 7.200 \quad [2]$$

$$E_c = 2.992,5 \text{ J}$$

$$SC = \frac{2 \cdot 2.992,5}{V_{in}^2 - V_f^2} \quad [3]$$

$$SC = 360,38 \text{ F}$$

Um banco, constituído de 10 supercapacitores, dispostos em série e paralelo, foi construído para alcançar o valor de capacitância próximo ao valor calculado e o valor de tensão compatível com a bateria de uso comercial.

4.2.2. Características elétricas do painel solar

O trabalho contou com um painel solar de potência de 5 W, limitado à tensão em circuito aberto de 21,3 V e corrente de curto circuito da ordem de 310 mA. Esse painel foi escolhido porque estava disponível para testes no laboratório e apresentava características que atenderiam adequadamente as condições do circuito proposto.

A potência é uma das principais características dos módulos fotovoltaicos e é dada pelo seu valor de pico. Esse é um dos dados mais relevantes para este projeto, existindo também outras características elétricas que exemplificam de maneira mais completa a sua funcionalidade, caracterizando melhor as especificações do módulo fotovoltaico.

As características elétricas dos módulos fotovoltaicos a seguir foram fornecidas pelo fabricante e são indispensáveis na execução de qualquer projeto:

- Tensão de Circuito Aberto (V_{oc});
- Corrente de Curto Circuito (I_{sc});
- Potência Máxima (P_m);
- Tensão de Potência Máxima (V_{mp});
- Corrente de Potência Máxima (I_{mp}).

Conhecendo o comportamento de um painel solar, é necessário um conversor para ajustar os valores a níveis compatíveis de armazenamento. O conversor escolhido foi o tipo Buck, por ser um conversor abaixador e se adaptar com facilidade ao projeto.

4.2.3. Conversor CC-CC

A principal característica para a escolha do conversor do tipo Buck no projeto foi o fato de esse ser um abaixador de tensão. Como o painel

fotovoltaico fornece tensão que varia entre 0 e 21 V e o bloco de supercapacitores deve ser recarregado em seus terminais com uma tensão máxima de até 5,4 V, este modelo de conversor pode atender às especificações sem restrições.

A Figura 4 representa o esquema de ligação de um conversor Buck. Por apresentar uma construção simples, esse conversor foi projetado para funcionar no protótipo, onde apresentou bons resultados.

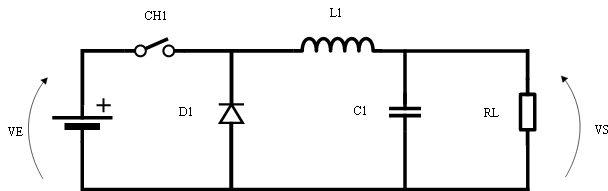


Figura 4 – Esquema do conversor Buck. Baseado em Barbi e Martins(2000).

Para os testes no protótipo do projeto, utilizou-se, para atuar como chave no conversor tipo Buck, o BTS410E2 da Siemens, descrito anteriormente. O diodo utilizado, representado por D1 na Figura 4, é um diodo rápido de uso genérico modelo 1N4936. O capacitor utilizado, representado por C1, tem o valor de 680 uF por 50V.

Esses foram os componentes utilizados no protótipo do projeto para que se avaliasse seu funcionamento.

4.2.3.1. Características Principais do BT410E2

As principais características desse componente estão apresentadas abaixo e nem todas fizeram parte do escopo deste trabalho. Os valores em níveis absolutos variam conforme a aplicação, ligação e tempo de exposição do componente:

- proteção contra sobrecarga;
- limitação de corrente;
- proteção contra curto-circuito;
- desligamento térmico;
- proteção contra sobretensão (incluindo despejo de carga);
- desmagnetização rápida de cargas indutivas;
- proteção de conexão reversa da bateria;
- desligamento por subtensão e sobretensão com reinicialização automática e histerese;
- dreno aberto à saída de diagnóstico;
- detecção de estado ligado à carga abrir em ON;
- entrada CMOS compatível;
- proteção de perda de referência;
- proteção à descarga eletrostática (ESD).

4.2.3.2. Cálculos para projeto de um indutor

Os cálculos do indutor foram executados com o software Smath Studio. As informações consideradas no cálculo, tais como a particularidade do núcleo disponível no projeto, estão apresentadas na Figura 5.

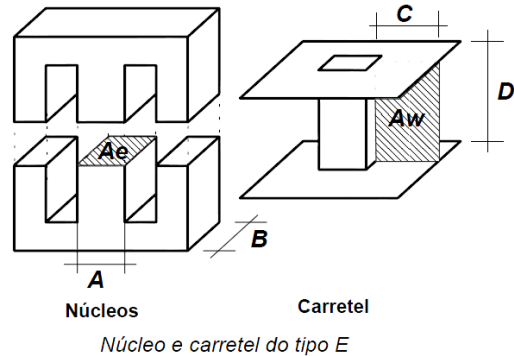


Figura 5 – Amostra de núcleo e carretel tipo E (BARBI, 2001).

O projeto físico do indutor foi realizado com os valores a seguir:

- $L_o = 20 \text{ mH}$ – indutância necessária;
- $I_{Loef} = 0,23 \text{ A}$ – corrente eficaz;
- $I_{Lop} = 0,98 \text{ A}$ – corrente de operação;
- $\Delta I_{Lo} = 0,14 \text{ A}$ – variação da corrente de operação;
- $F_s = 600 \text{ Hz}$ – frequência de operação;
- $K = 0,7$ – fator de enrolamento;
- $J = 450 \text{ A/cm}^2$ – densidade de corrente do indutor;
- $B = 0,35 \text{ T}$ – densidade de fluxo magnético do material;
- $N = 2$ – números de fios.

A densidade de fluxo magnético do material é dada pelo catálogo do fabricante, nesse caso foi utilizado o catálogo de ferrite da Thornton.

O projeto foi realizado seguindo a metodologia clássica de projeto de indutores em alta frequência (BARBI, 2001).

Após o dimensionamento do núcleo e das características do painel solar fotovoltaico, é necessário determinar e especificar o controle de chaveamento feito pelo microcontrolador. Ele será embutido na plataforma Arduino, a qual possui bibliotecas de funções, facilitando a programação para a operação e controle do circuito.

4.2.4. Etapa de Controle

O Microcontrolador da Atmel, o ATmega328, montado sob a plataforma Arduino, é o componente central, escolhido para manter o controle sobre o painel solar fotovoltaico, nas condições do MPP

(*Maximum Power Point*). Essa plataforma foi utilizada por apresentar bibliotecas prontas de programação. Esse componente realiza um rastreamento eletrônico, funcionando como um controlador de carga que observa a saída do painel solar e compara com a tensão nos capacitores de grande porte. Desse modo é possível determinar, mediante cálculos, a correta largura do pulso para que o conversor Buck extraia a máxima potência possível do painel solar fotovoltaico.

4.2.5. Monitoração das grandezas do painel fotovoltaico

Como descrito anteriormente, o elemento responsável pelo controle é o microcontrolador da Atmel, ATmega328, do qual foram utilizadas apenas quatro entradas de conversor A/D de 10 bits, as quais monitoraram as grandezas necessárias à implementação do controle de PWM do circuito.

Assim, mediante leitura dos valores de tensão sobre os divisores resistivos, os conversores A/D do microcontrolador receberiam as informações necessárias para o controle do PWM. Os valores de tensão foram calculados para impedir um problema nas escalas limites do conversor A/D que pudessem danificar as suas entradas. O circuito da Figura 6 demonstra os pontos de leitura do circuito, responsável pela primeira parte do controle do sistema.

Em muitos casos é necessária tensão mais baixa do que a tensão que a fonte fornece. Essa necessidade pode ser suprida pelo divisor de tensão. Na Figura 6, V_{Psolar} representa a tensão de entrada fornecida pelo painel solar. V_{ax} e V_{ay} representam as tensões de saída dos divisores resistivos que serão monitorados pelas duas primeiras entradas do microcontrolador. Essas tensões serão responsáveis pelo monitoramento contínuo da tensão fornecida pelo painel solar. A corrente disponibilizada pelo painel pode ser calculada através de R1, que atua como *shunt*.

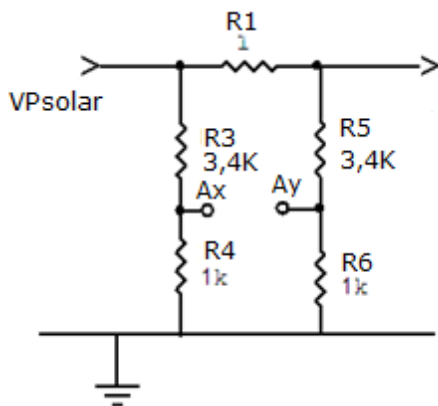


Figura 6 – Pontos de monitoração do conversor A/D, entrada do PV.

Como a característica primária do painel solar fotovoltaico é o fornecimento de energia elétrica, sua tensão varia de 4,0 V a 21,3 V. Como o conversor A/D do microcontrolador opera com leituras até o valor de 5,0 V, um divisor resistivo foi implementado para garantir que, nas entradas do conversor A/D, os valores limites não sejam excedidos. Dessa forma, é garantida uma leitura contínua, evitando que as entradas do conversor sejam acometidas de sobretensão.

Calculando-se para o caso de máxima tensão imposta à entrada do microcontrolador, tem-se:

- $V_{Psolar} = 21,3$ V Máximo;
- $V_{ax} = V_{ay} = 5$ V Máximo ;
- $R4 = R6 = 1$ k Ω (valor escolhido para cálculo de R3 e R5).

A partir dos valores de R4 e R6 podem-se calcular os valores para R3 e R5. A esses valores foram somados um coeficiente de segurança determinando o valor escolhido para o protótipo, que ficou com 3,4 k Ω para R3 e R5.

O resistor R1, apresentado na Figura 6, funciona como um *shunt* e, a partir da tensão diferencial entre seus terminais, foi calculada a corrente que o painel fornece ao circuito. Desse modo, foi possível monitorar continuamente a corrente na saída do painel fotovoltaico. De maneira idêntica, foram aplicadas as condições de monitoração às saídas do protótipo, com a particularidade de que, a tensão no terminal de saída sobre os supercapacitores deve ser limitada a 5,0 V, variando de zero até esse valor.

As grandezas impostas aos conversores A/D do microcontrolador foram dimensionadas para níveis compatíveis, de maneira a acomodar as suas leituras dentro de sua faixa de operação.

A Figura 7 ilustra a técnica de uso do divisor resistivo para a monitoração das grandezas de saída sobre os supercapacitores.

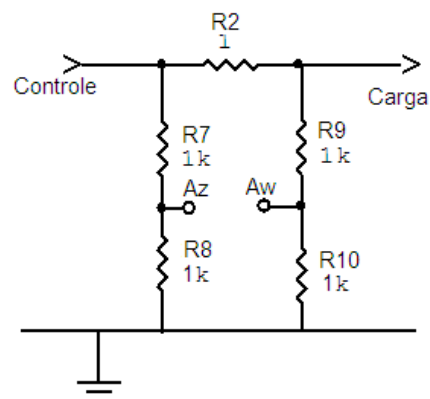


Figura 7 – Pontos de conexão do conversor A/D na saída a carga.

4.3. Simulação e Montagem do Sistema

A simulação do painel fotovoltaico foi realizada no *software* PSIM, e o esquema utilizado para essa simulação está apresentado na Figura 8. Para essa simulação, foram utilizadas grandezas idênticas ao painel disponível no laboratório, que é de 5 W. A partir dessa simulação do painel fotovoltaico, foi traçada a curva característica do mesmo. O resultado está ilustrado na Figura 9.

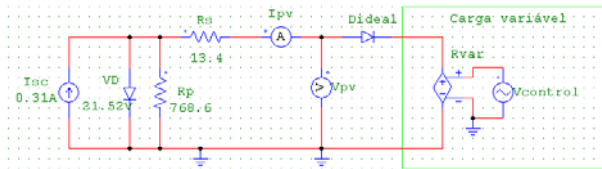


Figura 8 – Simulação do PV com carga.

A simulação realizada para um painel solar com o *software* PSIM, possibilitou a confirmação das características descritas na revisão bibliográfica.

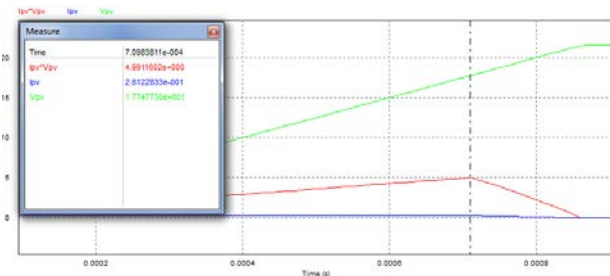


Figura 9 – Curva característica de tensão e corrente do PV de 5 W.

As respostas das curvas de potência obtidas da simulação do painel pelo *software* apresentam igualdade de valores se comparadas com as curvas obtidas de painéis solares com as mesmas características da simulação.

No resultado gráfico da simulação do painel fotovoltaico, na Figura 9, o ponto onde a linha tracejada encontra a curva $I_{pv} \times V_{pv}$ corresponde ao MPP do painel solar.

Os cálculos de valores de entrada para a monitoração das grandezas foram feitos pelos conversores A/D nos pinos A1 e A2 da plataforma do Arduino Duemilanove, que correspondem às entradas A_x e A_y , respectivamente.

A correlação dos valores foi calculada desta forma para que sua interpretação correspondesse à realidade da grandeza que o painel fotovoltaico (PV) impunha.

O conversor A/D é de 10 bits, portanto esse conversor possui 2^{10} passos de quantização, ou seja, 1.024 posições. Sabendo-se isso e que a tensão limite de entrada desse conversor em nível é de no máximo 5,0 V, aplica-se o divisor resistivo para a entrada do conversor A/D, garantindo tensão

máxima limitada a 5,0 V, que opera em uma faixa de 1.024 posições. Como a tensão no painel varia de 0 até 21,3 V, o resistor foi calculado para, na escala máxima de 5,0 V, atingir o valor máximo de 1.000 posições, determinando, assim, a tensão de entrada do painel solar.

O mesmo foi proposto para a corrente fornecida pelo painel, conforme abaixo:

- Se $V_{Psolar} = 0$ então $A_x = 0$
- Mas, se $V_{Psolar} = 21$ então $A_x = 1000$.

Por segurança, foi aplicado o valor de A_x em 1.000 passos, o qual delimita a tensão de entrada (5,0 V), e não em 1.024 passos, que seria o fim de escala do conversor A/D. Desse modo, fica garantido que ruídos não danifiquem a leitura ou o próprio conversor A/D, extrapolando seu limite.

O cálculo da corrente de entrada do painel solar conectado ao divisor monitorado pelo Arduino será realizado conforme a Equação 4.

$$I_{Psolar} = A_x - A_y \quad [4]$$

A diferença de potencial determina a corrente que circula na entrada do conversor, sendo fornecida pelo painel e calculada pelo resistor R1 que servirá como *shunt*. A conversão para valores de corrente elétrica em ampères está apresentada na Equação 5.

$$I_{Psolar} = \frac{4,4 \cdot (A_x - A_y)}{1.000} \quad [5]$$

Para exemplificar, o módulo fotovoltaico aplicou corrente de 30 mA sob tensão de 20 V. O valor de tensão V_{Ay} foi calculado conforme a Equação 6.

$$\begin{aligned} V_{Ay} &= V_{Psolar} - I_{Psolar} \cdot R_{shunt} \\ V_{Ay} &= 20 - 0,03 \cdot 1 \\ V_{Ay} &= 19,97 \text{ V} \end{aligned} \quad [6]$$

Se o valor, em passos, do conversor A/D, no ponto em que A_x mede 20 V, for dividido pelo valor da relação do divisor resistivo, que é de 4,4, será obtido, para uma escala de 5 V e 1.000 passos, o valor de V_{Ax} , conforme apresentado na Equação 7.

$$V_{Ax} = 20 / 4,4 = 4,5454 \text{ V} \quad [7]$$

Se 5,0 V está diretamente relacionado a uma escala de 1.000 passos, a leitura será 909 passos sobre o ponto de medida A_x . Para este mesmo processo, com V_{Ay} de 19,97 V, o conversor A/D do microcontrolador apresenta A_y com 907 passos. Essa proximidade nos valores de leitura dos conversores representou um problema que será abordado a seguir. Porém, quando o painel solar está operando mais próximo da plena carga, isto é,

com o valor de corrente próximo de 300 mA, a tensão sobre o resistor de 1 ohm chega a 0,3 V, fazendo com que o conversor A/D apresente o valor de 19,70 V que, na escala do ponto de leitura de A_y , será esse valor dividido pela relação do divisor, conforme apresentado na Equação 8, resultando em valor de A_y com 895 passos.

$$V_{Ay} = 19,7 / 4,4 = 4,477272 V \quad [8]$$

Explicada a etapa do divisor resistivo, o mesmo foi colocado em prática, mas quando testado em algumas medições, houve o seguinte problema:

Se o painel solar estivesse fornecendo potência acima de 20% da sua potência nominal, a diferença de tensão sobre o resistor *shunt* apresentava valor maior, e a leitura ficava mais consistente, não apresentando problemas para os cálculos. Portanto o *software* de controle embarcado no microcontrolador da AVR conseguiu determinar suas grandezas com maior consistência, fazendo com que o sistema operasse dentro do MPP.

Por outro lado, o problema na aquisição de leitura de grandezas sobre o *shunt*, cujos níveis de tensão apresentam valores muito pequenos, não permitiu uma leitura correta, e o controle do *software* embarcado não obteve estabilidade de operação.

Para resolver esse problema, foi adicionada ao *software* de controle a técnica de média móvel para a obtenção desta leitura no AD. Essa técnica manteve a leitura mais consistente, pois realiza uma média de n leituras, assim, que o controle automático de posição e incremento tomasse a direção acertada.

Esse método trabalha com uma média de valores lidos por n vezes e atualizados a cada medição, minimizando os erros em que as leituras realizadas apresentem uma pequena variação. Assim, é possível executar uma leitura mais estável, fazendo com que o *software* embarcado não tivesse sua performance afetada por ruídos aleatórios.

É válido ressaltar que, ao comparar duas leituras de valores muito próximos, qualquer ruído espúrio pode ser interpretado como um valor real e, dessa forma, significar um grande erro devido à proximidade das medições, portanto a correção para certificação se fez necessária.

O microcontrolador ATmega328, após a etapa de aquisição de dados pelos conversores A/D, foi conectado ao circuito de controle do MPPT do painel solar. A saída PWM número 3, da plataforma Arduino, controlada pelo *software*, atua sobre a chave, a qual controla a tensão sobre o banco de supercapacitores. Para esta chave, que mantém a tensão sobre o banco de supercapacitores, foi selecionado o CI PROFET, que teve seu funcionamento descrito na revisão bibliográfica.

O painel fotovoltaico, no modo de operação usual, apresenta muita variação na condição de fornecimento de energia durante o período de trabalho. Devido ao seu baixo rendimento, algumas técnicas foram utilizadas para que energia disponível fosse mais bem aproveitada.

Das técnicas apresentadas na revisão bibliográfica, optou-se pelo método de tensão constante, que além de ser um método de fácil aplicação, apresenta uma boa opção no quesito eficiência.

Para validar os testes, foi utilizada uma fonte de corrente contínua, ajustada na condição de tensão fixa de 17 V e limitada a 300 mA, simulando a entrada do painel solar, próximo da região de trabalho do mesmo em condições ideais. O *software* responsável pelo controle foi embarcado no microcontrolador ATmega328, sob a plataforma Arduino.

A plataforma do Arduino, onde está o controlador, é apresentada na Figura 10.

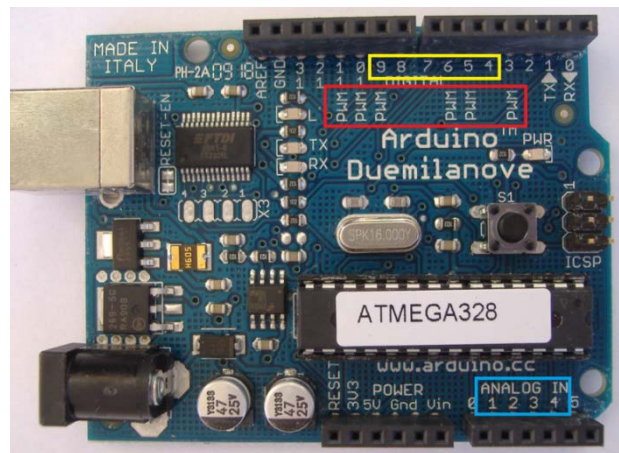


Figura 10 – Módulo Arduino (ARDUINO, 2014).

As entradas destacadas em ANALOG IN, apresentadas na Figura 10, foram responsáveis pelas medições de grandezas A_x , A_y , A_z e A_w respectivamente em 1, 2, 3 e 4 do ANALOG IN. Através da leitura dessas grandezas, o *software* embarcado no ATmega328 aplicava determinados pulsos de PWM para que o conversor Buck operasse adequadamente. A saída PWM utilizada foi a de número 3 na plataforma Arduino.

Para que os resultados dos testes fossem instantâneos, foram adicionadas ao *software* algumas linhas de comandos responsáveis por externar as grandezas medidas pelas entradas do microcontrolador em um *shield* LCD. Esse componente foi adquirido e utilizado como uma ferramenta de leitura instantânea das grandezas solicitadas para cada ensaio. Esse *shield* permitiu a verificação de três ou quatro grandezas simultaneamente, e seguido da verificação dos

valores dessas grandezas, permitiu a correção desses antes das próximas etapas. A ilustração deste *shield* LCD é apresentada na Figura 11.

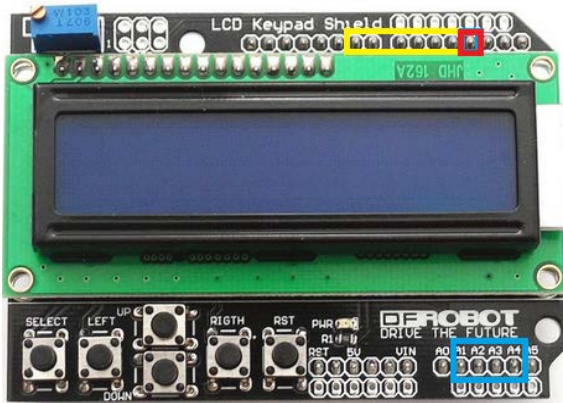


Figura 11 – Shield LCD para Arduino (DROBOTSONLINE, 2014).

Idealizado e construído para ser perfeitamente adaptado sobre a plataforma do Arduino, esse componente facilitou a determinação de grandezas inconsistentes e apontou imediatamente as correções necessárias exigidas pelo processo.

O código embarcado no microcontrolador controla a tensão e a corrente sobre a carga, simulando o painel a plena carga, neste caso uma fonte de corrente contínua. O fluxograma do código pode ser observado na Figura 12 e apresenta uma visão detalhada do programa configurado no componente Atmega 328.

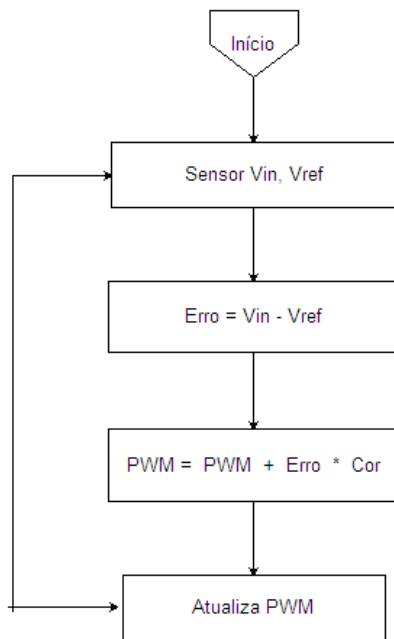


Figura 12 – Fluxograma do algoritmo Tensão Constante.

Esse método de tensão constante é de simples implementação, sendo necessário apenas o

conhecimento da variável VP_{solar} do painel fotovoltaico.

Esse método consiste na relação entre a tensão que fornece a potência máxima (V_{MP}) e a tensão em circuito aberto (V_{OC}), existentes nos painéis fotovoltaicos. Esse valor é aproximadamente constante e igual a 0,78 V (na célula fotovoltaica), independente das condições externas ao funcionamento do painel.

O algoritmo realiza a medição da tensão do painel e a compara com a tensão de referência. Em seguida é calculada a diferença mediante a comparação entre as duas variáveis. Com esse dado é possível atualizar o índice de modulação, tendendo a igualar as tensões, fazendo com que o painel trabalhe fornecendo a potência máxima aproximada.

O código embarcado no microcontrolador ATmega328, na plataforma Arduino, para testes com tensão constante de 17 V e corrente limitada a 300 mA, simula a condição padrão de MPP e, a partir destes, realiza os testes no protótipo.

Foram utilizadas, juntamente ao código, algumas linhas de comando responsáveis por externar em um computador dados seriais que mostravam os valores lidos e calculados. Isso ocorreu quando o número de informações solicitadas para análise era maior do que o *shield* LCD poderia apresentar.

O código fonte da técnica P&O, por ser também fácil de projetar, descreve a atuação do microcontrolador sobre o sinal de PWM gerado e seus degraus de incrementos.

O fluxograma deste algoritmo está ilustrado na Figura 13.

Para esta técnica de Perturba & Observa, inicia-se o PWM com valor mínimo, faz-se uma leitura da tensão e da corrente do painel fotovoltaico e calcula-se a potência fornecida pelo painel. A partir desse ponto, verifica-se a tensão sobre o banco de supercapacitores, e se a bateria está carregada ou não para então iniciar o processo de carregamento.

5. RESULTADOS

Nos testes experimentais executados, o sistema funcionou adequadamente com a técnica de tensão constante e permitiu que o painel fotovoltaico mantivesse um carregamento constante e contínuo sobre um bloco de 10 supercapacitores de 150 F por 2,7 V durante o período de carga.

Os capacitores de grande porte foram carregados e se comportaram como uma bateria cujo valor total do módulo dos capacitores foi de 375 F em um arranjo que permitiu uma tensão sobre seus terminais de 5,4 V. Por motivo de segurança, foi definido um valor máximo na ordem de 4,85 V. O controle da velocidade de carga dos

supercapacitores foi reduzido em 10 vezes para que fosse possível acompanhar a variação dos valores

em cada etapa das medições. O protótipo de testes está apresentado na foto da Figura 14.

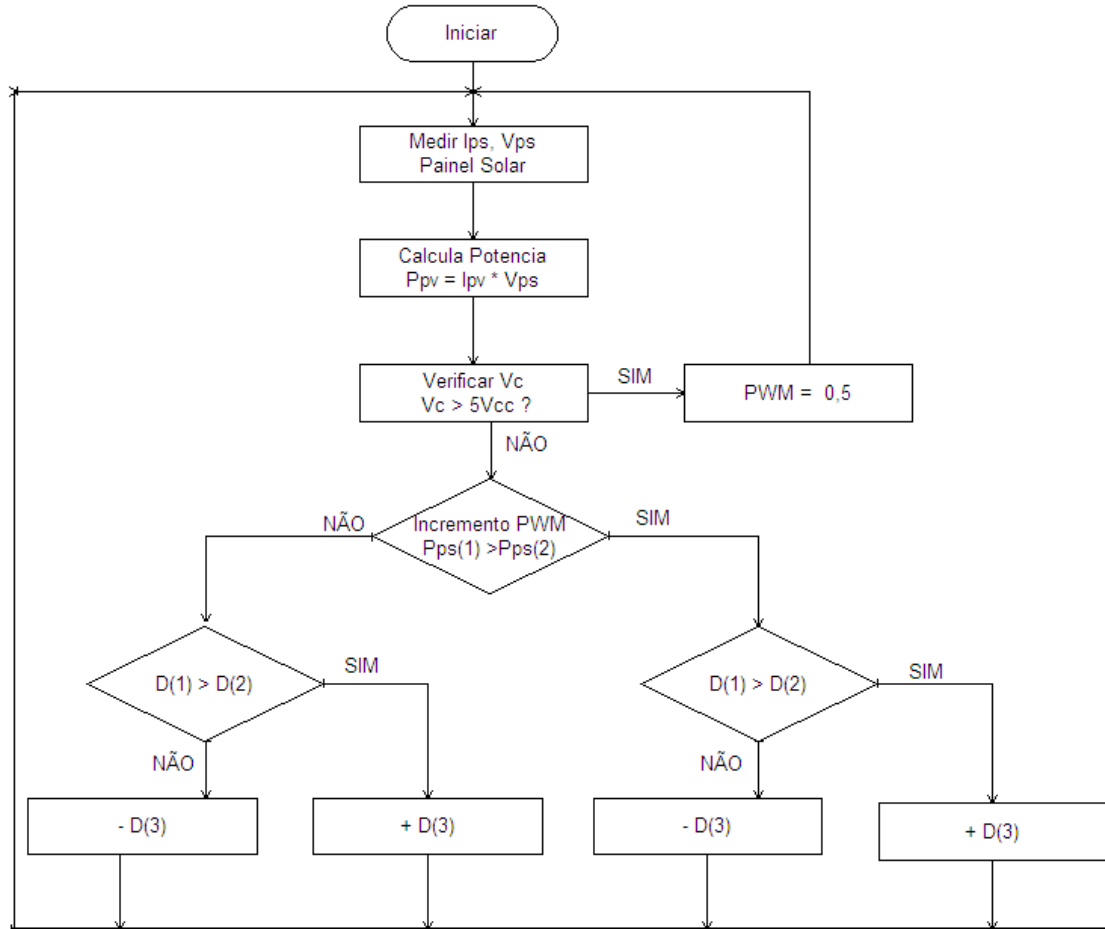


Figura 13 – Fluxograma da técnica Perturba & Observa.

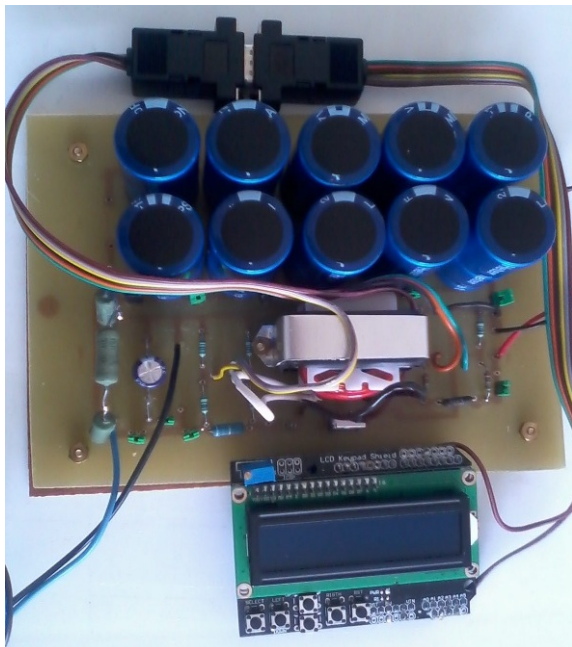


Figura 14 - Protótipo de testes.

5.1. Análise das medições feitas nos testes

A imagem da Figura 15 foi registrada na data dos testes de verificação do sistema completo. Nesta ilustração, o sistema está em pleno funcionamento.

Os testes foram realizados utilizando um painel solar projetado para essa finalidade, nas dependências do IFSC. Foram simuladas várias intensidades solares mediante o comando de um *dimmer*, que atuava como regulador de intensidade luminosa do conjunto de lâmpadas incandescentes, simulando, assim, a incidência de luz solar sobre o painel.

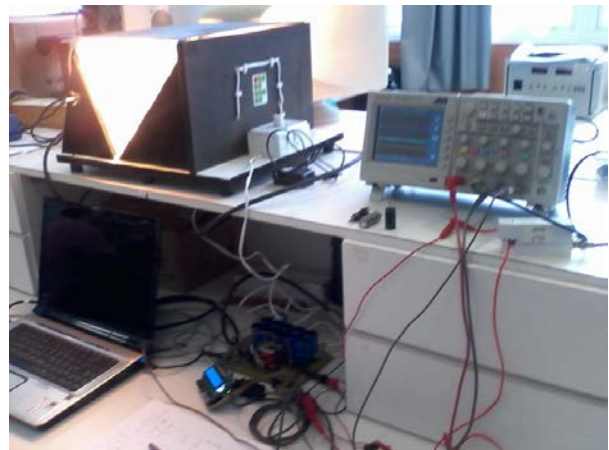


Figura 15 – Teste completo do sistema.

Inicialmente, foi conectado o painel e todo o equipamento ao protótipo para verificação do seu processo de atuação como carregador. Foi verificada uma estabilização satisfatória durante o carregamento e um tempo reduzido da busca do ponto de máxima eficiência do painel fotovoltaico. Os resultados podem ser visualizados na Figura 16. É importante salientar que o degrau de incremento do PWM projetado no *software* para esta técnica de MPP foi reduzido em 10 vezes para um maior número de registros na busca do MPP.

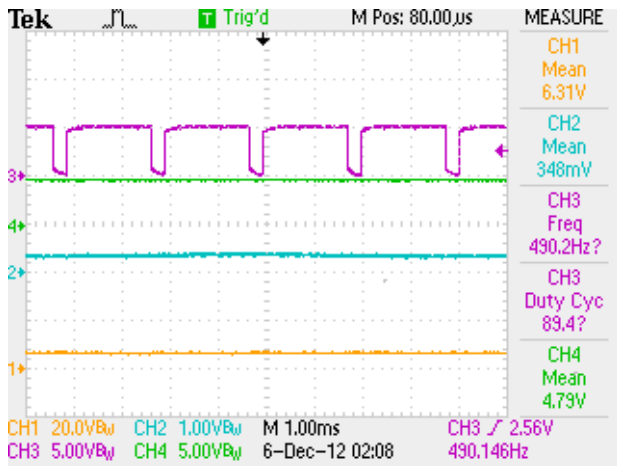


Figura 16 – Busca do MPPT.

O canal 1 do equipamento registra a tensão de entrada do painel solar. O canal 2 registra a grandeza que representa a corrente fornecida pelo painel ao circuito em funcionamento. O canal 3 registra pulsos do PWM que são gerados na etapa de controle pelo microcontrolador e sua frequência de operação também calculada é mostrada pelo instrumento. O canal 4 registra a grandeza que representa a tensão sobre o bloco de supercapacitores. Após, discriminados os canais do equipamento e as respectivas grandezas medidas, foi possível analisar as imagens registradas.

Na Figura 16 verifica-se que o carregador não atingiu o ponto de máxima eficiência energética do painel, pois a sua tensão ainda não está próxima dos 17 V, que é a região associada ao MPP do painel solar. No gráfico da Figura 17, o sistema está atuando próximo ao ponto de máxima eficiência energética, e o trabalho do conjunto está em pleno funcionamento. Neste momento, o conversor está com a razão cíclica definida e a tensão do painel solar está bem próxima do ponto de máxima eficiência energética. A tensão sobre os supercapacitores chegou aos 4,66 V dos 4,85 V ajustados como finais no carregamento completo.

No próximo registro, na Figura 18, o canal 1 não teve sua posição alterada, medindo a mesma grandeza (tensão do painel). O canal 2 está medindo a corrente sobre o indutor do conversor Buck e o canal 3 mede a mesma grandeza (razão cíclica). O

canal 4 prossegue a medição da tensão sobre o bloco de supercapacitores.

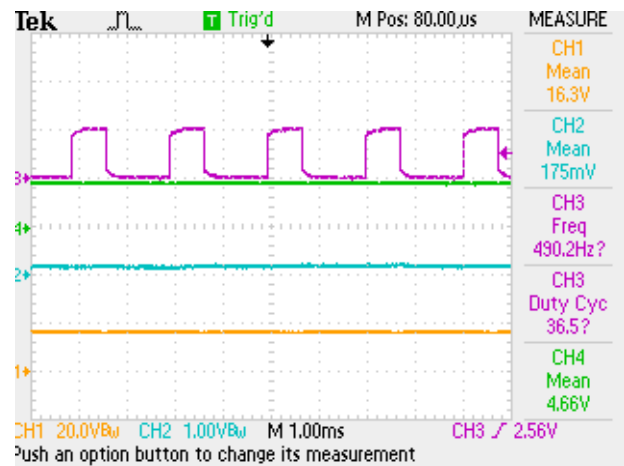


Figura 17 – Condição de carga no MPP.

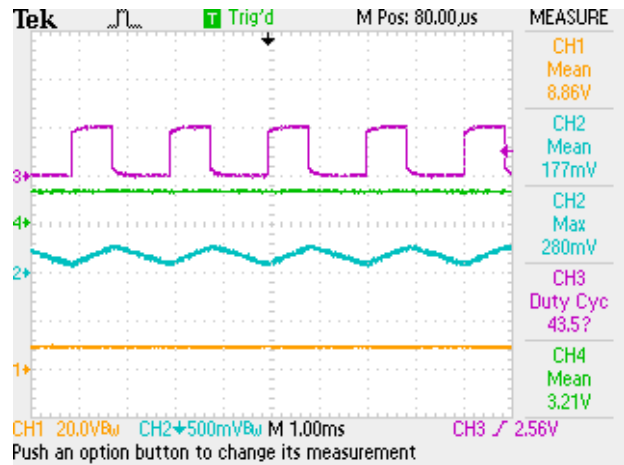


Figura 18 – Corrente no indutor antes do MPP.

Na Figura 18, estão apresentados os gráficos registrados para a medida da corrente média e máxima sobre o indutor do conversor Buck, numa condição ainda fora do MPP. Essas medidas foram repetidas para uma condição dentro do MPP, conforme observado na Figura 19.

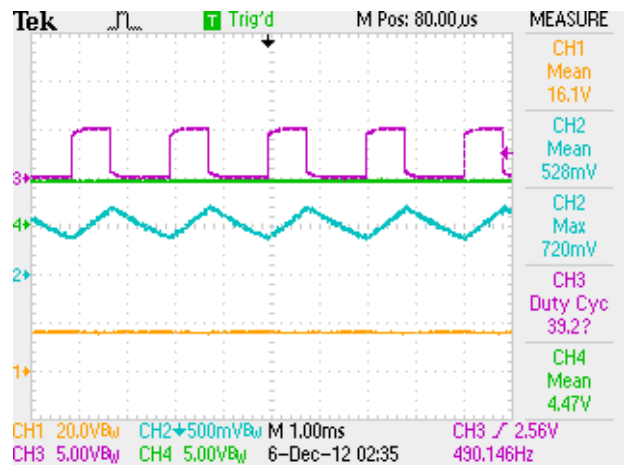


Figura 19 – Corrente no indutor trabalhando no MPP.

O tempo despendido pelo PWM para encontrar o ponto de máxima eficiência do painel solar foi verificado e seu valor foi de 12,5 segundos. O gráfico apresentado na Figura 20 mostra o registro desse tempo. Para que fosse possível registrarem-se valores em pontos intermediários de PWM, esse tempo foi aumentado para 125 segundos. Com essa redução no tempo de PWM, foi possível registrar os pontos intermediários de carga dos supercapacitores.

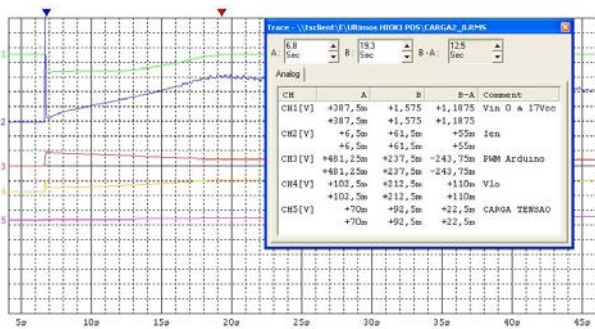


Figura 20 – Tempo de atuação do PWM.

Após várias medições, foi completado o ciclo de carga dos supercapacitores, que pode ser visto na Figura 21 do ciclo de carga completo.

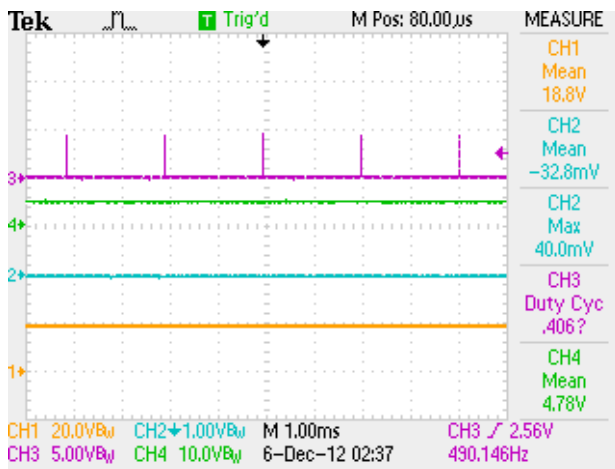


Figura 21 – Ciclo de carga completo.

Nesta fase dos testes, o equipamento havia efetuado o carregamento dos supercapacitores e atendia a mais uma carga resistiva de 45 ohms. Esta foi inserida em paralelo ao bloco de supercapacitores para garantir maior segurança no protótipo e serviu para testar a capacidade do sistema. Esta carga de 45 ohms drenava parte da corrente fornecida pelo painel solar e, por esse motivo, um tempo maior para o carregamento completo dos supercapacitores foi necessário, permitindo que todas as leituras nas fases de experimentos pudessem ser registradas com segurança.

Ao observar a Figura 21, constata-se que o controle do ciclo está ativo apenas para manter a

tensão sobre os capacitores e a carga do sistema acima comentado. A tensão do painel se manteve dentro do limite, e a corrente drenada para o sistema foi baixa, aproximadamente 33 mA.

Outro resultado relevante desses testes foi a verificação do rendimento relacionado à conversão total do sistema. Os registros apresentados na Figura 22 mostram as relações de potências calculadas com essas medidas.

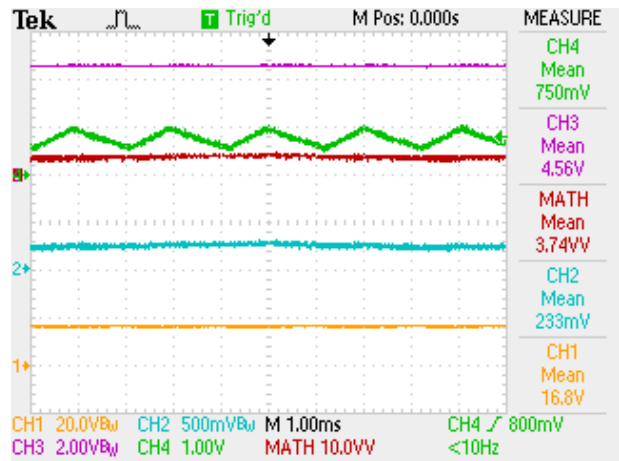


Figura 22 – Entradas e saídas – rendimento no MPP.

Na Figura 22 observa-se que o canal 2 representa a corrente fornecida pelo painel solar, enquanto que o canal 3 registra a potência calculada pelo equipamento das grandezas lidas. O canal 4 apresenta, no momento do registro, a corrente fornecida ao bloco de capacitores. O canal 3 também apresenta a tensão sobre o bloco de supercapacitores. A potência foi calculada pelo software do equipamento de registro e resultou em um valor de 3,74 W sobre a carga e os supercapacitores. No canal 1 o painel trabalha sobre o MPP, próximo dos 17 V, e em ciclo de carga. É possível determinar, mediante essas leituras, a potência de entrada do mesmo e com este calcular o seu rendimento, verificando sua eficiência com um valor próximo ao real.

A potência calculada pelo equipamento foi de 3,74 W. O valor da potência de entrada foi calculado conforme apresentado na Equação 9.

$$P = V_{in} \cdot I_{in}$$

$$P = 16,8 \cdot 0,233 \quad [9]$$

$$P = 3,9144 \text{ W}$$

O cálculo do rendimento é apresentado na Equação 10.

$$\eta = 100 \cdot \frac{P_{calculada}}{P_{fornecida}} \quad [10]$$

$$\eta = 100 \cdot \frac{3,74}{3,9144}$$

$$\eta = 95,54\%$$

O rendimento foi, novamente, calculado para outro ponto de operação e manteve-se estável e próximo ao da medida anterior, conforme a Figura 23.

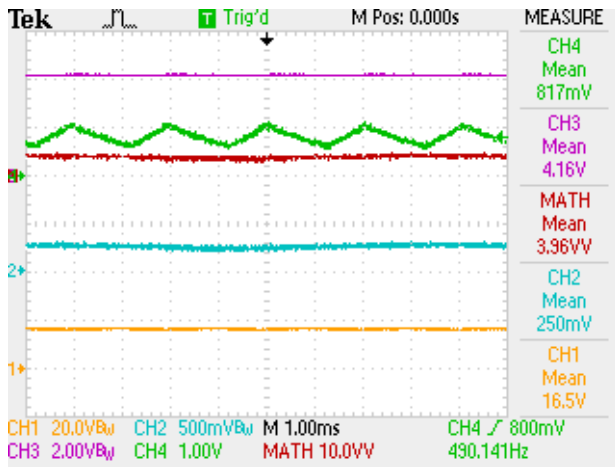


Figura 23 – Entradas e saídas – momento 2 rendimento.

Neste momento, a potência calculada era de 3,96 W, enquanto que a entrada fornecia a potência de 4,125 W, resultando em rendimento de 96,00%. Isto comprova que a eficiência não variou durante as medições do sistema.

Neste ponto cabe ressaltar que o cálculo do rendimento de potência não leva em consideração a alimentação do circuito de controle. Este foi conectado a um microcomputador que fornecia a energia necessária ao microcontrolador. As perdas do circuito ocorreram sobre os resistores R1, R2 e sobre o indutor do conversor Buck, juntamente ao CI PROFET.

Por último, porém não menos importante, foi registrada a curva de descarga dos supercapacitores, incluindo um circuito com 30 LEDs de alto brilho em paralelo com a resistência de 45 ohms e drenando energia do banco de supercapacitores. O sistema forneceu energia durante o período de teste, mesmo com esta carga muito intensa, e notou-se que a tensão no bloco de capacitores diminuía mais lentamente quanto menor a corrente drenada. Dessa forma, a descarga energética tende à estabilidade, mantendo os LEDs e a carga em funcionamento contínuo. Na Figura 24 está demonstrada a curva de descarga do bloco de capacitores nesta condição.

Com essas cargas drenando corrente de 240 mA, e com o bloco de supercapacitores não totalmente carregado, foram registrados 450 segundos de ensaio em operação normal, sem interrupções por falta de energia no bloco de supercapacitores. O consumo pretendido para o sistema de iluminação seria de apenas 125 mA.

Após o carregamento completo dos supercapacitores, esses deveriam fornecer energia para uma iluminação de balizadores de jardim, ou iluminação de calçadas, o que, dependendo da carga, deveria atender o período noturno.

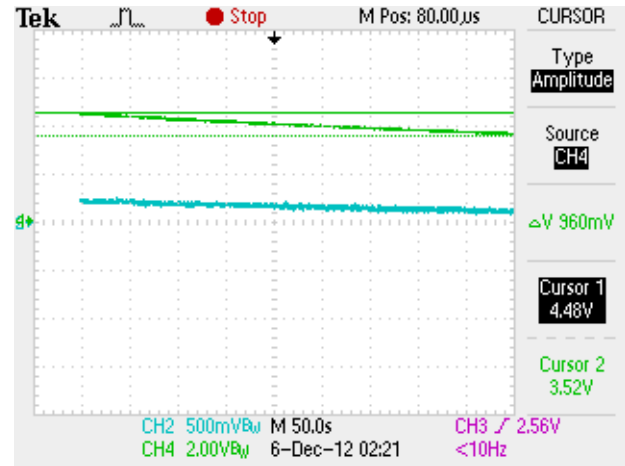


Figura 24 – Curva de descarga dos Supercapacitores.

O teste de autonomia do sistema, com duração de mais de 40 minutos em regime contínuo, está apresentado na Figura 25.

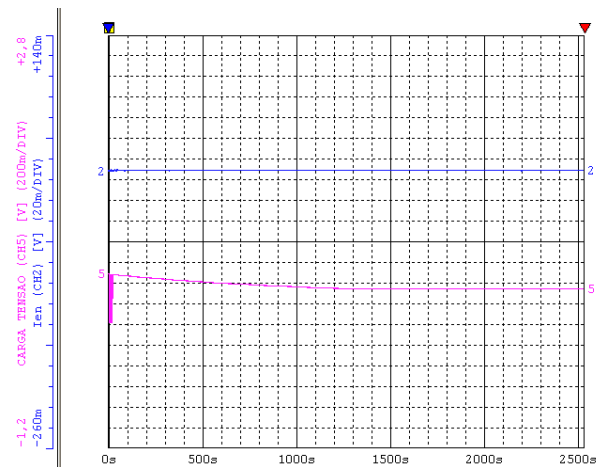


Figura 25 – Curva de autonomia do protótipo.

Observa-se nesse registro que a tensão durante os primeiros 500 segundos cai mais rapidamente que durante os 500 segundos seguintes. Nos próximos 1.500 segundos a queda é quase inexpressiva. A tensão limite para o funcionamento desse sistema de iluminação, baseando-se no valor de tensão das baterias de chumbo ácido, é de 3,325 V. Como a tensão se manteve durante o último intervalo de 1.000 segundos em 3,66 V, pode-se verificar que o sistema mantém o tempo solicitado nos cálculos do protótipo de duas horas ou mais.

Com a demonstração do protótipo, de sua confecção e dos resultados obtidos e demonstrados nos gráficos e registros, pode-se confirmar a

atuação desse componente como uma opção no armazenamento de energia elétrica. Esses resultados sinalizam que o produto apresenta-se competitivo no que se refere a acumuladores de energia elétrica.

É importante ressaltar que os resultados dos testes foram aproximados, pois não apresentam certificação de qualquer instituto de metrologia. Esses dados servem para comprovar que o produto apresenta-se viável quando um correto dimensionamento de cargas é realizado.

Uma característica importante a ser avaliada na escolha dos supercapacitores é sua resistência interna. Essa característica é a responsável pelo tempo que o mesmo, utilizado como acumulador, poderá manter a energia guardada para uso posterior.

6. CONCLUSÕES

Na revisão bibliográfica deste trabalho foram abordados tópicos sobre o funcionamento e construção das células solares e caracterizados alguns dos problemas de eficiência na conversão de energia absorvida. Foram também observados alguns tópicos relacionados à tecnologia fotovoltaica.

As descrições de características mais comuns dos componentes utilizados e suas configurações foram brevemente apresentadas e indicaram a existência de muitas técnicas para determinação do rendimento de um painel fotovoltaico. Todavia, as atuais barreiras tecnológicas e econômicas ainda demandam um custo maior para que haja um ganho de eficiência do painel fotovoltaico. Entre os problemas encontrados, o mais crítico foi a ineficiência de conversão do painel fotovoltaico, atualmente em torno de 16%. Isto se traduz em uma das principais limitações no uso de painel fotovoltaico, juntamente com o seu custo. Esse tema é frequentemente abordado, pois uma variedade de trabalhos publicados, principalmente no exterior, foram encontrados.

Mesmo apresentando uma baixa eficiência, os painéis fotovoltaicos apresentaram uma curva característica de corrente em função da tensão, que traduz o ponto de máxima potência. Contudo, o mesmo não se encontra sempre nesta condição de funcionamento, pois esses pontos também se alteram com a temperatura e a intensidade solar.

Neste trabalho, foi projetado um circuito eletrônico capaz de realizar o carregamento de um banco de capacitores de grande porte através de um painel solar ajustado sob o ponto de máxima potência, buscando o melhor ponto energético de uso do módulo solar.

Para que os objetivos fossem alcançados, foi utilizada uma topologia que incluiu um conversor CC-CC tipo Buck e um banco de capacitores, para

que depois de carregado fosse ligado a um sistema de iluminação para uso posterior. Para determinar o ponto de máxima potência do painel fotovoltaico foi utilizado o microcontrolador, que também é responsável pelo controle de energia entregue à carga pelo chaveamento do PWM.

Após a revisão bibliográfica, optou-se pela utilização do conversor tipo Buck, por apresentar uma construção simples e atender à solicitação do projeto sem restrições.

Um microcontrolador do fabricante Atmel, o ATmega328 foi utilizado em função de sua disponibilidade, consumo e quantidade de periféricos disponíveis. Todavia, em um projeto mais arrojado de um produto completo, este componente deverá ser substituído. Optou-se, no protótipo de desenvolvimento, pela utilização do controle de PWM com a técnica do modelo de tensão constante, que se mostrou um bom algoritmo de controle, de simples implementação e de eficiência reconhecida.

Também, na construção de um conversor CC-CC tipo Buck, este foi aplicado como um carregador para os supercapacitores. Ele foi facilmente confeccionado e, após a análise das várias técnicas de controle apresentadas, foi escolhida uma que atendesse de forma integral o solicitado pelo protótipo.

Os capacitores de grande porte foram arranjados de forma a atender a necessidade da carga e capazes de atender às expectativas no quesito capacidade de carregamento e manutenção do dispositivo, que seria uma iluminação de emergência.

Fica aqui o registro de que, para se obter 375 F em tensão de 4,85 V, foram arranjados 10 supercapacitores em blocos de série e paralelo, o que representou um volume pouco maior que duas vezes o volume que as baterias de chumbo-ácido apresentavam. Essa pode ser uma limitação do uso proposto.

Após estudos das características dos supercapacitores verificou-se que a resistência interna dos capacitores de grande porte deve ser avaliada para esse uso, para possibilitar um melhor rendimento do dispositivo quanto ao tempo de armazenamento.

Finalmente, conclui-se que o uso de capacitores de grande porte como acumulador de energia ainda deve passar por testes mais dedicados à necessidade de cada aplicação. É válido salientar que esse componente está ganhando mais espaço para aplicações desse tipo devido ao crescente desenvolvimento da tecnologia dos materiais que podem ser utilizados na sua confecção.

Conforme a bibliografia citada neste estudo, também fica evidente que, desde a sua fabricação

até os dias de hoje, foram melhoradas as qualidades desses componentes mediante o desenvolvimento de novos materiais. Existem diversos projetos de uso de supercapacitores com finalidades idênticas, porém com características particulares de utilização.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO. Disponível em <<http://www.arduino.cc>>. Acesso em: 11 dez. 2012.
- BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência**. 4. ed. Florianópolis: Ed. do Autor, 2001.
- BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar C. **Conversores CC-CC básicos não isolados**. Florianópolis: Edição dos Autores, 2000.
- CRESESB. **Energia Solar Princípios e Aplicações**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2012.
- DROBOTICSONLINE. Disponível em: <<http://www.droboticsonline.com/index.php/arduino/arduino-shields/arduino-lcd-keypad-shield.html>>. Acesso em: 11 dez. 2012.
- GLAVIN, M.E.; CHAN, Paul K. W.; HURLEY, W.G. **Optimization of autonomous hybrid energy storage system for photovoltaic applications**. Authorized licensed use limited to: Clovis Petry. p. 1417-1424. 2009.
- MAXWHEEL INC. **Ultracapacitor Overview**, 2012. Disponível em: <<http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors>>. Acesso em: 11 dez. 2012.
- RUIZ, J. A. **Metodologia científica: guia para eficiência nos estudos**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 1999.
- WU, Thomas. **Energy Storage Device: Ultracapacitor**. Flórida, 2012. Disponível em: <<http://www.eecs.ucf.edu/~tomwu/course/eel6208/presentation2011/S09%20Ultracapacitor.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2012.