

JOÃO BATISTA RODRIGUES

**UTILIZAÇÃO DE CAPACITORES DE GRANDE PORTE
PARA SUBSTITUIÇÃO DAS BATERIAS
CONVENCIONAIS EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO**

FLORIANÓPOLIS, 2012

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA - IFSC
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO DE
PRODUTOS ELETRÔNICOS**

JOÃO BATISTA RODRIGUES

**UTILIZAÇÃO DE CAPACITORES DE GRANDE PORTE
PARA SUBSTITUIÇÃO DAS BATERIAS
CONVENCIONAIS EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO**

**Monografia submetida ao
Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos
requisitos de obtenção do Título
de Especialista em
Desenvolvimento de Produtos
Eletrônicos.**

**Professor Orientador:
Clóvis Antônio Petry, Dr Eng.**

FLORIANÓPOLIS, 2012

CDD 621.3192
R696u

Rodrigues, João Batista

Utilização de capacitores de grande porte para substituição das baterias convencionais em sistemas de iluminação [monografia] / João Batista Rodrigues; orientação de Clóvis Antônio Petry. – Florianópolis, 2013.

1 v. : il.

Monografia de especialização (Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Curso de Pós-graduação em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos.

Inclui referências.

1. Supercapacitor. 2. Conversor CC-CC. 3. Bateria. I. Petry, Clóvis Antônio.
II. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis
Catalogado por: Edinei Antonio Moreno CRB 14/1065
Rose Mari Lobo Goulart CRB 14/277

UTILIZAÇÃO DE CAPACITORES DE GRANDE PORTE PARA SUBSTITUIÇÃO DAS BATERIAS CONVENCIONAIS EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

JOÃO BATISTA RODRIGUES

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Especialista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Pós-Graduação (Lato Sensu) em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 19 de dezembro de 2012.

Banca Examinadora:

Clóvis Antônio Petry, Dr.Eng.

Flávio Alberto B. Batista, Dr. Eng.

Telles Brunelli Lazzarin, Dr. Eng.

Dedico este trabalho
àqueles que o tornaram
possível e em especial
aos meus filhos e a
amável companheira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo sopro que nos deu a vida e com ela deu-nos a capacidade de adquirir o conhecimento, para que possamos deixar aqui uma obra que ajude alguém de alguma forma.

Agradeço os amigos de trabalho que não mediram esforços, trabalhando algumas vezes em meu lugar, para que completasse mais esta etapa.

Agradeço minha família pela compreensão com as horas em que não me fiz presente em momentos e situações que solicitavam minha presença, pela compreensão com o dever deste.

Agradeço aos meus filhos pelo incentivo durante a condução dos trabalhos em casa e por compreenderem minha ausência em alguns momentos importantes.

Agradeço aos meus mestres pelo conhecimento transmitido de forma excelente ao longo do curso, em especial ao professor: Dr. Clóvis Antônio Petry pela orientação, empréstimos de componente de desenvolvimento e mais ainda pela sugestão do trabalho e confiança depositada na minha capacidade.

Agradeço a ELETROSUL/ELETROBRAS, nas pessoas do Sr Alcir Favareto e Sr Ayres Ulysea Júnior pelo apoio e empréstimo de equipamentos de medições para testes e ao setor Físico/Químico da empresa, por ter gentilmente emprestado o painel solar utilizado em alguns testes e outros componentes.

Agradeço o IFSC por oportunizar este aprendizado e pelos recursos técnicos sempre disponíveis na execução deste trabalho, que desta forma manteve o compromisso com a qualidade do curso.

Há pessoas que transformam o sol numa simples mancha amarela, mas há também aquelas que fazem de uma simples mancha amarela o próprio sol.

Pablo Picasso

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar um novo conceito de aplicação para um componente bastante utilizado no meio eletrônico em sistemas de filtro e retificação. A inovação consiste em 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 através de 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 estes 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 desta energia retirada do painel fotovoltaico para os Supercapacitores, criando um novo conceito de armazenamento de energia, em substituição as baterias convencionais.

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

ABSTRACT

The proposal of this work is to present a new application to an electronic component which is already used in filter systems and rectification. The innovation 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.

Key-words: Ultracapacitor. DC-DC converter. Battery.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Diagrama em blocos da estrutura do trabalho.	21
FIGURA 2 - Célula Fotovoltaica, de Silício monocristalino.	23
FIGURA 3 – Potencial de produção mundial de energia solar. ...	25
FIGURA 4 - Árvore fotovoltaica na Áustria.	26
FIGURA 5 - Curvas I x V de um módulo fotovoltaico. Em função de (a) insolação G; (b) temperatura TC.	29
FIGURA 6 - Modelo do método da tensão constante.	30
FIGURA 7 - Fluxograma do método P&O.	31
FIGURA 8 - Fluxograma método da Condutância Incremental. ...	32
FIGURA 9 - Modelo do método Beta.	33
FIGURA 10 - Modelo do método da Oscilação do Sistema.	34
FIGURA 11 - Modelo do método da Correlação de Ripple.	35
FIGURA 12 - Topologia de uma fonte de alimentação linear.	37
FIGURA 14 - Topologia de um conversor CC-CC.	38
FIGURA 15 - Forma de onda de uma chave estática.	40
FIGURA 16 - Modulação por largura de pulso.	41
FIGURA 17 – Configuração básica de um conversor Buck.	43
FIGURA 18 - Configuração básica de um conversor Boost.	44
FIGURA 19 - Polo de bateria de chumbo ácido.	50
FIGURA 20 - Curva de descarga das baterias.	51
FIGURA 21 - Curva de carga com tensão constante das baterias.	51
FIGURA 22 - Bateria de Níquel-Cadmium.	52
FIGURA 23 - Bateria NiMh.	54
FIGURA 24 - Gráfico carga de baterias NiCd e NiMh.	54
FIGURA 25 - Bateria de Li-Ion.	55
FIGURA 26 - Curva de carga de baterias Li-ION.	56
FIGURA 27 - Visão Macro Proposto.	64
FIGURA 28 - Fluxograma dos componentes do trabalho.	65
FIGURA 29 - Curvas de corrente e potência do painel.	69
FIGURA 30 - Esquema do conversor Buck.	70
FIGURA 31 - Amostra de Núcleo e Carretel tipo E.	74
FIGURA 35 - Pontos de monitoração conversor AD, entrada do PV.	77
FIGURA 36 - Pontos de conexão do conversor AD na saída a carga.	79

FIGURA 37 - Simulação do PV com carga.	79
FIGURA 38 - Curva característica de tensão e corrente do PV de 5 watts.....	80
FIGURA 39 - Módulo Arduino.	84
FIGURA 40 - Shield LCD para Arduino.....	85
FIGURA 41 - Fluxograma do algoritmo Tensão Constante.....	87
FIGURA 42 - Fluxograma da técnica Perturba & Observa.....	88
FIGURA 43 - Protótipo de testes.....	89
FIGURA 44 - Teste completo do sistema.....	90
FIGURA 45 - Busca do MPPT.....	91
FIGURA 46 - Condição de carga no MPP.....	92
FIGURA 47 - Corrente no indutor antes do MPP.	93
FIGURA 48 - Corrente no indutor trabalhando no MPP.	94
FIGURA 49 - Tempo de atuação do PWM.	94
FIGURA 50 - Ciclo de carga completo.	95
FIGURA 51 - Entradas e saídas – rendimento no MPP.	96
FIGURA 52 - Entradas e saídas - momento 2 rendimento.....	97
FIGURA 53 - Curva de descarga dos Supercapacitores.....	98
FIGURA 54 - Curva de autonomia do protótipo.	99

LISTA DE SIGLAS

AD	Conversor Analógico Digital;
a-Si	Silício amorfo;
CC-CC	Corrente contínua para corrente contínua;
CRESESB	Centro de Referência para energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito;
CI	Circuito Integrado;
CISC	Complex Instruction Set Computer, Computador com um Conjunto Complexo de Instruções";
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only, memória programável de apenas leitura apagável eletricamente;
FLASH	Memórias com campos reprogramáveis;
GWp	gigawatts-pico;
I/O	Input/Output, entradas e saídas;
KOH	Hidróxido de Potássio;
LCD	Liquid Crystal Display, monitor de cristal líquido;
Li-ion	íon de lítio;
LVD	Low Voltage Disconnect, Desconexão por baixa tensão;
MPP	Maximum Power Point, ponto de máxima potência;
MPPT	Maximum Power Point Tracking, Rastreador do ponto de máxima potência;
NiCd	Níquel cadmiun;
NiMH	hidreto metálico de níquel.
NiMH	hidreto metálico de níquel;
P&O	Perturb and Observe, perturbação e observação;
PCI	Placa de Circuito Impresso;
PV	Photovoltaic Panel, Painel fotovoltaico;
PWM	Pulse-Width Modulation, modulação por largura de pulso;
RISC	Reduced Instruction Set Computer, conjunto reduzido de instruções computacionais;
RAM	<i>Random Access Memrory</i> , memória de acesso aleatória;
ROM	<i>Read Only Memory</i> , memória apenas de leitura;

UA unidade astronômica que é 149.597.870.700 m;
W/m² Watts por metros quadrado;

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1	O Problema	16
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivos gerais	17
1.2.2	Objetivos específicos	17
1.3	Justificativa	18
1.4	Delimitações	19
1.5	Propostas de Solução	20
1.6	Estrutura do trabalho	20
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Painel solar fotovoltaico	22
2.1.1	Construção da célula solar	23
2.1.2	Aplicações	24
2.1.3	Aplicações de baixa-potência	26
2.1.4	Busca do ponto de máxima potência dos Painéis Fotovoltaicos - MPPT	28
2.2	Conversores CC	35
2.2.1	Introdução aos Conversores CC-CC	36
2.2.2	Tipos de conversores de energia	37
2.2.3	Controle dos conversores CC-CC	39
2.2.4	Tipos de Conversores CC-CC	42
2.3	Controle	45
2.4	Baterias	47
2.4.1	Baterias de chumbo ácido	49
2.4.2	Baterias de Níquel Cadmium (NiCd)	52
2.4.3	Baterias de hidreto metálico de níquel (NiMh)	53
2.4.4	Baterias de íons de lítium (Li-ION)	55
2.5	Os “Supercapacitores”	57
2.5.1	História dos Supercapacitores	57
2.5.2	Características	58
2.5.3	Aplicações dos Supercapacitores	60
2.6	Iluminação	61
3.	METODOLOGIA	62
3.1	Visões Macro da proposta	63
4.	DESENVOLVIMENTO	65
4.1	Características elétricas do Painel solar	67

4.2	Conversor.....	69
4.2.1	Conversor BUCK.....	70
4.2.2	Projeto do conversor Buck.....	71
4.3	Etapa de Controle.....	75
4.3.1	Escolha da Plataforma Microcontrolada.....	75
4.3.2	Monitoração das grandezas do Painel Fotovoltaico.....	76
4.3.3	Simulação do módulo fotovoltaico.....	79
5.	RESULTADOS DE TESTES EXPERIMENTAIS.....	88
5.1	Análise das medições feitas nos testes.....	90
6.	CONCLUSÃO.....	100
	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	102
	REFERÊNCIAS.....	104
	APÊNDICES.....	108

1. INTRODUÇÃO

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

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

Para que esta energia estivesse presente no cotidiano das pessoas, seu armazenamento tornou-se importante e sua portabilidade indispensável para que se tivesse este 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 este 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.

Estes acumuladores devem ter o seu descarte controlado. A utilização destes 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.

Há anos o homem estuda formas de armazenar energia que possam minimizar estes problemas, desde a retirada de energia na fonte até ao armazenamento, acondicionamento e transporte. Por estes motivos, este trabalho tem o objetivo de

explorar a capacidade dos supercapacitores no acúmulo de energia elétrica para utilização posterior.

Este 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.

Estas 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.

1.1 O Problema

O problema a ser estudado 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 deste problema propõe-se elaborar um protótipo capaz de armazenar a energia elétrica em supercapacitores. Esta energia será proveniente de painéis fotovoltaicos e comprovará através deste 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 Faraday 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, onde se faz necessário 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.

1.2 Objetivos

Comprovar que a utilização de “Supercapacitores” como acumulador de energia elétrica pode ser uma opção de produto de maior eficiência tanto no quesito portabilidade quanto no armazenamento de energia elétrica, predisposto a utilização imediata ou não pelo homem.

1.2.1 Objetivos gerais

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.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um estudo sobre os problemas da utilização das baterias que utilizam reações químicas no acúmulo de energia elétrica;
- Estudar um componente eletrônico capaz de realizar com eficiência o controle e armazenamento de energia elétrica em um novo conceito de bateria;
- Utilizar a tecnologia de simulações de projetos eletrônicos em ferramentas específicas na área elétrica para consolidar os estudos neste projeto;
- Aplicar os conhecimentos de eletrônica, sistemas, projetos e planejamentos, que foram adquiridos durante esta etapa de especialização;
- Desenvolver um protótipo de um produto que possa comprovar a eficiência ou não do uso de grandes capacitores para o armazenamento de energia;

- Atender a sociedade com um projeto de inovação tecnológica, atentando para a preocupação ecológica.

Serão apresentados estudos quanto à vida útil de capacitores de grande porte e os sistemas de acúmulo de energia elétrica utilizados. Também serão avaliados sua capacidade de ciclos de cargas e descargas e o descarte deste material, bem como o seu impacto para a natureza.

Para que se fundamente este estudo, será desenvolvido um carregador para supercapacitores que apresentará de forma concreta algumas fundamentações para a conclusão deste trabalho quanto à carga acumulada.

Também se almeja com este trabalho, além do aprendizado pela pesquisa científica, colocar em prática os conhecimentos adquiridos no curso, contribuir para a evolução dos sistemas que acumulam energia elétrica e ainda agregar melhorias ao conceito dos grandes capacitores, dando assim um diferencial para a utilização destes componentes.

Vislumbra-se com este trabalho de conclusão de curso, unir os vários conteúdos estudados nas diversas áreas da especialização. Serão reunidos em uma obra estudos referentes à forma racional da utilização de energia elétrica pelo homem, bem como de sua aquisição e armazenamento, minimizando possíveis problemas na natureza.

1.3 Justificativa

Durante muitos anos o homem utiliza baterias para armazenamento de energia elétrica cujo fornecimento de energia fica predisposto a reações químicas que liberam gases nocivos. Não bastasse este problema, estas baterias são constituídas de metais pesados e altamente tóxicos, o que implica em cuidados específicos quanto ao seu descarte.

Os custos relacionados ao correto destino e depósito destes materiais está se avolumando à medida em que as fábricas não param de produzir este tipo de acumulador. A cada

ano novos produtos são lançados no mercado mundial e com eles é crescente também o número de novos acumuladores de energia.

Este trabalho apresenta um novo conceito de acumuladores de energia, utilizando capacitores de grande porte para este fim, cuja carga acumulada será retirada de painéis fotovoltaicos, sendo armazenada e utilizada de maneira limpa.

Além de apresentar uma solução a um problema já conhecido da humanidade, este trabalho apresenta um componente diferenciado. Se bem aplicado, este pode ser um importante aliado quanto ao acúmulo e portabilidade de energia elétrica, atendendo às necessidades do homem com tanta qualidade ou mais do que os acumuladores desenvolvidos até os dias de hoje.

1.4 Delimitações

O trabalho foi delimitado ao desenvolvimento de um carregador de energia elétrica para supercapacitores, o qual capturará a energia através de um painel fotovoltaico e a armazenará nestes componentes. Após completo o ciclo de carga, este utilizará a energia em um sistema de iluminação, de maneira a comprovar sua eficiência na utilização deste componente. Para que este trabalho torne-se prático, desenvolveu-se uma plataforma com um banco de supercapacitores que acumularão energia durante o período de um dia. Esta energia será fornecida pelo sol através de painéis fotovoltaicos e será utilizada a mesma energia seguidamente ao final do dia para iluminar uma área de circulação.

Não serão levadas em consideração para este estudo estruturas diversas de conservação de energia. Portanto, o trabalho será focado apenas na maneira de armazenar e utilizar esta energia com o uso dos “Supercapacitores”.

1.5 Propostas de Solução

A proposta de solução deste estudo será o desenvolvimento de um protótipo que retenha a energia solar acumulada durante parte do período de um dia para a utilização em períodos em que esta se faça necessário. Com este protótipo serão verificados o armazenamento de energia em capacitores de grande porte, sua funcionalidade e sua característica como sistema de condicionamento elétrico.

1.6 Estrutura do trabalho

Este trabalho é apresentado em cinco capítulos. No capítulo 1 são introduzidos a apresentação do problema, os objetivos gerais e específicos, a justificativa, as delimitações, a proposta de solução para o projeto e um resumo de sua estrutura.

No capítulo 2, é abordada a revisão bibliográfica referente aos assuntos pertinentes ao projeto, como “Supercapacitores”, baterias de chumbo-ácido, baterias de níquel cádmio, células fotovoltaicas, componentes eletrônicos, conversores cc-cc e simulador de componentes eletrônicos.

O capítulo 3 apresenta a modelagem da proposta de solução para o problema, descrevendo uma visão macro dos módulos deste projeto.

No capítulo 4 são descritos o desenvolvimento do projeto, a condução de seu estudo, suas etapas e componentes utilizados.

Finalmente, no capítulo 5, serão abordados os resultados obtidos, as conclusões advindas com a realização deste projeto, propostas para trabalhos futuros, bibliografia sobre o decorrido e os anexos que se fizerem necessários.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, 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 estes assuntos acima descritos fazem parte do domínio do presente estudo.

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

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 estas explicações, inicia-se a etapa de potência através do projeto do conversor para a aplicação neste trabalho. Realimentação, monitoração e controle serão também explanados a seguir em cada etapa abaixo discriminada. Por último, será planejado um sistema de iluminação de emergência com base em uma unidade de uso comercial. Esta luminária de emergência típica, fornecerá os dados de consumo e capacidades energéticas para os cálculos da previsão de carga dos supercapacitores.

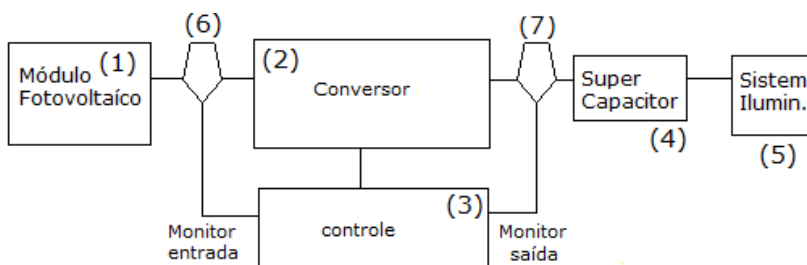


FIGURA 1 - Diagrama em blocos da estrutura do trabalho.

Fonte: O autor.

2.1 Painel solar fotovoltaico

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. Nestes 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.

Este painel, representado no diagrama de blocos pelo número (1), é composto por células solares, que assim são chamadas, pois captam a luz do sol. Estas 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 estas características pode gerar uma significativa quantidade de energia elétrica ao longo do tempo (de miliwatts a quilowatts). Cabe salientar que, para receber a 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 a diminuição do custo da tecnologia de eletrônica de controle, estão levando a

um maior rendimento na produção de células solares, juntamente a redução de custos de produção. Isto indica que, em breve, este processo dispensará qualquer estudo de viabilidade e tendencialmente será um dos mais utilizado pela população.

2.1.1 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 de 1 AU (unidade astronômica), uma célula de silício de 6 centímetros de diâmetro pode produzir uma corrente de 0,5 ampère sob uma tensão de 0,5 volt, ou seja, cerca de 0,25 watts. Uma unidade astronômica (AU) é a distância média entre a Terra e o Sol, sendo o valor desta constante de 149.597.870.700 m. Uma célula solar pode ser observada na FIGURA 2.

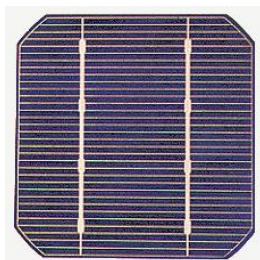


FIGURA 2 - Célula Fotovoltaica, de Silício monocristalino.

Fonte: < <http://www.cresesb.cepel.br.>>

Os painéis solares fotovoltaicos são construídos dessas células que são cortadas em formatos apropriados, protegidas da radiação e de danos ao manusear pela aplicação de uma capa de vidro e cimentados 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 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 cai e por este motivo é desejável então reduzir este calor. O resultado da construção e integração deste conjunto é chamado de painel solar.

2.1.2 Aplicações

Os painéis solares estão cada vez mais promissores como um elemento importante na geração de energia limpa, sua produção está sendo cada vez mais estimulada pelos órgãos de desenvolvimento sustentável na produção de energia elétrica.

Projetos de revestimentos de coberturas de casas e prédios para a produção de energia elétrica em microcélulas geradoras, que serão agregados aos sistemas de energia elétrica comercial, estão em fase de estudos e brevemente acontecerão.

A aplicação deste princípio de captação de energia elétrica já acontece há anos na aviação solar, em aquecimento solar de baixo custo e veículos elétricos. Contudo, o desenvolvimento do mercado fotovoltaico, em sua maior parte, está associado a programas governamentais. Os programas de maior destaque são a instalação de “telhados solares” em diversos países, como os EUA, Japão e Alemanha, que juntos prevêem a instalação de mais de 2,3 milhões desses telhados, oferecendo subsídios que chegam a 35% (FRAIDENRAICH, 2003).

Na FIGURA 3, apresentada a seguir, os círculos pretos representam as áreas de insolação que podem prover mais do que a demanda total de energia primária do mundo, considerando uma eficiência de conversão energética de

aproximadamente 8%. As cores no mapa mostram a incidência média de raios solares de 1991 a 1993 (no período de 24 horas), levando em conta a cobertura de nuvens segundo os satélites meteorológicos.

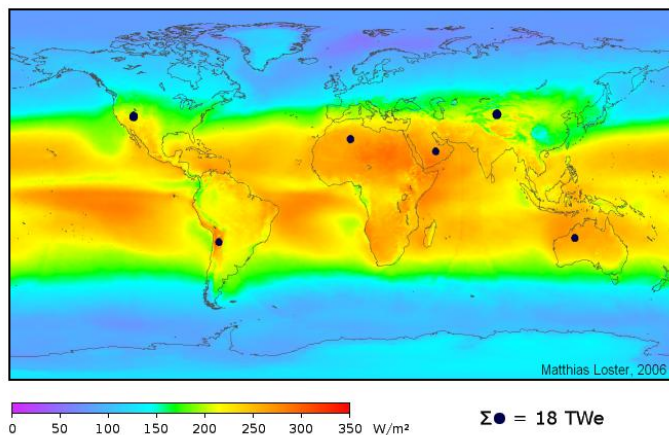


FIGURA 3 – Potencial de produção mundial de energia solar.

Fonte: < http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/ >

É pertinente salientar que a radiância solar média (W/m^2) é o valor correspondente à radiação solar sobre uma superfície horizontal de área de $1 m^2$. Os painéis solares são normalmente dispostos obliquamente, recebendo assim mais energia.

Na FIGURA 4 é apresentada uma aplicação típica de painel fotovoltaico produzindo energia na Áustria.



FIGURA 4 - Árvore fotovoltaica na Áustria.

Fonte:< http://pt.wikipedia.org/wiki/Painel_solar_fotovoltaico-Áustria.>

2.1.3 Aplicações de baixa-potência

Atualmente, os painéis solares instalados apresentam uma contribuição pouco expressiva para a produção mundial de energia elétrica. Isto ocorre devido ao custo por watt ser maior que o dos combustíveis fósseis. Sua utilização é mais frequente em aplicações como alimentação de boias, dispositivos em estradas ou desertos e antenas. Na Austrália, de forma experimental, são usados para alimentar automóveis em corridas como a World Solar Challenge.

Programas governamentais estão oferecendo redução de impostos e incentivos, como na Alemanha, Estados Unidos, Japão e Portugal.

Acredita-se que até meados do ano de 2009 a melhor utilização de painéis solares foi em veículos espaciais e naves que orbitam a Terra e Marte, e em naves que estão viajando em direção a regiões mais internas do sistema solar.

Algumas agências espaciais como as Japonesas e Europeias têm anunciado planos de desenvolver satélites de energia solar. Isto será possível utilizando-se um grande número de células fotovoltaicas que enviarão a energia captada para a Terra, usando microondas ou lasers.

Um dos melhores métodos de aproveitamento da energia solar nos painéis fotovoltaicos é sua orientação automática acompanhando a variação da luz solar. As naves espaciais são construídas assim, de modo que os painéis solares possam orientar-se independentemente do movimento da nave. Este procedimento aperfeiçoa a produção de energia quando o painel é orientado na direção da luz do Sol.

A energia solar já é utilizada em satélites artificiais, como por exemplo, as sondas Magellan em órbita de Vênus, e a Mars Global Surveyor, de Marte.

Há uma busca para minimizar a massa dos painéis solares de modo a aumentar a potência gerada na mesma unidade de área. Com isto, a massa total dos painéis solares é reduzida, possibilitando missões espaciais mais distantes do Sol. A técnica da utilização de concentradores fotovoltaicos reduz bastante a massa dos painéis solares, aumentando a eficiência, pois intensificam a luz incidente.

Os concentradores são dispositivos que intensificam a luz solar nas células, os quais fazem uso de lentes planas, conhecidas como lentes de Fresnel. Estas lentes têm a função de capturar a luz do sol que incide em uma grande área e concentrá-la em um pequeno ponto. A concentração de toda esta luz solar em um pequeno ponto permite que se reduza a quantidade de células solares e, com isto, os custos reduzem significativamente. A sonda espacial Rosetta, lançada em 2 de março de 2004, utilizou painéis solares nas proximidades de Júpiter. Anteriormente, o uso mais distante de painéis solares foi com a espaçonave Stardust, segundo informações contidas na

página http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/08jan_sunshine/ da Nasa.

2.1.4 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 energias 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%, são utilizadas algumas técnicas para minimizar as perdas durante o processo de aquisição desta energia.

2.1.4.1 Técnicas de busca do ponto de máxima eficiência do painel fotovoltaico

Neste trabalho não serão detalhadas todas as técnicas existentes para a verificação do ponto de máxima eficiência do painel fotovoltaico. De forma abrangente serão citadas algumas características de algumas das técnicas utilizadas para o controle do nível de energia absorvido e transformado em energia elétrica pela célula fotovoltaica. Para complementar, serão citadas as técnicas mais utilizadas e suas particularidades.

2.1.4.1.1 Método da Razão Cíclica Fixa

Este 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. Esta condição de funcionamento é constante, sendo conhecido como um método off-line. Neste método a resistência aparente da carga é ajustada uma única vez para a potência máxima do painel.

2.1.4.1.2 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. Esta tensão varia pouco nos terminais do módulo mesmo com a alteração da intensidade da radiação solar. Deste modo, fica assegurado que a tensão sobre a placa solar permaneça constante, sendo possível operar próximo ao maior rendimento. Na FIGURA 5 em (a) verifica-se a pouca variação de tensão sobre os diferentes níveis de insolação e em (b) sua variação com relação a temperatura do PV no MPP.

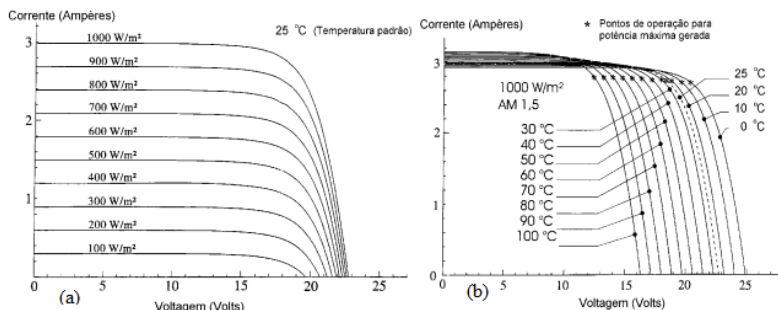


FIGURA 5 - Curvas I x V de um módulo fotovoltaico. Em função de (a) insolação G; (b) temperatura TC.

Fonte: CRESESB(2007).

Neste modelo, uma malha fechada de tensão aplica este método, conforme apresentado na FIGURA 6.

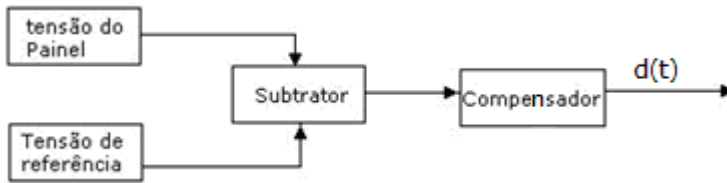


FIGURA 6 - Modelo do método da tensão constante.

Fonte: Baseado em BRITO(2009).

Uma tensão de referência é ajustada no microcontrolador e comparada com a tensão do painel solar, através desta comparação é ajustado o sincronismo do pulso de PWM. Este pulso obtém por aproximação o encontro da posição de máxima potência ajustada para o painel fotovoltaico utilizado.

Este foi o método selecionado para realizar os testes no protótipo e atendeu sem limitações às necessidades do projeto.

2.1.4.1.3 Método Perturba e Observa (P&O)

Este método opera periodicamente incrementando ou decrementando 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. Observe na FIGURA 7 o fluxograma básico deste método.

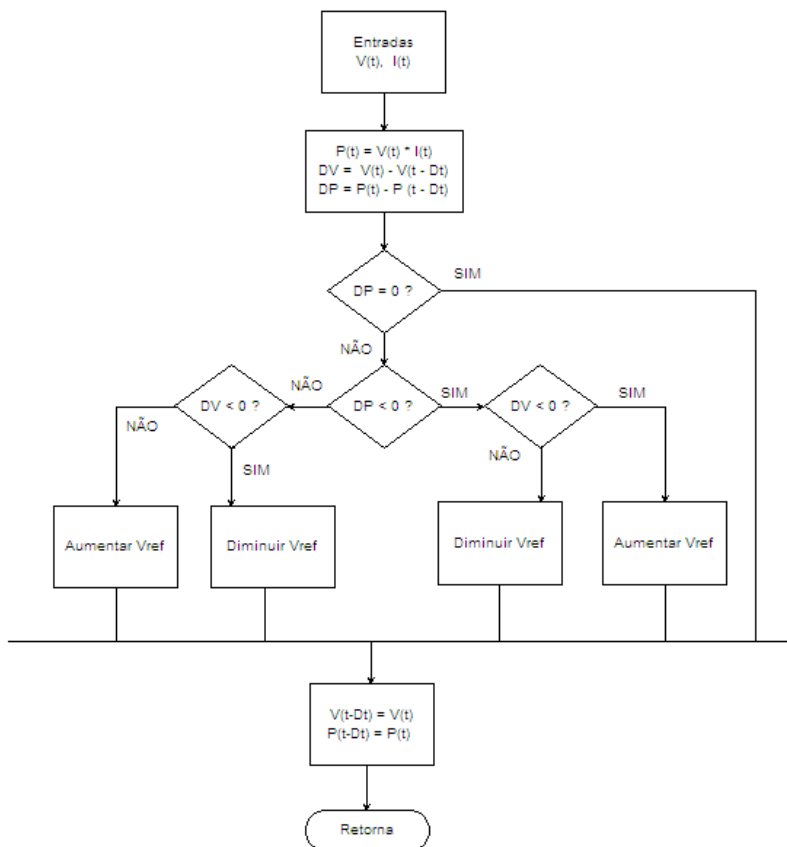


FIGURA 7 - Fluxograma do método P&O.

Fonte: baseado em BRITO(2009).

2.1.4.1.4 Método da Condutância Incremental (IC)

Este método é baseado no fato de que a inclinação da curva de potência do painel solar é nula no ponto de máxima potência, onde a variação deste ponto é considerada positiva à esquerda e negativa à direita. Isto está demonstrado no

fluxograma da FIGURA 8. Este método busca o MPP da mesma forma que o método P&O, e apresenta, também, a versão modificada. Este método necessita dos sensores de tensão e de corrente, mas não calcula a potência do painel.

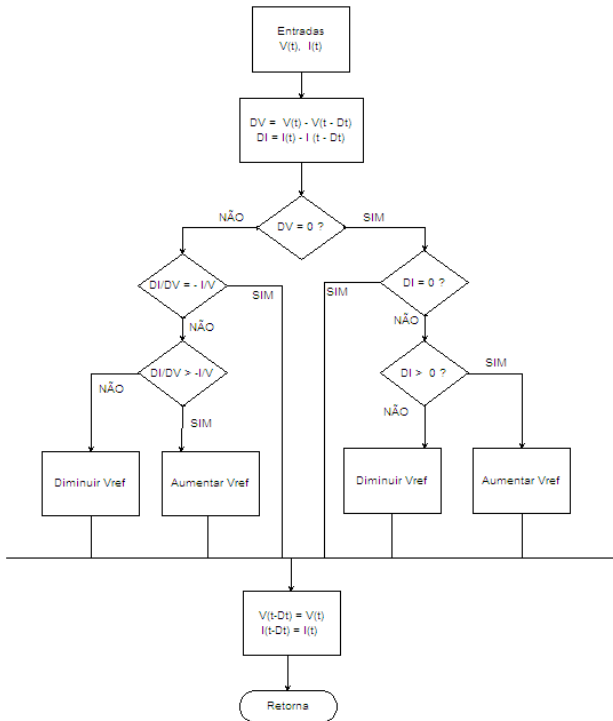


FIGURA 8 - Fluxograma método da Condutância Incremental.

Fonte: Baseado em BRITO(2009).

2.1.4.1.5 Método Beta

Este método opera por meio do equacionamento de uma variável intermediária β , na aproximação do ponto de máxima potência, de acordo com a equação número 1:

$$\beta = \ln\left(\frac{I_{pv}}{V_{pv}}\right) - c \cdot V_{pv} \quad (1)$$

Onde 'c' é uma constante que depende da carga do elétron, do fator de qualidade da junção do painel, da constante de Boltzmann, da temperatura e da quantidade de células fotovoltaicas em série (N_s).

Para este 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. O diagrama da FIGURA 9 ilustra o modelo do método Beta.

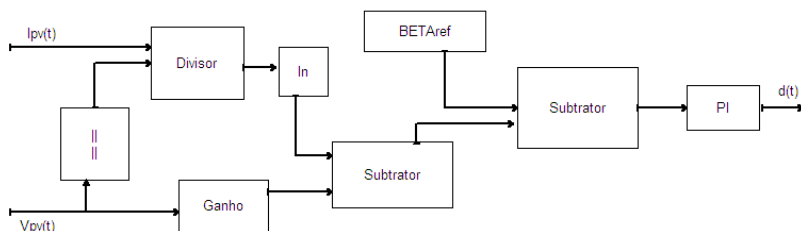


FIGURA 9 - Modelo do método Beta.

Fonte: Baseado em BRITO(2009).

2.1.4.1.6 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. Neste, 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. A FIGURA 10 apresenta o fluxograma deste método.

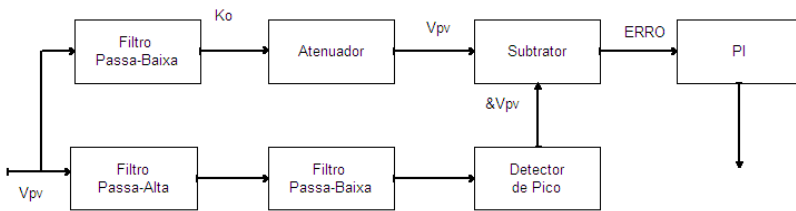


FIGURA 10 - Modelo do método da Oscilação do Sistema.

Fonte: Baseado em BRITO(2009).

2.1.4.1.7 Correlação de Ripple

Baseado nos princípios da máxima transferência de potência, esta correlação utiliza as oscilações para determinar o ponto ótimo de operação. Verificando as oscilações na potência através de filtros do tipo passa alta, são necessários sensores de tensão e de corrente, em que é realizado o cálculo posterior da potência do módulo fotovoltaico. O fluxograma deste método está ilustrado na FIGURA 11.

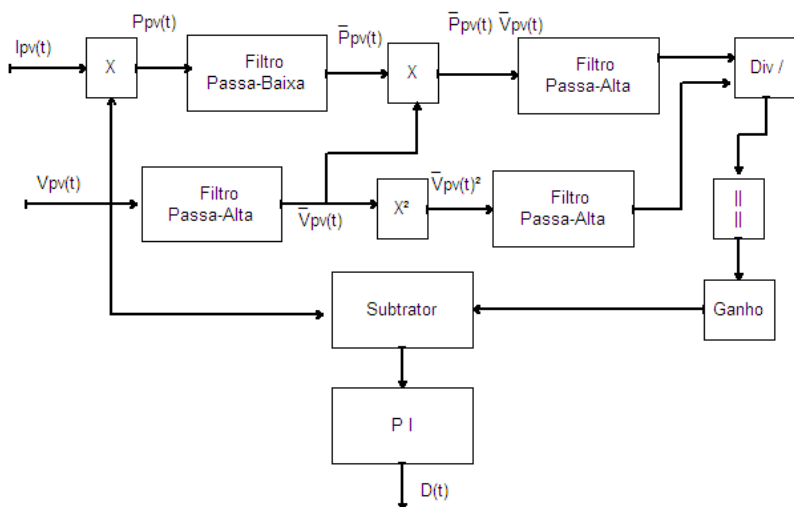


FIGURA 11 - Modelo do método da Correlação de Ripple.
Fonte: Baseado em BRITO(2009).

Os métodos apresentados anteriormente representam as principais técnicas de MPPT (Maximum Power Point tracking). Estas são utilizadas para evitar ao máximo as perdas de energia do painel solar que, conforme mencionado, possui um rendimento baixo, algo em torno de 16 a 20%.

2.2 Conversores CC

Representado pelo número (2), na FIGURA 1, os conversores vieram para atender uma demanda que, com o passar dos anos e da evolução da tecnologia e da eletrônica de potência, passaram por diversas fases até apresentarem as características dos conversores contemporâneos.

2.2.1 Introdução aos Conversores CC-CC

Desde o início da fabricação dos primeiros equipamentos eletrônicos, a demanda de carga em sistemas elétricos móveis tem aumentado de forma exponencial, sendo que grande parte desta carga é de regime não-linear.

Os principais exemplos de componentes que utilizam cargas não-lineares presentes no cotidiano são: computadores pessoais, reatores de lâmpadas fluorescentes, televisores e outras. Também são utilizados em indústrias, condomínios, estádios, prédios e outros. Porém, nestes setores, a variação de regime de cargas e o consumo energético são bem mais acentuados.

Esta demanda faz com que estudos para a qualidade desta energia fornecida aos equipamentos estejam em contínuo desenvolvimento. Desta forma, é pretendido atender de forma coerente esta crescente necessidade de carga, com um sistema controlado que deve ser bem projetado. O projeto para atender a variedade de cargas passa pela eletrônica de potência. Segundo Rashid (1999), a eletrônica de potência combina potência, eletrônica e controle, sendo que o controle trata das características dinâmicas e de regime permanente dos sistemas em malha fechada. A potência cuida dos equipamentos de potência rotativos e estáticos para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A eletrônica trata dos dispositivos e circuitos de estado sólido para o processamento de sinais que permitam alcançar os objetivos de controle desejados.

A eletrônica de potência é definida como a responsável, através do conjunto de componentes, pelo controle e conversão de energia elétrica.

Grandes distribuidoras de energia disponibilizam um sistema que atende aos usuários com tensão alternada, atendendo residências, indústrias, condomínios e outros setores da sociedade. Todavia, como nem todo dispositivo pode ser atendido por esta energia de forma direta, esta deve ser tratada por conversores que regulem a potência e o nível para atendê-lo

corretamente. A partir desta introdução serão abordados alguns tipos de conversores e as principais características dos mesmos.

2.2.2 Tipos de conversores de energia

Alguns tipos de fontes já foram projetados e suas características são bem distintas, sendo necessário, para tanto, verificar qual destas é mais adequada para determinado tipo de carga. Atualmente, as fontes mais utilizadas são as fontes de alimentação linear, retificadores controlados e conversores CC-CC (choppers) (POMÍLIO, 2005).

2.2.2.1 Fonte de Alimentação Linear

A característica de uma fonte de alimentação linear é ter uma boa regulagem e não ter seu funcionamento afetado por transitórios da rede. Porém, sua baixa eficiência implica em desuso, pois seu sistema de regulagem consome grande parte da energia que a mesma utiliza para atender o dispositivo. Na FIGURA 12 é demonstrada a topologia de uma fonte linear.

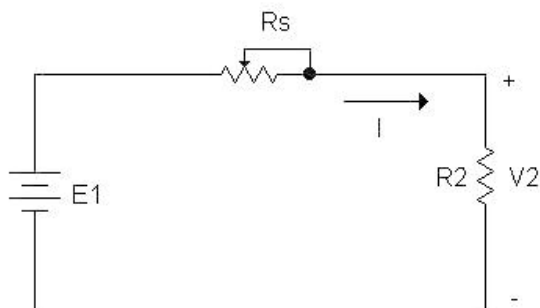


FIGURA 12 - Topologia de uma fonte de alimentação linear.
Fonte: Baseado em Barbi e Martins (2000).

Como a eficiência energética deste tipo de conversor é baixa, várias topologias de fontes foram desenvolvidas e são aprimoradas constantemente.

2.2.2.2 Fontes Chaveadas

As fontes chaveadas, das quais fazem parte os conversores CC-CC, foram introduzidas para aperfeiçoar as características negativas anteriores.

O elemento regulador é um componente que trabalha como uma chave e não opera na região linear. Com o aumento da frequência de chaveamento, a dinâmica de operação dos filtros na sua saída é proporcionalmente menor, o que aumenta o rendimento e melhora a aquisição de potência.

Segundo BARBI, a grande vantagem do conversor CC-CC não isolado é o fato de seu rendimento poder variar entre 70% e 98%. Isto depende de alguns fatores, como potência, corrente, tensão, frequência de chaveamento e da tecnologia empregada (BARBI; MARTINS, 2000). Na FIGURA 14 está apresentada a topologia deste conversor.

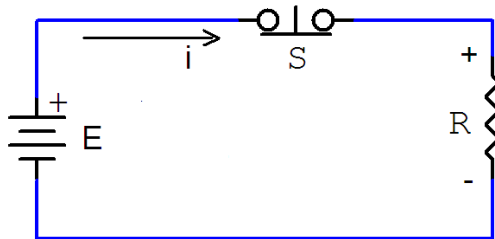


FIGURA 13 - Topologia de um conversor CC-CC.

Fonte: Baseado em Barbi e Martins (2000).

Para cada um dos tipos de fontes acima apresentadas, há vantagens e desvantagens e, para cada aplicação, algumas

destas características são motivos importantes na escolha de determinada concepção de conversor. Portanto, nos dias atuais, na maioria das aplicações os conversores CC-CC têm sido os mais utilizados. Conforme RASHID, eles fornecem controle de aceleração suave, elevada eficiência e resposta dinâmica rápida. (RASHID, 1999). Observe a tabela comparativa abaixo, que apresenta as principais características entre as fontes de regulação linear e os conversores CC-CC.

Tabela 1 - Comparação entre fonte linear e conversor CC-CC.

Características	Conversor CC-CC	Fonte Linear
Eficiência	80% a 95%	25% a 50%
Ondulação (para capacitores iguais)	20mV a 50mV	5mV
Peso	2KW/Kg	0,5 KW/Kg
Volume	10cm ³ /W	50cm ³ /W
Interferência RF	Alta	Desprezível
Rejeição a transientes	Alta	Baixa

2.2.3 Controle dos conversores CC-CC

Através das topologias dos conversores CC-CC, apresentadas anteriormente, verifica-se que o controle do nível médio de tensão na saída para o dispositivo é feito através do controle do chaveamento de uma chave estática. Esta tensão está relacionada ao tempo durante o qual a chave permanece fechada em ciclos repetitivos. A relação entre o tempo de condução e o período é chamada de razão cíclica (duty cycle) (POMÍLIO, 2005). Na FIGURA 15 pode ser constatada a forma de onda de tensão sobre uma chave estática.

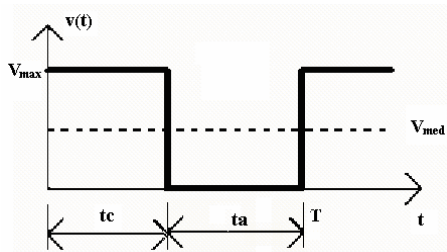


FIGURA 14 - Forma de onda de uma chave estática.

Fonte: Pomílio (2005).

A simbologia utilizada na FIGURA 15 está descrita a seguir:

- $v(t)$: função tensão por tempo;
- t : tempo;
- t_c : tempo de condução;
- t_a : tempo de abertura;
- V_{med} : valor médio do sinal;
- V_{max} : valor máximo do sinal;
- T : período.

A razão cíclica D é dada por:

$$D = \frac{t_c}{T} \quad (2)$$

Este controle do chaveamento pode ser executado de duas maneiras:

- Frequência constante, em que o período do chaveamento é fixo enquanto o tempo de condução é variado. Este tipo de controle é conhecido como modulação PWM (*Pulse Width Modulation*).
- Frequência variável, em que o tempo de condução ou bloqueio pode ser mantido constante e efetua-se a variação da frequência de operação. Conhecido como modulação em frequência, ele gera harmônicos em

frequências imprevisíveis, dificultando o projeto de um filtro (RASHID, 1999).

O controle do comando do chaveamento, para a modulação através de uma chave eletrônica, pode ser obtido através da comparação entre dois sinais (periódico e de controle), a qual é realizada por um comparador. Um exemplo de geração de sinal PWM em formato de dente de serra é apresentado na FIGURA 16.

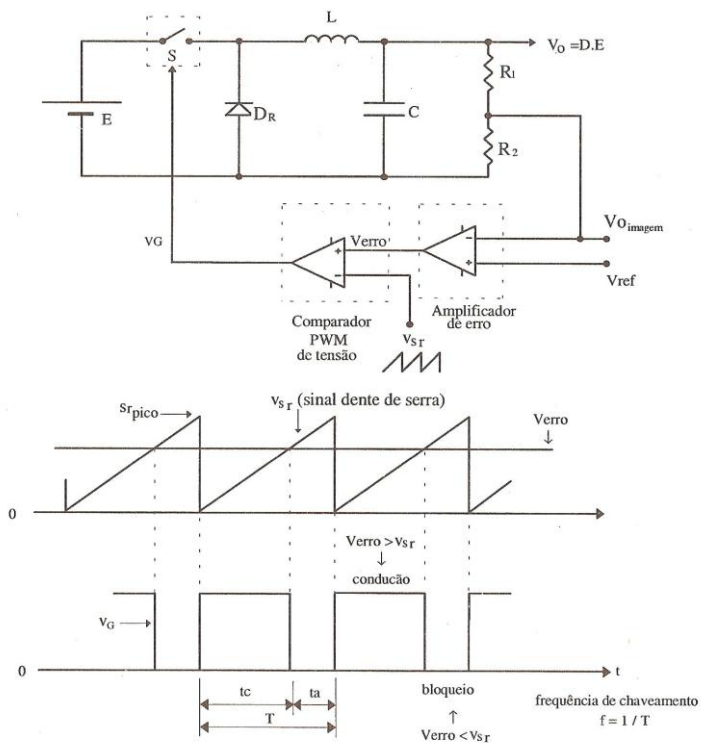


FIGURA 15 - Modulação por largura de pulso.

Fonte: Barbi (2000).

Onde:

- V_{sr} : sinal da onda periódica;
- V_G : sinal de saída no comparador;
- V_{erro} : sinal de controle.

O comparador atua da seguinte forma: quando V_{erro} é menor que V_{sr} , portanto V_G encontra-se em nível baixo, então a chave S é bloqueada. Quando ocorre o contrário, V_{erro} é maior que V_{sr} , V_G encontra-se em nível alto e fecha a chave S .

2.2.4 Tipos de Conversores CC-CC

Dos vários tipos de conversores CC-CC, serão apresentados alguns dos mais conhecidos no meio eletrônico. De maneira geral, as principais características serão apresentadas e determinarão qual será utilizado no projeto.

2.2.4.1 Conversor Buck

De acordo com Barbi e Martins (2000), o conversor Buck é não isolado e abaixador de tensão, isto indica que o valor médio de tensão entregue à carga é, em teoria, em condições ideais, igual ou inferior ao valor médio da tensão de entrada, enquanto o valor da corrente deve ser igual ou maior, obedecendo ao princípio da conservação de energia para um sistema ideal. A FIGURA 17 mostra a configuração básica de um conversor Buck.

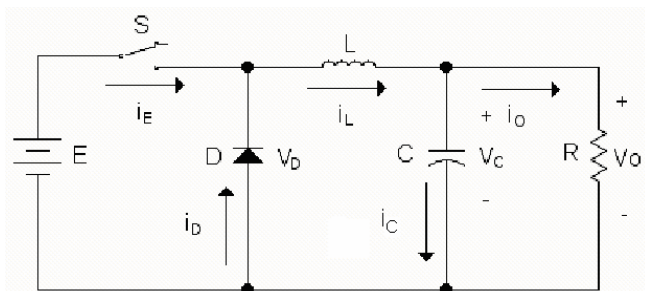


FIGURA 16 – Configuração básica de um conversor Buck.
Fonte: Barbi; Martins (2000).

O conversor tipo Buck funciona do seguinte modo: a chave S faz a abertura e fechamento periódico. Este intervalo de tempo entre a abertura e fechamento é programado conforme a necessidade da carga, fazendo com que a saída apresente, na verdade, uma forma de onda recortada da tensão de entrada (POMÍLIO, 2005). Como para a maioria das aplicações é desejável uma baixa ondulação de saída tanto para a corrente quanto para a tensão, um filtro tipo ‘passa-baixa’ deve ser adicionado, composto por um indutor (L) e capacitor (C). (BARBI; MARTINS, 2000).

Quando a chave S está aberta não há transferência de energia da fonte de tensão para o restante do circuito. No passo seguinte, enquanto a chave S está fechada, a corrente flui diretamente através do indutor L para o capacitor C que, estando em paralelo com o resistor R, produz sobre este uma tensão de saída V_o , nesta condição o diodo D fica cortado. Quando a chave é aberta, a energia acumulada no indutor L obriga a circulação de uma corrente, atuando na carga de saída R. (BARBI; MARTINS, 2000).

2.2.4.2 Conversor Boost

Segundo Barbi e Martins (2000), o conversor Boost, é um conversor não isolado e, ao contrário do Buck, é elevador de tensão. Isto significa que o valor médio de tensão que ele fornece à carga é, em teoria, nas condições ideais, igual ou superior ao valor médio da tensão de entrada, enquanto o valor da corrente tende a ser igual ou inferior. O desenho da FIGURA 18 mostra a configuração deste tipo de conversor da maneira mais simplificada.

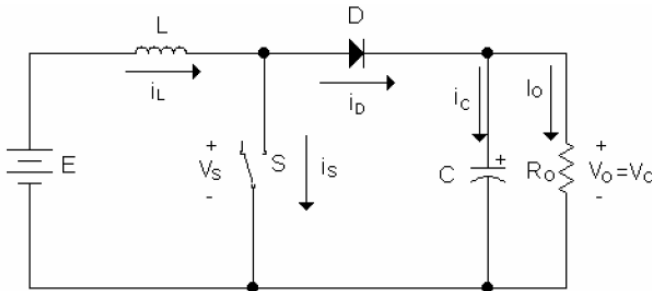


FIGURA 17 - Configuração básica de um conversor Boost.

Fonte: Baseado em Barbi; Martins (2000).

Segundo os dizeres de Barbi e Martins (2000), observa-se que, em geral, os componentes utilizados na estrutura do conversor Boost não mudam e são basicamente os mesmos utilizados para o conversor Buck. Porém, estes foram rearranjados de tal forma que, na entrada, haja uma fonte de corrente devido à presença do indutor, o que torna necessário que a carga apresente características de fonte de tensão.

Assim ocorre o funcionamento do conversor Boost em condução contínua: na primeira etapa a chave é fechada e condicionada a conduzir durante um tempo t_c (tempo com a chave S fechada), o diodo fica, então, reversamente polarizado sendo que o nível de tensão da entrada é aplicado ao indutor.

Isto causa uma elevação linear em sua corrente e a energia é armazenada em seu campo magnético. Na próxima etapa, a chave S é aberta e deixa de conduzir durante um tempo t_a (tempo com a chave S aberta), ficando o diodo diretamente polarizado. Assim ocorre a transferência de energia da fonte de entrada e do indutor para a carga. Durante o tempo t_a , a corrente do indutor cai linearmente (POMÍLIO, 2005).

2.2.4.3 Conversor Buck-Boost

O conversor Buck-Boost, assim como os conversores reversíveis, apresenta a característica de inversão do seu fluxo de potência, ou seja, a energia pode fluir tanto da fonte para a carga, quanto da carga para a fonte. Uma das principais aplicações para este tipo de conversor é o acionamento de motores elétricos em corrente contínua (BARBI; MARTINS, 2000).

Neste tipo de aplicação, além de fornecer controle para a tração, também é possível aplicar frenagem regenerativa, devolvendo energia para a fonte. Esta alternativa é particularmente interessante para sistemas de transporte com paradas frequentes (como metrô), ou para veículos elétricos movidos por bateria, pois proporciona uma significativa economia de energia elétrica (RASHID, 1999).

2.3 Controle

Nesta etapa, representada no diagrama de blocos da FIGURA 1 pelo número (3), há componentes que trabalham interligados, como é possível observar na mesma figura, representados pelos números (6) e (7). Através destas realimentações, melhora-se o controle, aprimorando o processo de captura de energia para a conservação nos supercapacitores.

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 através de um circuito eletrônico aconteceram. 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 este controle alguns componentes foram considerados. Dentre estes, foram avaliados o regulador da Fairchild, modelo FAN8303, cuja corrente de trabalho fica em 2 Ampères e tensão até 23 Volts, 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 CI escolhido para estabelecer o chaveamento no conversor tipo Buck, foi o C.I. Profet de código comercial BT410E2. Esta chave será controlada através da saída PWM número 3 do microcontrolador Atmega328. No item 4.2.2.1 temos

mais informações de seu funcionamento neste projeto e as suas mais citadas características.

2.4 Baterias

Representada na FIGURA 1 do diagrama de blocos sob o número (4), a bateria é um dispositivo que armazena energia elétrica para uso imediato ou posterior, atendendo à necessidade do dispositivo a ser alimentado. No projeto este 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.

Estes acumuladores são compostos por células ou elementos conectados em arranjos do tipo série ou paralelo, de maneira a fornecer uma determinada tensão e capacidade de carga. Cada célula pode apresentar uma 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 determinam 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 através 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 uma corrente elétrica com certo nível de tensão.

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

- As baterias primárias, que são projetadas para converter a energia química em energia elétrica e ser descartada.
- As baterias secundárias, que são 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 deste 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 perigosos 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 este serviço, porém este 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 deste dispositivo.

Existem diferentes tipos de baterias com as mais diferentes aplicações. Considerando as diversas tecnologias, é questionado 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 abaixo:

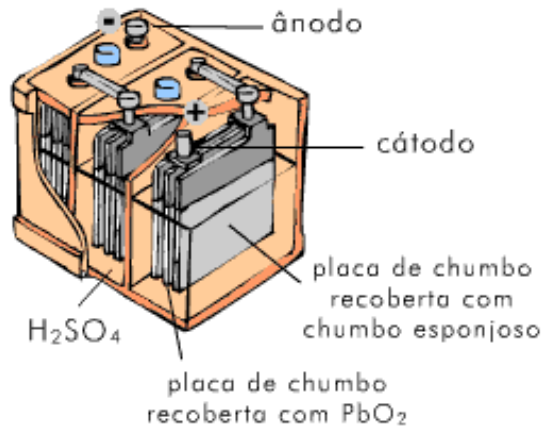
- Densidade de energia acumulada em relação ao tamanho e peso para atender o especificado;
- Necessidade de ciclos de carga e descarga, que determinam a vida útil;
- Capacidade de carga relativa ao tempo de duração do dispositivo móvel em uso.

2.4.1 Baterias de chumbo ácido

A bateria de chumbo ácido, ou acumulador de chumbo, foi inventado em 1859 pelo físico francês Gaston Planté. É uma associação de elementos ligados em série e foram as primeiras baterias para uso comercial. Baterias chumbo-ácido são conjuntos de acumuladores elétricos recarregáveis, interligados convenientemente, construídos e utilizados para receber, armazenar e liberar energia elétrica por meio de reações químicas envolvendo chumbo e ácido sulfúrico (NBR 7039/1987).

Um acumulador elétrico nada mais é que uma célula galvânica, ou seja, um conjunto de eletrodos de carga oposta e uma solução carregadora de íons, o eletrólito, que a partir de uma reação química, produz trabalho elétrico. Na bateria de chumbo-ácido, os eletrodos mais conhecidos por placas são arranjados um ao lado do outro, sendo alternados entre o positivo e o negativo e separados por um material isolante chamado de separador que evita o contato entre eles e permite a passagem dos íons da solução. As placas são formadas por uma grade metálica que suporta uma pasta que é o material ativo. Este último é o material que fornece o trabalho elétrico por meio de suas reações químicas.

As placas positivas estão ligadas em série umas às outras e conectadas ao polo positivo, da mesma forma que as placas negativas estão conectadas ao polo negativo. Um conjunto de placas positivas e negativas alternadas e conectadas aos seus respectivos polos é chamado de elemento, como mostra a FIGURA 19.



Bateria ácido-chumbo

FIGURA 18 - Polo de bateria de chumbo ácido.

Fonte: <<http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/energia/pilhas-baterias-e-energia.php>>.

Baterias de chumbo-ácido são usadas em aplicações em que o custo é mais importante do que o tamanho ou o peso. Geralmente são utilizadas em sistemas de alarmes, automóveis e sistemas que necessitem de energia acumulada para utilização de forma emergencial.

Estas baterias são carregadas, na maioria das propostas, com tensão constante e com limitação de corrente para impedir sobreaquecimento. As baterias seladas de chumbo ácido podem ficar em constante carregamento, respeitando-se a tensão máxima de 2,2 V em cada célula.

Uma característica importante destas baterias é que a sua tensão tende a manter-se constante durante um longo período de descarga até que comece a cair, conforme FIGURA 20.

A FIGURA 21 mostra a curva de carga de uma bateria nas condições de teste especificado na ilustração;

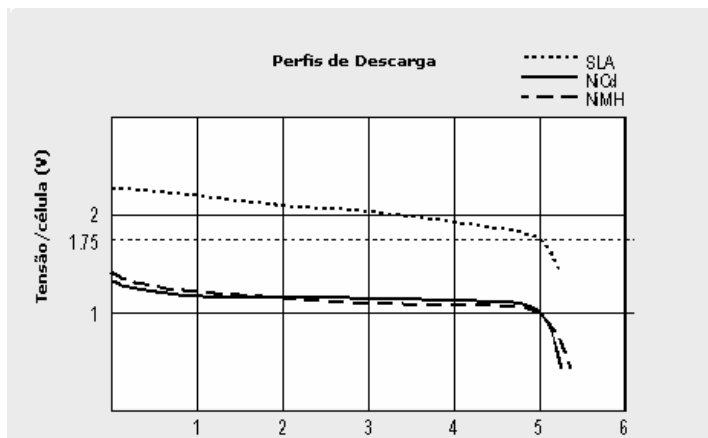


FIGURA 19 - Curva de descarga das baterias.
 Fonte: STA.ELETRÔNICA (2012).

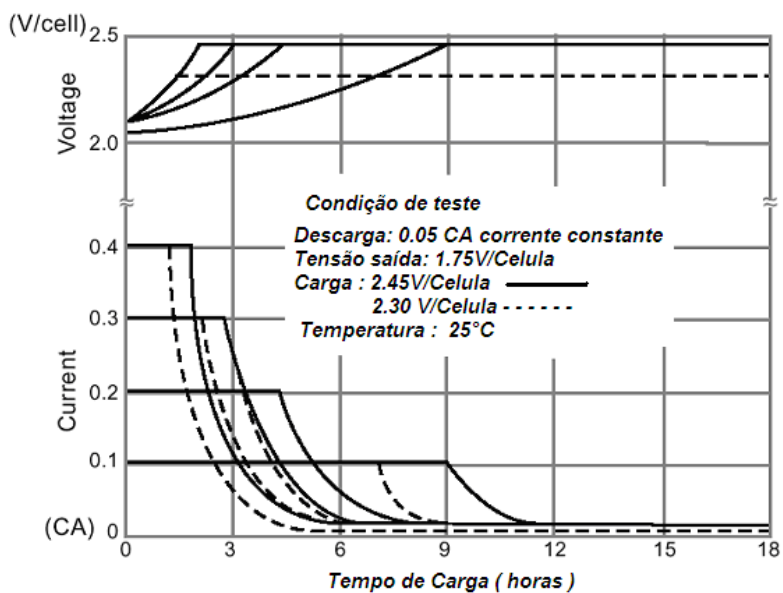


FIGURA 20 - Curva de carga com tensão constante das baterias.
 Fonte: Barsukov, (2006).

2.4.2 Baterias de Níquel Cadmium (NiCd)

As baterias de Níquel Cadmiun (NiCd) foram o segundo tipo de bateria recarregável a ser desenvolvida. Nestas, o polo positivo e o polo negativo encontram-se no mesmo recipiente, com o polo positivo (ou cátodo) coberto de hidróxido de níquel, e o polo negativo (ou ânodo) coberto de material sensível ao cádmio. Ambos são isolados por um separador. Os polos estão imersos em uma substância eletrolítica, que conduz íons, geralmente uma solução de hidróxido de potássio (KOH).



FIGURA 21 - Bateria de Níquel-Cadmium.

Fonte: <<http://www.shopmania.com.br/cabos-adaptadores/p-bateria-para-telefone-sem-fio-3-6v-300mah-2-3aa-ni-cd-multitoc-5623261>>.

Comumente as baterias recarregáveis de NiCd, FIGURA 22, são utilizadas nos telefones celulares. Este tipo de bateria é considerado antigo, sendo substituído por outros tipos de bateria como as de hidreto metálico de níquel (NiMH) e de íon de lítio (Li-ion).

As pilhas NiCd são geralmente mais baratas, porém apresenta menor tempo de vida útil, bem como menor

capacidade de carga, podendo sofrer de um problema chamado "efeito memória". Quando isso ocorre, a mesma deixa de ser recarregada totalmente por sua composição química dar um sinal de que a carga está completa. Para um melhor entendimento, pode-se imaginar que esta bateria tenha um efeito memória que comprometa 10% de sua capacidade. Isto indica que sua carga, na próxima vez, será de 90%, pois a perda devido a este efeito indicará que os 10% restantes já estão carregados.

A técnica utilizada para se evitar o problema é descarregar totalmente a bateria antes de proceder à nova recarga.

Com a evolução das técnicas de armazenamento de energia elétrica, as pilhas NiCd estão caindo em desuso, pois apresentam problemas do efeito memória, tem menor capacidade e vida útil. Além disto, são consideradas poluentes, já que o cádmio é um elemento químico altamente tóxico e prejudicial ao meio ambiente.

Uma técnica utilizada para carregamento de baterias NiCd é chamada de carregamento reverso. Esta técnica consiste em aplicar pulsos de descarga intercalados com pulsos de carga. Este método estimula a superfície dos eletrodos resultando em um desempenho elevado, aumentando a vida útil de serviço.

2.4.3 Baterias de hidreto metálico de níquel (NiMh)

Para carregar uma bateria de hidreto metálico de níquel, aplica-se uma tensão constante. A carga termina quando é identificada uma queda de tensão de aproximadamente 5 mV a 10 mV por célula. A FIGURA 23 apresenta o esquema de uma bateria de NiMh em corte e, na FIGURA 24, o gráfico de carga de baterias de NiCd e NiMh.

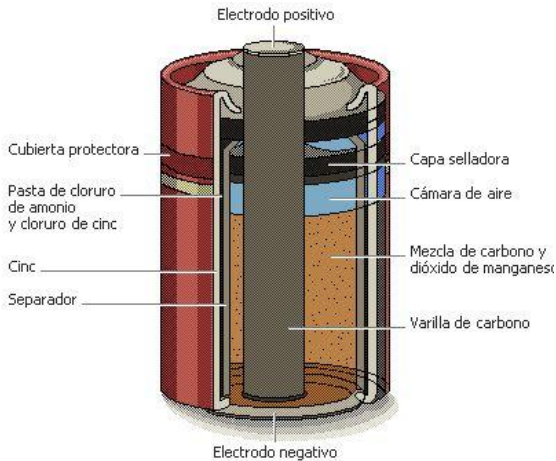


FIGURA 22 - Bateria NiMH.

Fonte: < <http://www.shoptronica.com/2539-bateria-ni-mh-recargable-aa-12v-2700ma.html>>

Nas baterias de NiMH uma técnica de segurança utilizada para finalizar sua carga é identificar a variação de temperatura (dv/dt) conforme ilustração do gráfico abaixo:

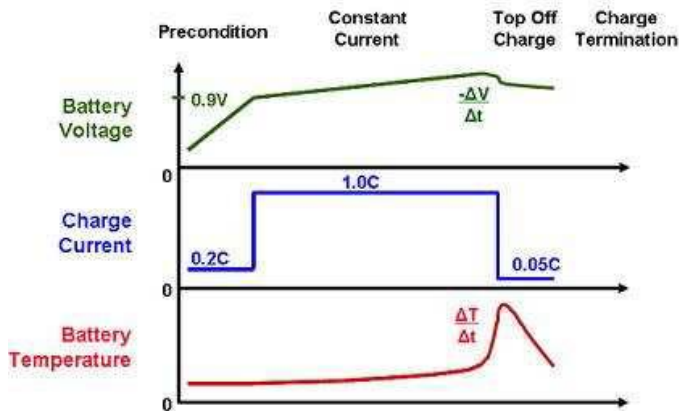


FIGURA 23 - Gráfico carga de baterias NiCd e NiMH.

Fonte: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01088a.pdf>

2.4.4 Baterias de íons de lítium (Li-ION)



FIGURA 24 - Bateria de Li-ion.

Fonte: <

http://www.compraspelanet.com.br/ecommerce_site/produto_12118_6600_Bateria-Li-ion-37V-740mAh-BP70A-para-Camera-Digital-Samsung>

As baterias de íons de lítio, na FIGURA 25, são mais modernas, sendo um tipo de bateria recarregável das mais utilizadas em equipamentos eletrônicos portáteis nos dias de hoje. Elas armazenam o dobro de energia que uma de hidreto metálico de níquel (ou NiMH) e três vezes mais que uma bateria de níquel cádmio (ou NiCd).

Outra diferença da bateria de íons de lítio é a ausência do efeito memória (não vicia), ou seja, não é preciso carregar a bateria até o total da capacidade e descarregar até o total mínimo, ao contrário da bateria de NiCd.

Sua carga é feita com tensão constante, limitação de corrente e monitoramento da temperatura no estágio inicial do ciclo de carga. A carga termina quando a corrente fica abaixo do limite da menor corrente, cujo valor é retirado do catálogo do fabricante.

Seu procedimento de carga é bastante criterioso, pois uma sobrecarga qualquer ou uma sobretemperatura pode ocasionar explosão da célula. As primeiras baterias de lítio ficaram disponíveis comercialmente após 1970. Nas primeiras tentativas

de desenvolver baterias recarregáveis de lítio não foi obtido sucesso, pois estas falharam devido a problemas de segurança. Isto ocorria devido à instabilidade inerente do lítio metálico, especialmente durante o carregamento, fazendo com que a pesquisa mudasse seu foco para uma bateria não metálica de lítio, mas sim utilizando íons de lítio. Mesmo tendo conhecimento de que sua densidade de energia era pouco inferior à do lítio metálico, mas devido à comprovada segurança destas baterias de íons de lítio, em 1991, a Sony Corporation comercializou a primeira bateria deste tipo.

Por não possuírem o efeito memória e pela possibilidade de ser carregada a qualquer momento, sua utilização é bem vista no desenvolvimento de produtos para atender à necessidade humana de portabilidade.

Na FIGURA 26 é possível observar a curva da carga de baterias deste tipo.

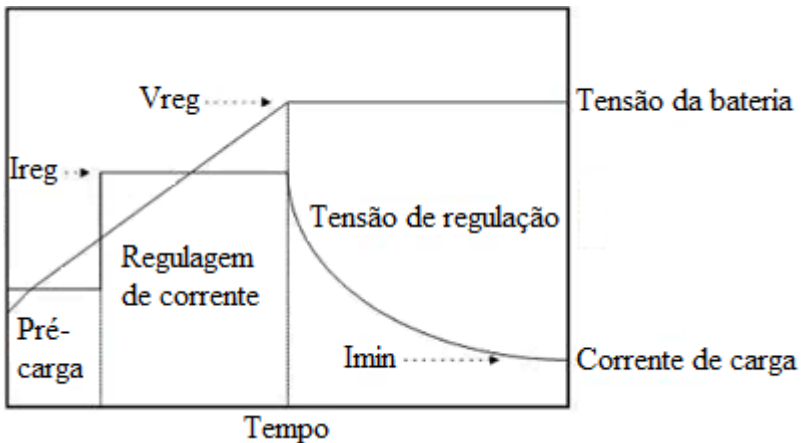


FIGURA 25 - Curva de carga de baterias Li-ION.

Fonte:

<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/adn008.pdf>>

2.5 Os “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 destes capacitores em diversos tipos de utilização como armazenamento suplementar de energia para uso como bateria em dispositivos móveis.

Super Capacitores tratam a eletricidade de maneira separada fisicamente por cargas positivas e negativas, diferente de baterias que o fazem quimicamente, por este motivo possuem cargas e descargas mais rápidas, pois não necessitam que uma reação química aconteça. (UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA, 2012).

2.5.1 História dos Supercapacitores

O primeiro supercapacitor baseado em um mecanismo de camada dupla foi desenvolvido em 1957 pela General Electronics em uma patente que utilizava um eletrodo de carbono poroso. Acreditou-se que a energia fora armazenada nos poros de Carbono, exibindo uma capacidade "excepcionalmente alta", embora o mecanismo fosse desconhecido naquele momento. Foi a Companhia de Óleo Standard de Cleveland (SOHIO) em 1966 que patenteou um dispositivo que armazenava energia na interface de camada dupla.

Na corrida constante pela maior eficiência, confiabilidade e portabilidade, o conceito físico destes capacitores está sendo aprimorado. Empresas buscam novos materiais e formas de

construção, sempre levando em conta os detalhes acima mencionados.

2.5.2 Características

Supercapacitores são fabricados com nanotubos de carbono e polímero, ou aerogéis, que são materiais altamente porosos e, conseqüentemente, apresentam grande área superficial. Estes são elementos práticos para a montagem de supercapacitores. Os nanotubos de carbono apresentam ótimas propriedades de nanoporosidades, o que deixa espaços minúsculos para que os polímeros se encaixem no tubo e ajam como um material dielétrico. O polímero tem um mecanismo de armazenamento de redução-oxidação junto com uma grande área superficial.

Dados de fabricação e características dos componentes podem ser vistos no site dos fabricantes, que comumente apresentam todas as informações necessárias. Para o projeto, uma das referências para a escolha do bloco de supercapacitores, que foram utilizadas na compra, foi a página na internet da empresa Vinatech.

Também são fabricados supercapacitores de aerogel de carbono, cujo material provê grande área de superfície.

A empresa Cooper Electronic Technologies atualmente comercializa supercapacitores de aerogel, sendo sua tensão máxima de 2,5V, podendo alcançar uma densidade de energia de 325 kJ/kg, que equivale a aproximadamente 70% da capacidade que as baterias de polímero de lítio proveem. Estes supercapacitores de aerogel de pequeno porte estão sendo usados como baterias de apoio em microeletrônicos. No entanto esperam-se, com o desenvolvimento, aplicações maiores, como em veículos elétricos.

2.5.2.1 Vantagens dos Supercapacitores

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

- Os custos destes 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 em 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.

2.5.2.2 Desvantagens dos Supercapacitores

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

- 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 destes componentes varia com a energia armazenada;
- Para armazenar efetivamente ou recuperar sua energia é necessário um controle eletrônico sofisticado, que resulta em perda de energia e aumento de custos com controle, reduzindo a eficiência do sistema.

2.5.3 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 destes componentes, aumentando ainda mais a quantidade de produtos que este 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.

Estes elementos são atualmente encontrados em placas eletrônicas de circuito impresso. Estes 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, que no diagrama em blocos da estrutura do trabalho está com o número (5) 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 2 os componentes do protótipo são apresentados.

Tabela 2 - Componentes, custo e especificações.

	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 5cm	16,7 x 18,1 x 7,6 cm	9 x 6 x 2,8 cm
Peso	6Kg	6,2Kg	200g

Fonte: Glavin (2009).

Na tabela 3, temos uma comparação entre componentes de armazenamento de energia, também citados anteriormente.

Tabela 3 – Tabela comparativa entre bateria x capacitor.

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)	1000	>500.000	>500.000
Eficiência (carga/desc.)	0,7 a 0,85	0,85 a 0,98	> 0,95

Fonte: Maxwell Inc.(2012).

2.6 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.

Este componente forneceu os dados necessários para os parâmetros de necessidade deste tipo de iluminação, principalmente pelo fato de que o propósito deste trabalho é utilizar supercapacitores em vez deste tipo de baterias.

A partir de modelos comerciais de luminárias de emergência, foi observado que as mesmas possuem uma 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.

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

3. 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. Estes 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 através do método experimental e/ou matemático, ou

através de 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. Esta técnica foi simulada no mesmo software e também se mostrou adequada para o protótipo. A terceira etapa 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 de grandezas medidas foram consideradas desprezíveis ao se tratar de valores absolutos.

3.1 Visões Macro da proposta

Neste capítulo será descrito o modelo proposto para o problema. A solução foi baseada no desenvolvimento de um produto que possibilite captar e armazenar a energia elétrica disponível em um painel solar fotovoltaico de maneira eficiente. Este dispositivo, através de componentes eletrônicos específicos, dirigirá e armazenará a maior parte desta energia em supercapacitores.

Todo o processo inicia-se com um painel fotovoltaico fornecendo a energia elétrica ao sistema através da incidência solar. Um conversor tipo Buck foi calculado para fazer a interface

entre o painel solar e o banco de supercapacitores. Este banco é composto de supercapacitores, arranjados de maneira a possibilitar o armazenamento de energia suficiente para manter um bloco de 20 leds. Este bloco simula a função de uma iluminação de emergência que atua quando a luz no ambiente desejado não estiver mais presente.

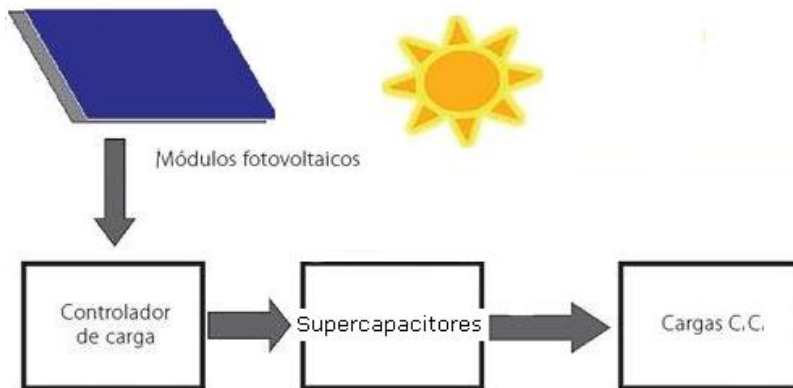


FIGURA 26 - Visão Macro Proposto

Fonte: <www.arcoweb.com.br>. - Modificado pelo autor.

A proposta consiste em apresentar o uso destes supercapacitores, que podem ou não ser uma solução para no futuro eliminar as baterias que utilizam as reações químicas de metais como o chumbo e níquel. O protótipo elaborado será testado e seu resultado produzirá uma avaliação consistente quanto à utilização destes componentes como acumulador de energia elétrica.

4. DESENVOLVIMENTO

Os principais componentes deste trabalho estão ilustrados na FIGURA 28 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 envia-la aos supercapacitores. Toda esta operação é controlada por um sistema eletrônico cujo principal componente é um microcontrolador.

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

O fluxograma da FIGURA 28 destaca cada etapa deste estudo e exemplifica a proposta de solução.

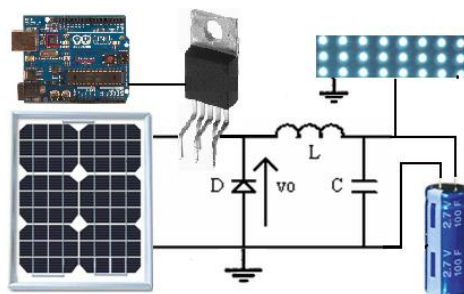


FIGURA 27 - Fluxograma dos componentes do trabalho.

Fonte: Montagem do Autor.

A interligação destes módulos será possível através de arranjos de componentes eletrônicos, que possibilitará as medições realizadas pelo microcontrolador escolhido. Através destes, será possível realizar as leituras com níveis compatíveis com as entradas AD do microcontrolador. Esta medição monitora as grandezas seguidamente, atuando no pulso PWM que

controlará a tensão sobre o banco de supercapacitor. Deste 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, fazendo-os ligar (brilhar). 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, de maneira satisfatória, as baterias de chumbo-ácido e indicar a utilização destes para outros projetos acadêmicos.

Para desenvolver esta 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.

Nos testes executados com luminárias de emergências de uso comercial, foi constatado que suas baterias mantiveram o circuito alimentado por duas horas, fornecendo uma corrente de 125 mA até uma tensão mínima de 3,325 V. A partir deste nível mínimo de tensão os leds da luminária apagaram. Com estes dados, será dimensionado o bloco de supercapacitores e comparado 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 este motivo, foi dimensionado o supercapacitor que substituiria a bateria, resultando em um valor em torno de 360 faradays.

Estão apresentados abaixo os cálculos do valor do bloco de supercapacitores, representado por SC.

$$3,325V * 0,125mA = 415,625 mW$$

$$T = 7200 s = 2 \text{ horas}$$

$$E_c = 415,625\text{mW} * 7200\text{s} \Rightarrow E_c = 2992,5 \text{ j}$$

$$SC = 2 * 2992,5\text{j} / V_{in}^2 - V_f^2$$

$$SC = 360,28 \text{ F}$$

Um banco constituído de 10 supercapacitores, que foram dispostos em conjuntos de série e paralelo, foi construído para alcançar um valor de capacitância próximo ao valor calculado necessário e com um valor de tensão entre seus terminais compatível com a bateria de uso comercial.

4.1 Características elétricas do Painel solar

O trabalho contou com um painel solar de potência de 5 watts, limitado a uma tensão em circuito aberto de 21,3 V e corrente de curto circuito da ordem de 310 mA. Este 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. Este é um dos dados mais relevante 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}).

Para definir estes dados, pois para cada tipo de insolação o mesmo responde com valores diferenciados, adota-se a condição padrão e a partir desta condição devem ser obtidas as curvas características dos módulos. A radiação de 1000 W/m^2 (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia) e a temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ na célula foram definidas como condição padrão, pois a eficiência da célula fotovoltaica é reduzida com o aumento da temperatura.

O gráfico da FIGURA 29 esboça o comportamento do painel fotovoltaico de modelo idêntico ao utilizado neste projeto. Este esclarece as variações das curvas da corrente e da potência do painel fotovoltaico em função de sua tensão. As variações observadas na FIGURA 29 estão relacionadas ao nível de insolação. Os pontos de máxima potência são representados pelos picos das curvas de potência x tensão. O conversor CC-CC deve ser então capaz de operar nesses pontos para extrair a máxima potência dos painéis fotovoltaicos (LOPES, 2006, p.35).

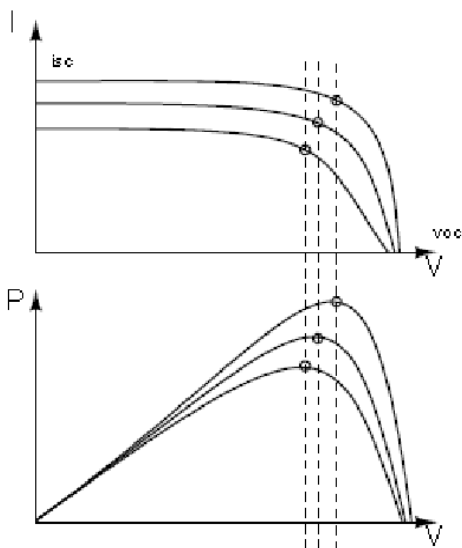


FIGURA 28 - Curvas de corrente e potência do painel.

Fonte: Lopes (2006).

Segundo Ramos (2006), o método da curva da corrente em função da tensão nas condições padrões de teste continua sendo o mais utilizado como referência para avaliação do comportamento elétrico de geradores fotovoltaicos.

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 Conversor

A principal característica para a escolha do conversor do tipo Buck no projeto foi o fato de este ser um abaixador de

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

4.2.1 Conversor BUCK

O conversor Buck é um conversor do tipo abaixador de tensão. Um circuito eletrônico é utilizado para converter uma tensão de corrente contínua em outra tensão também de corrente contínua, mas de valor menor, sendo, portanto, um tipo de fonte chaveada.

Outra forma mais simples de reduzir uma tensão contínua seria utilizar um divisor resistivo. Porém, os conversores chaveados, se adequadamente projetados, dissipam pouco calor na conversão, reduzindo as perdas e apresentando uma eficiência de mais de 95%.

A FIGURA 30 representa o esquema de ligação de um conversor Buck. Por apresentar uma construção simples, este conversor foi projetado para funcionar no protótipo, onde apresentou ótimos resultados.

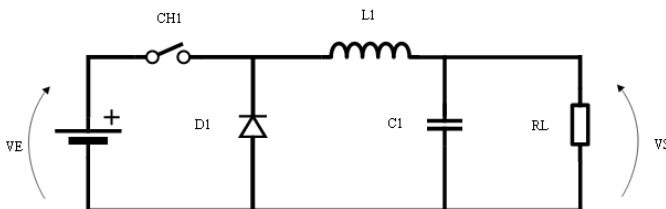


FIGURA 29 - Esquema do conversor Buck.
Fonte: Baseado em Barbi e Martins(2000).

4.2.1.1 Funcionamento do conversor Buck

O princípio de funcionamento deste conversor está descrito a seguir. Quando a chave CH1 está aberta não há transferência de energia da fonte de tensão, que neste caso será um painel solar que funcionará como fonte de corrente contínua para o restante do circuito. No passo seguinte, enquanto a chave CH1 está fechada, a corrente flui diretamente através do indutor L1 para o capacitor C1 que, em paralelo com o resistor RL, produz sobre este uma tensão de saída V_s . Nesta condição o diodo D1 fica cortado. Quando esta chave é aberta, a energia acumulada no indutor fornece a corrente que continua circulando e atuando na carga de saída RL.

Este conversor do tipo Buck fornece a energia diretamente para a saída, quando a chave CH1 está fechada. Representada como um interruptor, esta chave será substituída por um componente adequado. O componente escolhido foi o CI Profet BTS410E2, que tem a característica de operar em altas frequências. O pulso de controle de chaveamento desta chave será executado através do pino PWM de nº 3 do microcontrolador Atmega328. Para que o conversor Buck fosse utilizado, foi necessário também o cálculo de um elemento principal no funcionamento de conversores tipo Buck, o indutor.

4.2.2 Projeto do conversor Buck

Para os testes no protótipo do projeto, utilizou-se para atuar como chave no conversor tipo Buck o CI BTS410E2 da Siemens, descrito no item 4.2.2.1. O diodo utilizado representado por D1 na FIGURA 30 é um diodo rápido de uso genérico modelo 1N4936. O capacitor utilizado representado por C1 na mesma FIGURA 30, tem o valor de 680uF por 50V.

Estes são os componentes utilizados no protótipo do projeto para que se avaliasse seu funcionamento.

4.2.2.1 Características Principais do BT410E2

As principais características deste 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).

4.2.2.2 Indutor para conversor Buck

Todo projeto de uma fonte ou de um conversor CC-CC está intimamente ligado ao sucesso na delimitação dos elementos magnéticos. Se o projeto alcança melhores rendimentos, sua fabricação se torna interessante. Em consequência de o conversor CC-CC trabalhar chaveando um valor de tensão em alta frequência, são gerados no circuito elementos parasitas (indutância magnetizante, indutância de dispersão, capacitâncias entre enrolamentos e espiras), os quais são prejudiciais ao rendimento do conversor. Por este motivo, existe a necessidade do emprego de filtros.

Este problema implica em resultados indesejáveis no funcionamento do conversor. O projeto foi operado sob uma frequência de conversão de 600 Hz devido às limitações dos componentes escolhidos.

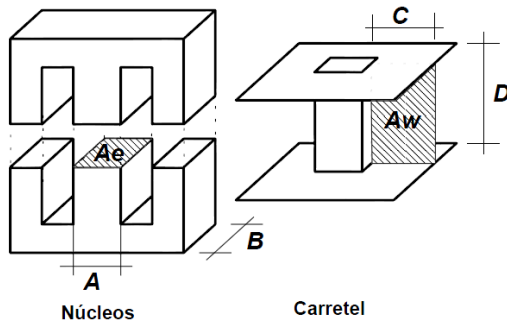
No projeto do indutor foi utilizado um núcleo de ferrite e seus cálculos serão apresentados a seguir.

4.2.2.2.1 Núcleo de Ferrite

O núcleo utilizado no produto elaborado foi de ferrite tipo “E”, o qual é um meio magnético capaz de fornecer um caminho adequado para o fluxo magnético. Entre os tipos mais comuns utilizados na construção de indutores, destacam-se o ferrite e as lâminas de ferro-silício. Quando são utilizadas baixas frequências, as lâminas de ferro-silício são mais adequadas. À medida que se aumenta a faixa de frequência de operação, surge o aumento das perdas por histerese e o aquecimento do mesmo torna seu uso impraticável. Nesta condição, são indicados núcleos de ferrite, todavia estes apresentam baixa densidade de fluxo de saturação (0,3 T) e baixa robustez a choques mecânicos se comparados aos de lâminas de ferro silício.

4.2.2.2.2 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 31.



Núcleo e carretel do tipo E

FIGURA 30 - Amostra de Núcleo e Carretel tipo E.

Fonte: Barbi (2001).

O projeto físico do indutor foi realizado com os valores abaixo:

- $L_o = 20 \text{ mH}$ (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, neste caso foi utilizado o catálogo de ferrite da Thornton, na página 12.

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. Este será

embutido na plataforma Arduino, o qual possui bibliotecas de funções, facilitando a programação para a operação e controle do circuito.

4.3 Etapa de Controle

4.3.1 Escolha da Plataforma Microcontrolada

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). Este 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. Deste modo é possível determinar, através de cálculos, a correta largura do pulso para que o conversor Buck extraia a máxima potência possível do painel solar fotovoltaico.

O microcontrolador ATMEGA328 está montado sobre a plataforma Arduino. Esta plataforma foi utilizada por apresentar bibliotecas prontas de programação e por ter sido adquirida e estudada neste curso de especialização.

4.3.1.1 Características do microcontrolador Atmega

Este microcontrolador de 8 bits apresenta, segundo seu fabricante, varias características, entre elas:

- Alto desempenho e baixo consumo de energia;
- Avançada arquitetura RISC;
- 32 x 8 registradores de trabalho para fins gerais;
- Multiplicador de 2 tempos;
- 32K Bytes de memória flash de programa (Atmega 328P);

- 1K Bytes EEPROM (ATmega328P);
- 2K Bytes Interno SRAM (ATmega328P);
- 10.000 Ciclos para escrever / apagar Flash;
- 100.000 Ciclos para escrever / apagar EEPROM;
- Seis Canais PWM;
- Oito canais de 10-bit ADC no pacote TQFP e QFN / MLF;
- Seis canais de 10-bit ADC no pacote PDIP;
- 23 linhas programáveis de I / O;
- Tensão de operação: 1,8 - 5,5 V para ATMEGA328P;
- Faixa de temperatura: - 40 ° C a 85 ° C;
- Modo Ativo: 0,3 mA;
- Modo de baixo consumo 0,1 mA;
- Power-save Mode: 0,8 mA (Incluindo 32 kHz RTC).

Apesar de apresentar diversas características, muitos destes recursos não foram alvos de estudo neste trabalho. Para mais informações sobre este componente, pode-se consultar o *datasheet* do mesmo na página do fabricante da AVR ou a obra “Técnicas de projetos eletrônicos com os microcontroladores AVR”, de Charles Borges Lima, 2010.

4.3.2 Monitoração das grandezas do Painel Fotovoltaico

Como descrito anteriormente, o elemento responsável pelo controle é o Microcontrolador da AVR, Atmega328. Foram utilizadas deste componente apenas quatro entradas AD de 10 bits, as quais monitoraram as grandezas necessárias à implementação do controle de PWM do circuito.

Assim, através da leitura dos valores de tensão sobre os divisores resistivos, os conversores AD 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 AD que possa danificar as suas entradas. O circuito da FIGURA 35 demonstra os pontos de

leitura do circuito, responsável pela primeira parte do controle do sistema.

Em muitos casos é necessária uma tensão mais baixa do que a tensão que a fonte fornece. Esta necessidade pode ser suprida pelo divisor de tensão. Na FIGURA 35, V_{solar} 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. Estas 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 um *shunt*.

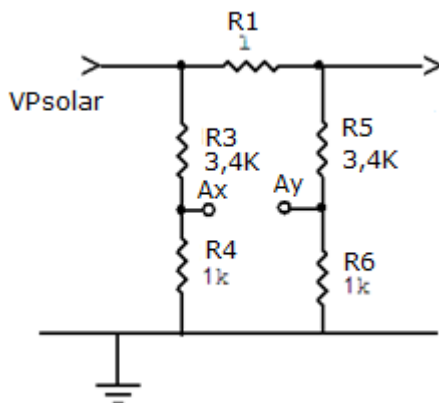


FIGURA 31 - Pontos de monitoração conversor AD, entrada do PV.
Fonte: O autor.

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

A partir das expressões 3 e 4 é possível determinar os elementos do divisor resistivo.

$$V_{ax} = \frac{R_4}{R_4 + R_3} * V_{Psolar} \quad (3)$$

$$V_{ay} = \frac{R_6}{R_6 + R_5} * V_{Psolar} \quad (4)$$

Calculado para o caso de máxima tensão imposta a entrada do microcontrolador, teremos:

$$V_{Psolar} = 21,3 \text{ V Máximo}$$

$$V_{ax} = V_{ay} = 5 \text{ V Máximo}$$

$$R_4 = R_6 = 1 \text{ K}\Omega \text{ (valor optado para cálculo de } R_3 \text{ e } R_5)$$

Aplicando os valores à expressão 3, são inferidos o valor de R_3 e aplicando à equação 4, o valor de R_5 . A estes valores foram somados um coeficiente de segurança determinando o valor escolhido para o protótipo, que ficou com $3,4 \text{ K}\Omega$ para R_3 e R_5 .

O resistor R_1 , apresentado na FIGURA 35, funciona como um *shunt* e através da tensão diferencial entre seus terminais foi calculada a corrente que o painel fornece ao circuito. Deste 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 $5,0\text{V}$, variando de zero até este valor.

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

A FIGURA 36 ilustra a técnica de uso do divisor resistivo para a monitoração das grandezas de saída sobre os supercapacitores.

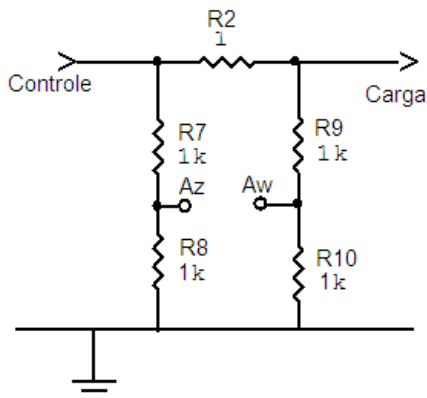


FIGURA 32 - Pontos de conexão do conversor AD na saída a carga.
Fonte: O autor.

4.3.3 Simulação do módulo fotovoltaico

A simulação do painel fotovoltaico foi realizada no software PSIM e o esquema utilizado para esta simulação está apresentado na FIGURA 37. Para esta simulação foram utilizadas grandezas idênticas ao painel disponível no LAB, que é de 5 watts. A partir desta simulação do painel fotovoltaico, foi traçada a curva característica do mesmo. O resultado está ilustrado na FIGURA 38.

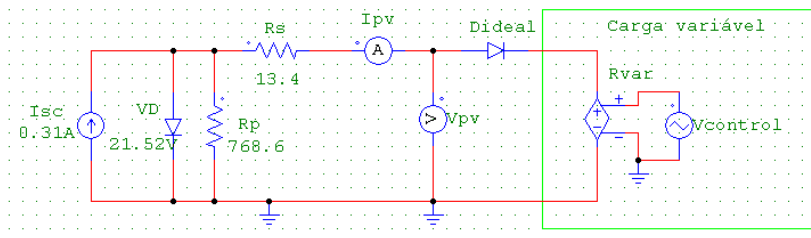


FIGURA 33 - Simulação do PV com carga.

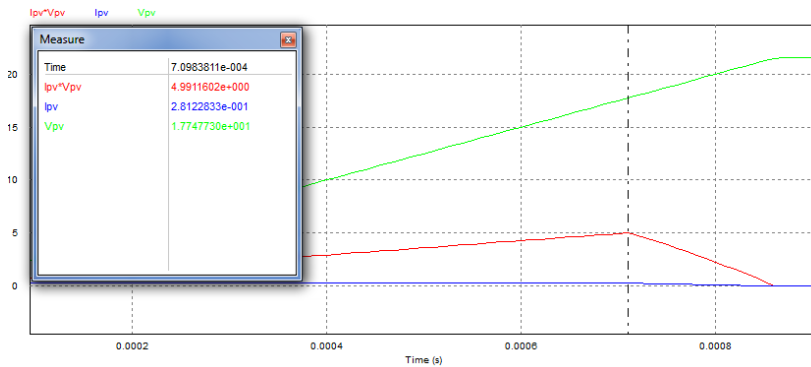


FIGURA 34 - Curva característica de tensão e corrente do PV de 5 watts.

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

As respostas das curvas de potência obtidas da simulação do painel através do software apresentam igualdade de valores se comparadas com as curvas obtidas de painéis solares com as mesmas características da simulação. Isto comprova a características reais do componente, conforme apresenta a FIGURA 5 da revisão bibliográfica.

No resultado gráfico da simulação do PV, na FIGURA 38, o ponto onde a linha tracejada encontra a curva $I_{pv} \cdot V_{pv}$ corresponde ao MPP do painel solar.

Os cálculos de valores de entrada para a monitoração das grandezas foram feitos pelos conversores Análogos Digitais (AD) nos pinos A1 e A2 da plataforma do Arduino Duemilanove, que correspondem às entradas Ax e Ay 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 do AD é de 10 bits, portanto este conversor possui uma escala de 2^{10} que é igual a 1024 posições. Sabendo

disto e que a tensão limite de entrada deste conversor em nível é de no máximo 5,0V, aplica-se o divisor resistivo para a entrada do conversor AD, garantindo uma tensão máxima limitada a 5 V, que opera em uma faixa de 1024 posições. Como a tensão no PV varia de 0 até 21,3V, o resistor foi calculado para, na escala máxima de 5,0V, atingir o valor máximo de 1000 posições, determinando, assim, a tensão de entrada do painel solar.

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

$$VPsolar = 0 \text{ então } Ax = 0.$$

$$\text{Mas se } VPsolar = 21 \text{ então } Ax = 1000.$$

Por motivo de segurança foi aplicado o valor de Ax em 1000 bits, o qual delimita a tensão de entrada (5,0V), e não 1024 bits, que seria o fim de escala do AD. Deste modo, fica garantido que ruídos não danifiquem a leitura ou o próprio conversor AD, extrapolando seu limite.

O cálculo da corrente de entrada do painel solar conectado ao divisor monitorado pelo Arduino será realizado da seguinte forma:

$$IPsolar = Ax - Ay$$

A diferença de potencial determina a corrente que circula na entrada do conversor, sendo fornecida pelo PV e calculada através do resistor R1 que servirá como um shunt. A conversão de valores em ampères está apresentada a seguir:

$$IPsolar = (Ax - Ay) * 4,4/1000$$

Para exemplificar, o PV aplicou uma corrente de 30 mA sob uma tensão de 20 V. O valor de tensão do Vay foi calculado conforme abaixo:

$$VPsolar = Vax = 20 \text{ V e } Vay = 19,97 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} V_{ay} &= V_{ax} - (I * R) \\ V_{ay} &= 20 - (0,03 * 1) \\ V_{ay} &= 19,97 \text{ V} \end{aligned}$$

Se o valor, em bits, do AD, no ponto em que A_x mede 20 V, for dividido pelo valor da relação do divisor resistivo, que é 4,4, será obtido, para uma escala de 5 V e 1000 bits, um V_{ax} , conforme apresentado a seguir:

$$V_{ax} = 20 / 4,4 = 4,5454 \text{ V}$$

Se 5,0V está diretamente relacionado a uma escala de 1000 bits, a leitura será 909 bits sobre o ponto de medida A_x . Para este mesmo processo, com $V_{ay} = 19,97 \text{ V}$, o conversor AD do microcontrolador lê $A_y = 907 \text{ bits}$. Esta 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 AD leia o valor de 19,70 V que, na escala do ponto de leitura do conversor A_y , será este valor dividido pela relação do divisor.

$$V_{ay} = 19,70/4,4 = 4,477272 \text{ V}$$

Então, pela relação, $A_y = 895$.

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 uma potência acima de 20% da sua potência nominal, a diferença de tensão sobre o resistor *shunt* apresentava um valor maior, e a leitura ficava mais consistente, não apresentando problemas para os cálculos. Portanto o software de controle embarcado no microcontrolador da AVR consegue 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 este problema, foi adicionada ao software de controle a técnica de média móvel para a obtenção desta leitura no AD. Esta técnica manteve a leitura mais consistente, pois realiza uma média de 'n' leituras, permitindo assim que o controle automático de posição e incremento tomasse a direção acertada.

Este 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 e 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, desta 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 AD, foi conectado ao circuito de controle do MPPT do painel solar. A saída PWM número 3, do Atmega328, 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 durante o período de trabalho muita variação na condição de fornecimento de energia. 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 CC, 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 PV em condições ideais. O software responsável pelo controle foi embarcado no microcontrolador Atmega328, sob a plataforma do Arduino. O código fonte do programa utilizado nestes testes está apresentado no apêndice A.

A plataforma do Arduino, onde está o controlador, é apresentada na Figura 39:

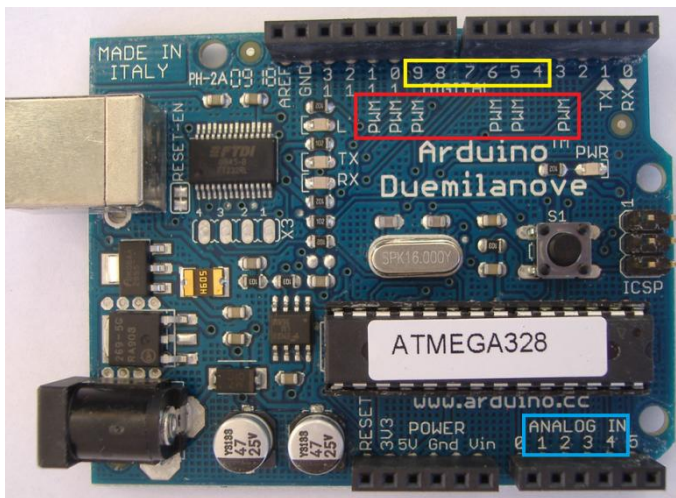


FIGURA 35 - Módulo Arduino.

Fonte: <http://www.adrirobot.it/arduino/arduino_duemilanove/immagini/ArduinoDuemilanove%20lato%201.jpg>.

As entradas destacadas em ANALOG IN, apresentadas na FIGURA 39, foram responsáveis pelas medições de grandezas A_x , A_y , A_z e A_w respectivamente em 1, 2, 3, 4 do Analog In. Através da leitura destas grandezas, o software embarcado no Atmega328 aplicava determinados pulsos de PWM para que o conversor Buck operasse adequadamente. A saída PWM utilizada do microcontrolador foi a de número 3.

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. Este componente foi adquirido e utilizado como uma ferramenta de leitura instantânea das grandezas solicitadas para cada ensaio. Este *Shield* permitiu a verificação de três ou quatro grandezas simultaneamente, e seguido da verificação dos valores destas grandezas, permitiu a correção destes antes das próximas etapas. A ilustração deste *Shield* LCD é apresentada na FIGURA 40.

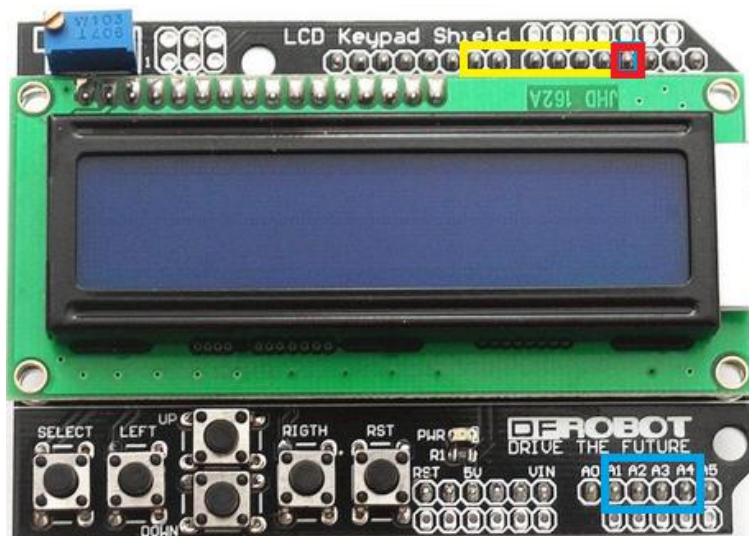


FIGURA 36 - Shield LCD para Arduino.

Fonte: <<http://www.droboticonline.com/index.php/arduino-lcd-keypad-shield.html>>.

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

O primeiro teste de bancada foi executado com uma fonte CC simulando um painel voltaico em condições de MPP. O gráfico está demonstrado na FIGURA 38. Foi utilizado o algoritmo do apêndice A no microcontrolador e sua resposta ao teste foi confirmada.

O código embarcado no microcontrolador para o controle de tensão e corrente sobre a carga, simulando o painel a plena carga, está colocado no apêndice A com os comentários ao lado das referidas entradas. O fluxograma do código pode ser observado na FIGURA 41 e apresenta uma visão detalhada do programa configurado no componente Atmega 328.

Este método de tensão constante é de simples implementação, sendo necessário apenas o conhecimento da variável V_{Psolar} do painel fotovoltaico.

Este método consiste na relação entre a tensão que fornece a potência máxima (VMP) e a tensão em circuito aberto (VOC), existentes nos painéis fotovoltaicos. Este valor é aproximadamente constante e igual a 0,78 V (na célula fotovoltaica), independente das condições externas ao funcionamento do painel. A FIGURA 5 demonstra com mais clareza este detalhe.

O algoritmo, apresentado no apêndice A, realiza a medição da tensão do painel e a compara com a tensão de referência. Em seguida é calculada a diferença através da comparação entre as duas variáveis. Com este dado é possível atualizar o índice de modulação, tendendo a igualar as tensões, fazendo com que o painel trabalhe fornecendo a potência máxima aproximada.

A FIGURA 41 mostra o fluxograma do algoritmo do método de Tensão Constante.

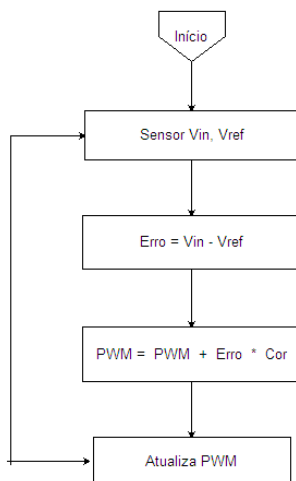


FIGURA 37 - Fluxograma do algoritmo Tensão Constante.

O código embarcado no microcontrolador Atmega 328, 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 embarcado no microcontrolador, algumas linhas de comando responsáveis por externar em um computador dados seriais que mostravam os valores lidos e calculados no Atmega328. Isto ocorreu quando o número de informações solicitadas para análise era maior do que o *Shield* LCD poderia apresentar.

Com o código do apêndice A sendo executado na etapa de testes, verificou-se que o carregamento do bloco de supercapacitores aconteceu de forma estável.

O código fonte da técnica P&O, por ser também fácil de projetar, foi colocado no apêndice B e descreve a atuação do microcontrolador sobre o pulso de PWM gerado e seus degraus de incrementos. Alguns comentários foram referenciados ao lado das respectivas linhas com a intenção de esclarecer a função que cada comando executa.

O fluxograma deste algoritmo está ilustrado na FIGURA 42.

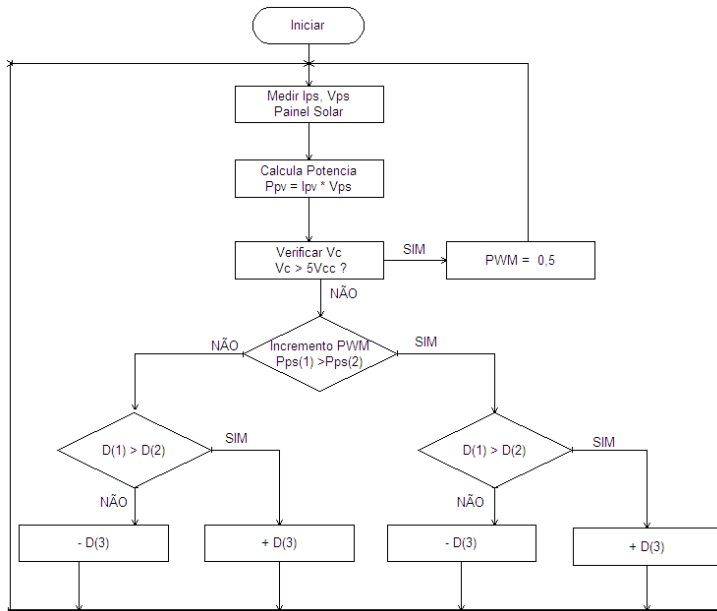


FIGURA 38 - Fluxograma da técnica Perturba & Observa.

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 deste 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 DE TESTES EXPERIMENTAIS

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 375F em um arranjo que permitiu uma tensão sobre seus terminais de 5,4V. Por motivo de segurança, foi definido um valor máximo na ordem de 4,85V. 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 43.

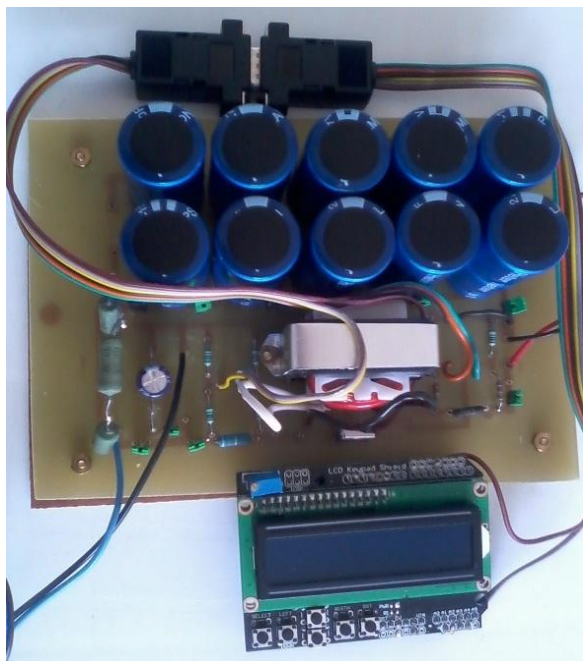


FIGURA 39 - Protótipo de testes.

5.1 Análise das medições feitas nos testes

A imagem da FIGURA 44 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 esta finalidade, nas dependências do IFSC. Foram simuladas várias intensidades solares através do 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.

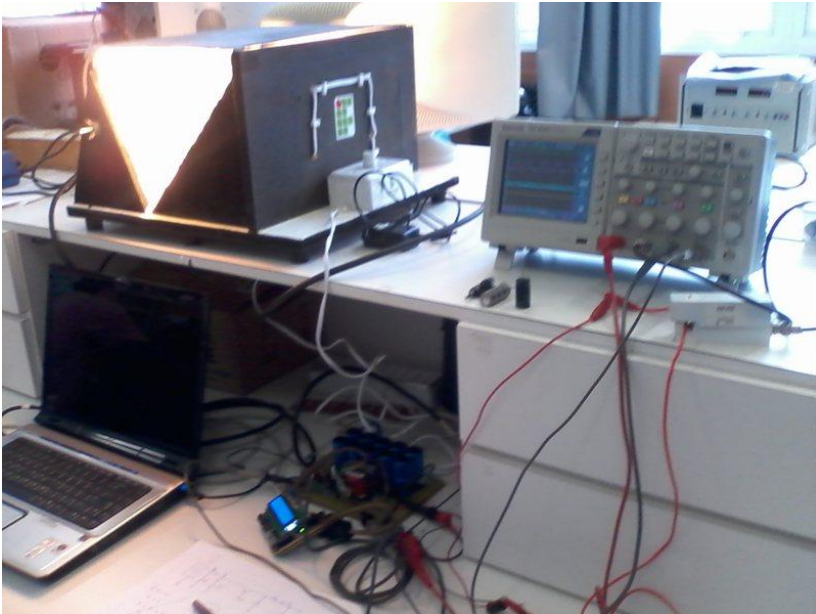


FIGURA 40 - Teste completo do sistema.

Inicialmente foi conectada 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 encontrados na FIGURA 45. 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.

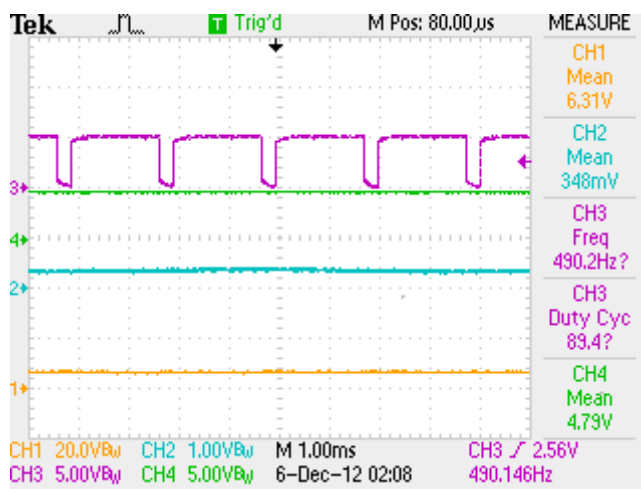


FIGURA 41 - Busca do MPPT.

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 Atmega 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 45 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, conforme gráfico da FIGURA 38.

No gráfico da FIGURA 46 o sistema está atuando próximo ao ponto de máxima eficiência energética e o trabalho do conjunto está em pleno funcionamento.

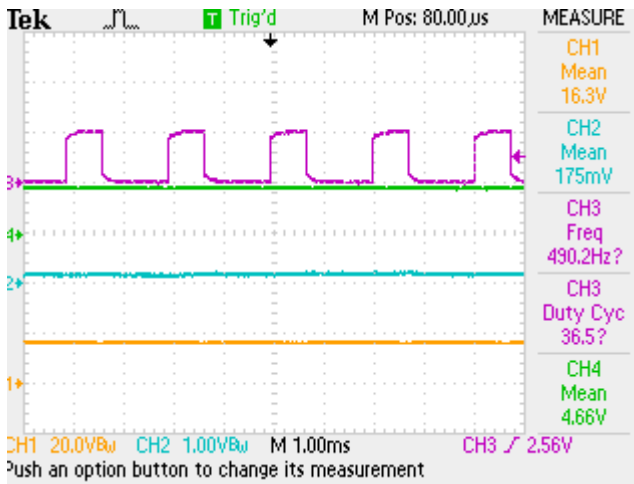


FIGURA 42 - Condição de carga no MPP.

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 4,66V dos 4,85V ajustados como finais no carregamento completo.

No próximo registro, na FIGURA 47, 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.

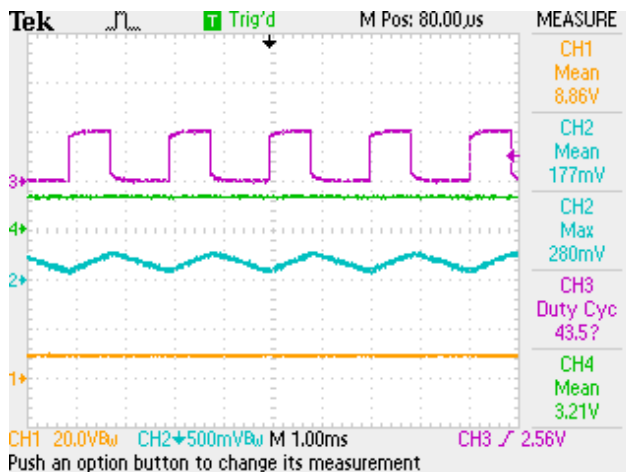


FIGURA 43 - Corrente no indutor antes do MPP.

Na FIGURA 47, 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. Estas medidas foram repetidas para uma condição dentro do MPP, conforme observado na FIGURA 48.

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 49 mostra o registro deste tempo. Para que fosse possível registrar valores em pontos intermediários de PWM, este tempo foi reduzido para 125 segundos. Com esta redução no tempo de PWM, foi possível registrar os pontos intermediários de carga dos supercapacitores.

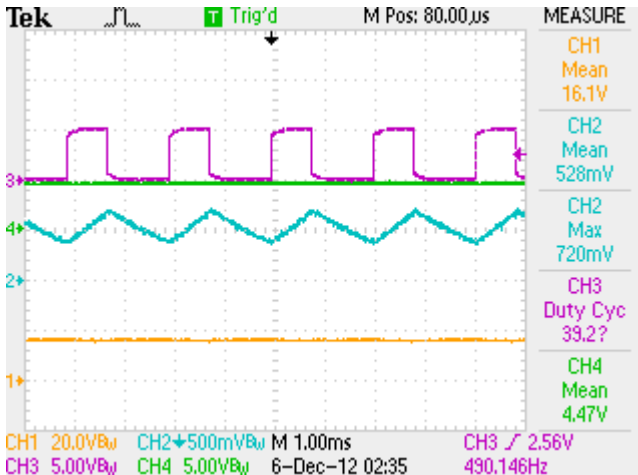


FIGURA 44 - Corrente no indutor trabalhando no MPP.

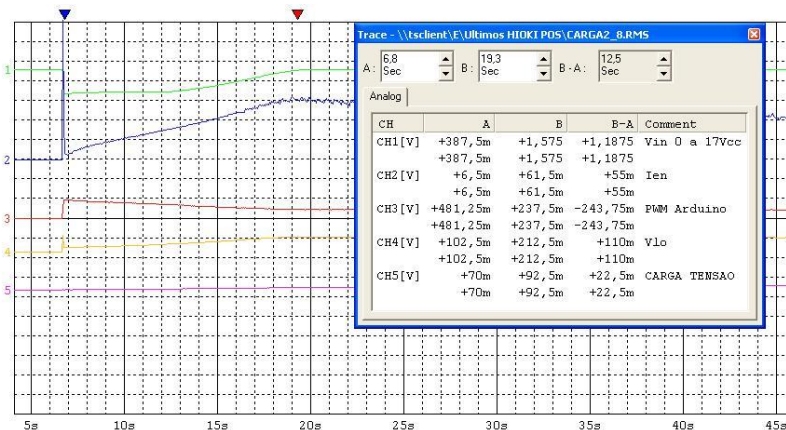


FIGURA 45 - Tempo de atuação do PWM.

Após várias medições foi completado o ciclo de carga dos supercapacitores, que pode ser visto na FIGURA 50 do ciclo de carga completo.

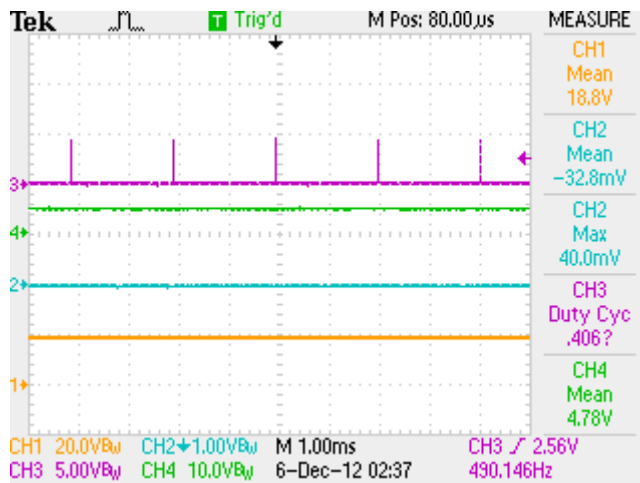


FIGURA 46 - Ciclo de carga completo.

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 uma corrente fornecida pelo painel solar e, por este motivo, um tempo a mais 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 50 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 destes testes foi a verificação do rendimento relacionado à conversão total do sistema. Os registros apresentados na FIGURA 51 mostram as relações de potências calculadas através destas medidas.

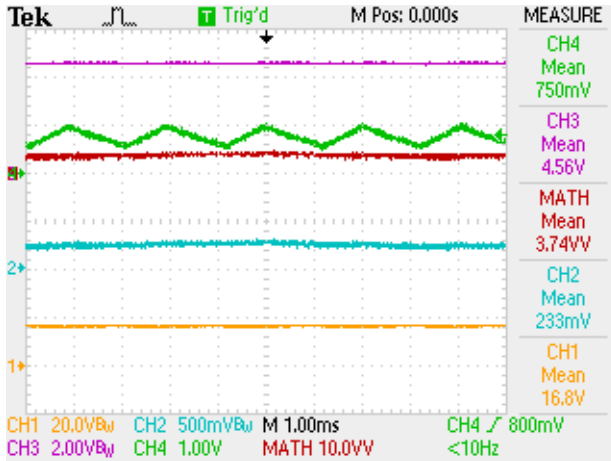


FIGURA 47 - Entradas e saídas – rendimento no MPP.

Na FIGURA 51 observa-se que o canal 2 representa a corrente fornecida pelo painel solar, enquanto 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 3,74W 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, através destas 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 3,74Watts. O valor da potência de entrada foi calculado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} V_{in} &= 16,8V \\ I_{in} &= 233mA \end{aligned}$$

$$\text{Potência } P = 16,8 * 0,233 = 3,9144 \text{ Watts.}$$

Para o cálculo do rendimento faz-se $3,74/3,9144 * 100 = 95,54\%$.

O rendimento foi novamente calculado para outro ponto de operação e, conforme a FIGURA 52, se manteve estável e próximo ao da medida anterior.

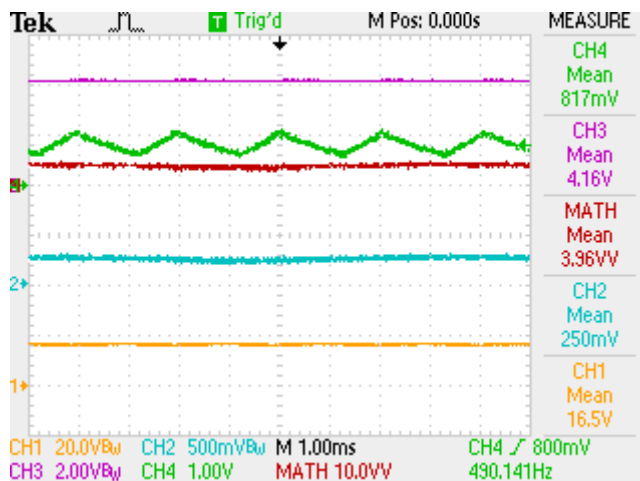


FIGURA 48 - Entradas e saídas - momento 2 rendimento.

Neste momento a potência calculada era de 3,96W, enquanto que a entrada fornecia a potência de 4,125W.

O cálculo do rendimento foi feito desta forma: $3,96/4,125 * 100 = 96,00\%$. 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, e 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 caía mais lentamente, quanto menor a corrente drenada. Desta forma, a descarga energética tende a estabilidade, mantendo os leds e a carga em funcionamento contínuo. Na FIGURA 53 está demonstrada a curva de descarga do bloco de capacitores nesta condição.

Com estas cargas drenando uma 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 125mA.

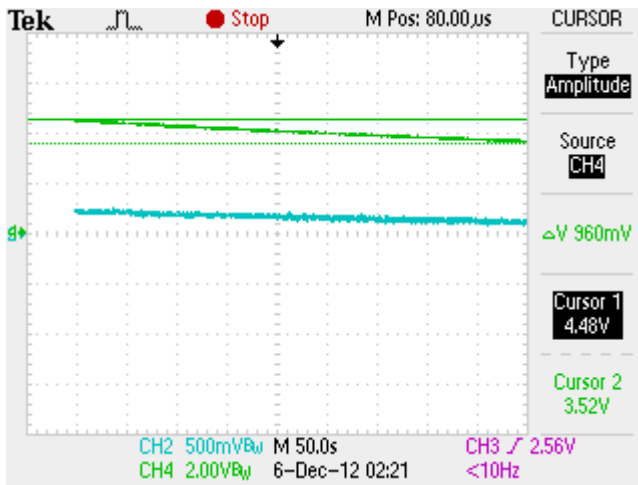


FIGURA 49 - Curva de descarga dos Supercapacitores.

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

O teste de autonomia do sistema, com duração de mais de 40 minutos em regime contínuo, está apresentado na FIGURA54.

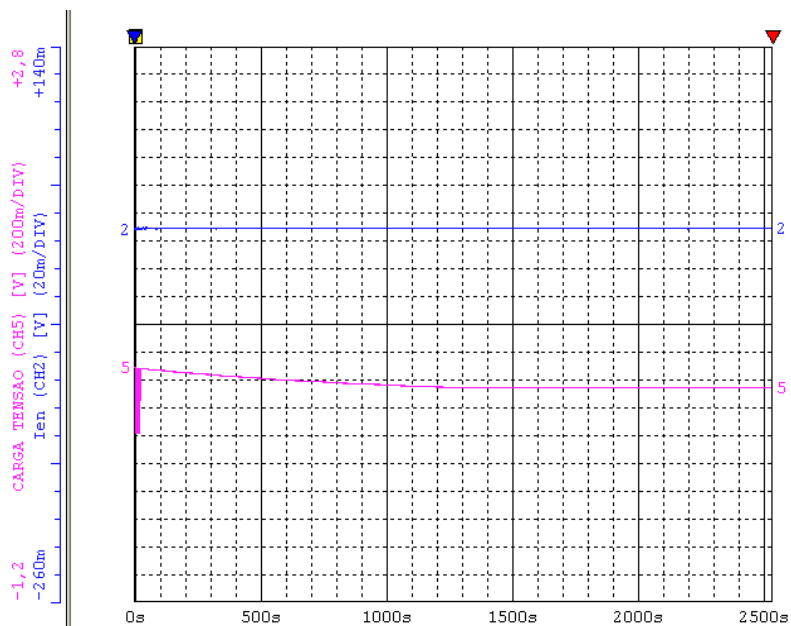


FIGURA 50 - Curva de autonomia do protótipo.

Observa-se neste registro que a tensão durante os primeiros 500 segundos cai mais rapidamente que durante os 500 segundos seguintes. Nos próximos 1500 segundos a queda é quase inexpressiva. A tensão limite para o funcionamento deste sistema de iluminação, baseando-se no valor de tensão das baterias de chumbo ácido, é de 3,325V. Como a tensão se manteve durante o último intervalo de 1000 segundos em 3,66V, 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 deste componente como uma

opção no armazenamento de energia elétrica. Estes 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. Estes 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. Esta característica é a responsável pelo tempo que o mesmo, utilizado como acumulador, poderá manter a energia guardada para uso posterior.

6. CONCLUSÃO

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 PV, atualmente em torno de 16%. Isto se traduz em uma das principais limitações no uso de painel fotovoltaico, juntamente com o seu custo. Este 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 estes 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 a 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 da família AVR, 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. Este foi facilmente confeccionado e, após a análise das várias técnicas de controle apresentadas, foi escolhida uma que atendessem 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 conseguir 375F em uma tensão de 4,85V, 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. Esta 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 este 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 este componente está ganhando mais espaço para aplicações deste 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 destes componentes através do desenvolvimento de novos materiais. Existem diversos projetos de uso de supercapacitores com finalidades idênticas, porém com características particulares de utilização.

PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Algumas propostas de trabalhos futuros passam pelo projeto, desenho e produção de um produto de iluminação de jardim ou balizadores de entradas de garagens, entre outros. O desenvolvimento de um produto mais enxuto e funcional pode ser realizado através de melhorias que passem pela técnica de MPPT a acumuladores bem dimensionados.

Os estudos e técnicas de fabricação com relação a este componente, aliados a novas melhorias de controle, são fundamentais para novas aplicações, sempre atentando ao tema de energia limpa, acumulada sem transtornos ambientais e com qualidade.

Além de produtos, novos estudos relacionados a este tema podem ser efetivados com o intuito de demonstrar outros aspectos importantes em um próximo trabalho, relativo ao uso de capacitores de grande porte como acumuladores de energia elétrica e portabilidade.

Outros métodos de busca do ponto de máxima eficiência energética podem ser testados.

REFERÊNCIAS

<http://www.fisica.uepg.br/Public/Documentos/1332880141_Apostila_de_F%C3%ADsica_Experimental_II.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2012.

ANDERSEN, M.; ALVSTEN, B.;. 200 W **Low Cost Module Integrated Utility Interface for Modular Photovoltaic Energy Systems**. In: **IECON**. Orlando; Florida, USA, 1995. Autor, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7039: **Pilhas e acumuladores elétricos**: Eletricidade. Rio de Janeiro, 1987. (Cancelada em 03/01/2011).

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.

BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar C. **Teoria fundamental da eletrônica de potência**. Florianópolis: Ed. do Autor, 2001.

BARSUKOV Yevgen, 2006, Texas Instruments
Battery Selection, Safety, and Monitoring in Mobile Applications

BLAKERS, Andrew W. Solar and Wind Electricity in Australia. **Australian Journal of Environmental Management**, v. 7, p 223-236, 2000.

BRITO, Moacyr A.G. de. et al. **Avaliação da Principais Técnicas para Obtenção de MPPT de Painéis Fotovoltaicos. Laboratório de eletrônica de Potência**. Departamento de Engenharia Elétrica. UNESP, 2009.

CASARO, Marcio Mendes; MARTINS, Denizar Cruz. **Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação**. Eletrônica de Potência. v. 13, n. 3, ago. 2008.

CAVALCANTE, Marisa; DAMASCENO, Eduardo Silva. **Função map: saídas e PWM**. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. Disponível em: <http://fritzing.org/media/fritzing-repo/projects/s/sensor-de-proximidade-com-o-arduino-e-sinal-sonoro/other_files/Arduino%20Parte%204_PWM_funcao_map.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2012.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Solar Princípios e Aplicações**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2012.

FRAIDENRAICH, Naum. Energia solar fotovoltaica. In: TOLMASQUIM, Maurício T. (Org.). **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

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.

II SNESF discute propostas para expandir o uso da energia solar fotovoltaica no Brasil. **Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito**. CRESESB (Informe) Rio de Janeiro, Ano X, n. 10, p. 12-13, set. 2005. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/periodicos/informe10.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2012.

JOURNAL OF ANALOG INNOVATION. Milpitas, California, EUA: Linear Technology. v. 22, n. 2, jul. 2012. 31p.

LIMA, Charles Borges de. **Técnicas de projetos eletrônicos com os microcontroladores AVR**. Florianópolis: Ed. do Autor, 2010.

LOPES, Luis C. G. **Sistema experimental fotovoltaico de geração de energia elétrica operando em paralelo com a rede elétrica CA.** Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2006. 169 f.

MACÊDO, Wilson N. **Application of photovoltaic systems in community rádios located in remote conservation units in the amazon.** Disponível em: <http://www.ufpa.br/gedae/SmallPV_01.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2012.

Microchip Technology Inc, ADN008
Charging Simplified for High Capacity Batteries
Autor: Bonnie C. Baker. Acesso 19/04/2011

Microchip Technology Inc, AN1088 disponível em
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01088a.pdf>
Author: Brian Chu. Acesso em 19/04/2011.

MOEHLECKE, A. **Módulos Fotovoltaicos e Fabricação de Células Solares** In: Simpósio Nacional de Energia Solar Fotovoltaica, 2., 2005, Rio Grande do Sul. **Anais...** Rio Grande do Sul: PUCRS, 2005.

MUSSOI, Fernando Luiz Rosa; VILLAÇA Marco Valério Miorim, **Capacitores.** 3. ed. Florianópolis: 2000.

NASA. The Edge of Sunshine. Jan. 2002. Disponível em: <http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/08jan_sunshine/>. Acesso em: 11 dez. 2012.

POMÍLIO, José A. **Fontes chaveadas:** Componentes passivos utilizados em fontes chaveadas, 2005. Cap. 6. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/%7Eantenor/pdf/FILES/CAP6.pdf>> . Acesso em: 11 dez. 2012.

RAMOS, Cristina de Moura. **Procedimentos para caracterização e qualificação de módulos fotovoltaicos**. Dissertação de mestrado em Energia – USP. São Paulo, 2006.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência: Circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron Books, 1999. 828p.

SAAB, Sérgio da Costa. Divisor de tensão resistivo. In: SAAB, Sérgio da Costa. **Apostila de Física experimental II**. p. 11-13.

SIEMENS. **Smart Highside Power Switch**: Semiconductor Group 03.97, p. 1. Disponível em: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/siemens/BTS410E2.pdf>>. Acesso em: out. 2012.

SOUZA, Renan Luís S. de; SILVA, Filipe Rogério C. da; SILVA, Nicksoni Fabra da. Aproveitamento da energia solar na iluminação pública de Florianópolis. **Revista Ilha Digital**, v. 2, p. 69 – 74, 2010. Disponível em: <<http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/index.php/ilhadigital/article/view/21/23>>. Acesso em: 11 dez. 2012.

THORNTON ELETRÔNICA LTDA. NEE-42/21/15. In: _____. **Catálogo de Ferrite**. Vinhedo, SP, 2008. Disponível em: <<http://www.thornton.com.br/pdf/CATALOGO%20THORNTON.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2012.

TOLMASQUIM, Maurício T. (Org.). **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 516 p.

UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA. **Energy Storage Device: Ultra-capacitor**. Flórida, 2012. Disponível em: <<http://www.eecs.ucf.edu/~tomwu/course/eel6208/presentation2011/S09%20Ultra-capacitor.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2012.

www.sta-eletronica.com.br.

Manual das Baterias Recarregáveis, Pilhas e Carregadores, 2012

APÊNDICES

APÊNDICE A - Código de MPPT utilizando fonte tensão constante:

```

const int n=20; // o numero de leituras para média móvel

int x[n+1];    // incremento na variável correspondente AD1
int y[n+1];    // incremento na variável correspondente AD2
int z[n+1];    // incremento na variável correspondente AD3
int w[n+1];    // incremento na variável correspondente AD4

// Utilizo a Biblioteca com funções para uso de um LCD
//baseado no Hitachi HD 44780 do Arduino

#include <LiquidCrystal.h>      // incluo LCD no código
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7); // determino os pinos do LCD

const int pin = 3;             // Pino de saída para controle do PWM

float vps, vsh, vlo, vc, pen = 5.00; // declaro as variáveis como float
float pwm = 1.00;             // declaro variável para PWM

void setup()
{
  Serial.begin(9600);          // inicia a porta de comunicação
  pinMode(pin, OUTPUT);       // determino a saída para o PWM

  lcd.begin(16, 2);           // determino o tipo de LCD 16 colunas por 2 linhas
  lcd.setCursor(0, 0);       // determino o inicio das colunas e linhas do LCD.
}

void loop()                   // Programa principal

{
  analogWrite(pin, pwm);      //aqui escrevo na saída o valor do PWM
  float analogValue = analogRead(vc); //Aqui pego a leitura da média móvel

  x[0] = analogRead(1);       // obtém o valor actual para AD1

```

```

y[0] = analogRead(2); // obtém o valor actual para AD2
z[0] = analogRead(3); // obtém o valor actual para AD3
w[0] = analogRead(4); // obtém o valor actual para AD4

vps = 0.00; vsh = 0.00; vlo = 0.00; vc = 0.00; // inicio variáveis com 0
for ( int i = n; i >= 1; i-- ){ // para calcular a média das “n” amostras
vps = vps + x[i]; x[i] = x[ i-1 ]; // Trata o número de amostras do AD1
vsh = vsh + y[i]; y[i] = y[ i-1 ]; // Trata o número de amostras do AD2
vlo = vlo + z[i]; z[i] = z[ i-1 ]; // Trata o número de amostras do AD3
vc = vc + w[i]; w[i] = w[ i-1 ]; // Trata o número de amostras do AD4

}

vps = vps / n; // calcula a média de n amostras para AD1
vsh = vsh / n; // calcula a média de n amostras para AD2
vlo = vlo / n; // calcula a média de n amostras para AD3
vc = vc / n; // calcula a média de n amostras para AD4

int corcg = (vlo - vc)*10.00; // calcula corrente da carga mA
float vps1 = (vps*5.00/1024.00)*4.40; // tensão sobre painel solar
float vsh1 = (vsh*5.00/1024.00)*4.40; // tensão sobre shunt painel solar
float vlo1 = (vlo*5.00/1024.00)*2.00; // tensão sobre indutor
float vc1 = (vc*5.00/1024.00)*2.00; // tensão sobre carga
int len = (vps - vsh)*10.00; // corrente de entrada em mA
int lou = (vlo - vc)*10.00; // corrente de saída em mA
float pen = (len*vps1)/1000; // potência do painel solar

if ( vc1 > 5.00 ) { // proteção sobretensão da carga 5V
pwm = 1.00; // colocando o PWM em valor baixo.
}

double vref = 16.5, erro, npwm; // ajusto tensão de MPPT
erro = vref - vin; // cálculo a diferença das tensões

if (erro >= 0.1) // verifico esta diferença
{
npwm = -erro * 0.01; // Dou passo lento para correção
pwm = pwm - npwm;
analogWrite(pin,pwm); // mando alterar valor na saída
}
if (erro < 0.1) // verifico esta diferença
{
npwm = -erro * 0.01; // Dou passo lento para correção
pwm = pwm + npwm;
analogWrite(pin,pwm); // mando alterar valor na saída
}

```

```

}
if (erro < 0.1 && erro > -0.1) // verifico esta diferença
{
    npwm = 0; // Dou passo para correção
    pwm = pwm + npwm;
    analogWrite(pin,pwm); // mando alterar valor na saída
}

Serial.print("VPS = "); // na tela do PC o texto tensão painel solar
Serial.print(vps1,DEC); // na tela do PC valor filtrado convertido
Serial.print(" VSH = "); // mostra na tela o texto tensão após shunt
Serial.print(vsh1,DEC); // mostra na tela o valor filtrado do AD1 em volts
Serial.print(" VLO = "); // mostra na tela o texto tensão sobre o indutor
Serial.print(vlo1,DEC); // mostra na tela o valor filtrado leitura do AD2
Serial.print(" VCarga "); // mostra na tela o texto tensão da carga
Serial.print(vc1,DEC); // mostra na tela o valor da leitura do AD4
Serial.print(" I carga = "); // mostra na tela o texto I carga =
Serial.print(corcg,DEC); // mostra valor calculado de corrente em mA
Serial.print(" mA"); // mostra na tela o texto mA
Serial.print(" I ent. = "); // mostra na tela o texto I ent. =
Serial.print(len,DEC); // calculado corrente do painel solar em mA
Serial.print(" mA"); // mostra na tela o texto mA
Serial.print(" PWM = "); // mostra na tela o texto do PWM
Serial.print(pwm,DEC); // mostra na tela o valor bruto do PWM
Serial.println(""); // colocar os valores/textos acima em sequencia

// Abaixo os dados para amostragem no LCD

lcd.setCursor(0,0); // inicia o LCD na posição 0 de linha e coluna
lcd.print("P. ent. "); // no LCD texto "P. ent. " carga em mA
lcd.print(pen); // no LCD valor de pen
lcd.print(" W"); // no LCD o texto "W"
lcd.setCursor(0,2); // posiciona valores abaixo no LCD na 2ª linha
lcd.print("VC "); //mostra no LCD o texto "VC"
lcd.print(vc1); //no LCD o valor filtrado convertido vc1
lcd.print(" PW "); //no LCD o texto Pwm
lcd.print(pwm); // mostra na tela o valor bruto do PWM

delay(100); // Aguarda 100 ms
}

```


APÊNDICE B – Código de busca do MPPT da técnica Perturba & Observa

Abaixo o código em “C” do método de MPPT da técnica Procura & Observa:

```
// INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
//SANTA CATARINA - CAMPUS FLORIANÓPOLIS
// DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
// CURSO TÉCNICO DE ELETRÔNICA
// ELETRÔNICA DE POTÊNCIA
// NOVEMBRO DE 2010

#include <math.h>           // inclui a função matemática

__declspec(dllexport) void simuser (t, delt, in, out)

double t, delt;           // Variáveis tempo e degrau de PWM ( perturbação )
double *in, *out;        // Variáveis entradas e saídas para PWM

{

static double p_atual, p_anterior = 0, vc = 0.25, vc_novo = 0, direcao = 1,
delta = 0.00001;        // seto valores iniciais e de incremento.

p_atual = in[0];         // determine o início em 0

    if (p_atual > p_anterior) // se a perturbação atual maior que antes
    {                          // e
        if (direcao = 1)      // direção for 1
        {
            vc_novo = vc + delta; // novo valor acrescenta delta
            direcao = 1;         // mesma direção
        }
        if (direcao = -1)     // direção contrária
        {
            vc_novo=vc-delta; // novo valor decrementa delta
            direcao = -1;     // mantendo a direção
        }
    }
}
```

```
if (p_atual < p_anterior) // se perturbação atual for menor que antes
{
    if (direcao = 1)          // e direção 1
    {
        vc_novo=vc-delta;    // novo valor decremeneta delta
        direcao = -1;       // direção será contrária
    }
    if (direcao = -1)       // se mantenho a direção
    {
        vc_novo = vc + delta; //novo valor acrescenta delta
        direcao = 1;        // nova direção
    }
}
p_anterior = p_atual;      // se forem iguais, mantenho valor de saída.
vc = vc_novo;
out[0] = vc;              // mando para a saída.
```