

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



Pedro Henrique Gomes Venturott

**Protótipo de Tecnologia Assistiva em Triciclos Utilizando
Energia Fotovoltaica**

Vitória-ES

Julho/2017

Pedro Henrique Gomes Venturott

Protótipo de Tecnologia Assistiva em Triciclos Utilizando Energia Fotovoltaica

Parte manuscrita do Projeto de Graduação
do aluno Pedro Henrique Gomes Venturott,
apresentado ao Departamento de Engenharia
Elétrica do Centro Tecnológico da Uni-
versidade Federal do Espírito Santo, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.

Vitória-ES

Julho/2017

Pedro Henrique Gomes Venturott

Protótipo de Tecnologia Assistiva em Triciclos Utilizando Energia Fotovoltaica

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Pedro Henrique Gomes Venturott, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 07 de Julho de 2017.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Paulo José Mello Menegáz
Instituto Federal do Espírito Santo
Orientador

Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientadora

Profa. Dra. Eliete Maria de Oliveira Caldeira
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jorg Andreas Schneebeli
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Vitória-ES

Julho/2017

Dedico este trabalho a meu filho, Chico, que com seu nascimento redefiniu minha concepção de amor.

"Do. Or do not. There is no try."

Mestre Yoda, "Star Wars: The Empire Strikes Back", 1980.

RESUMO

Atualmente, o emprego de bicicletas elétricas como meio de transporte vem tomando destaque na sociedade dada a sua relação com a utilização de veículos que não emitem gases poluentes; veículos de funcionamento híbrido, que podem ser movidos tanto pela força do usuário quanto pela energia elétrica, oferecem uma excelente alternativa para indivíduos que desejam se locomover utilizando um meio-termo entre o compromisso de se movimentar usando algum auxílio e a prática de exercício físico. De forma similar, a utilização de energia solar na obtenção de energia elétrica tem sido estudada e aprimorada de forma intensa, devido à abundância praticamente infinita de seu recurso matriz; novas políticas de geração limpa e consciente vêm sido cada vez mais valorizadas por governos, indústrias e entidades sociais.

Este documento visa relatar a execução do trabalho realizado durante a concepção, implementação e confecção de um sistema que utiliza tecnologia assistiva alimentada por energia solar para movimentar um triciclo de 2 lugares.

Através de um painel solar, o protótipo transforma a energia solar captada em energia elétrica, armazenando-a em uma bateria; essa energia é então utilizada para acionar um motor de partida elétrico, que tem a finalidade de iniciar o movimento do conjunto.

O sistema acima descrito é controlado eletronicamente, através de um microcontrolador fabricado em arquitetura *ARM* acoplado em um *launchpad*, que tem a função de monitorar e acionar os diversos componentes empregados. Na implementação da programação, foi utilizado o padrão *CMSIS* (*Cortex Microcontroller Software Interface Standard*).

Palavras-chave: Energia solar; Bicicleta elétrica; *ARM*; *CMSIS*.

ABSTRACT

Nowadays, the use of electric bicycles as a means of transport has been highlighted in society given its relation with the use of vehicles that do not emit polluting gases; hybrid-powered vehicles that can be driven by both user and electric power offer an excellent alternative for individuals who wish to move around using a trade-off between moving around using some assistance and practicing physical exercise. Similarly, the use of solar energy to obtain electric energy has been intensively studied and improved, due to the practically infinite abundance of its matrix resource; new policies of clean and conscious generation have been increasingly valued by governments, industries and social entities.

This document aims to report the execution of the work carried out during the design, implementation and manufacture of a system that uses assistive technology powered by solar energy to drive a 2-seat tricycle.

By the use of a solar panel, the prototype transforms the captured solar energy into electrical energy, storing it in a battery; this energy is then used to drive an electric starter motor, which has the purpose of introducing the assembly to the movement.

The system described above is controlled electronically, through a microcontroller manufactured in ARM architecture coupled to a launchpad, which has the function of monitoring and activating the various components employed. In the programming implementation, the CMSIS (Cortex Microcontroller Software Interface Standard) standard was used.

Keywords: Solar Energy; Electrical Bicycle; ARM; CMSIS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dopagens eletrônicas dos tipo N e P	16
Figura 2 – Efeito fotovoltaico em uma célula.	17
Figura 3 – Modelagem de uma célula fotovoltaica	17
Figura 4 – Curva de tensão x corrente de uma célula fotovoltaica	18
Figura 5 – Curva de carregamento pelo método corrente constante e tensão constante	20
Figura 6 – Princípio Básico de funcionamento de um motor CC convencional . . .	21
Figura 7 – Arquivos do padrão CMSIS	23
Figura 8 – Bateria adquirida	26
Figura 9 – Dados elétricos do painel fotovoltaico utilizado	27
Figura 10 – Conversor DC-DC <i>buck</i> utilizado	28
Figura 11 – Motor de partida utilizado	29
Figura 12 – <i>Kit</i> de desenvolvimento <i>Tiva C</i> TM4C123G	30
Figura 13 – Módulo conversor <i>DC-DC</i> utilizado na alimentação do <i>kit</i> de desenvolvimento <i>Tiva C</i> TM4C123G	30
Figura 14 – <i>Layout</i> do circuito de acionamento desenvolvido	31
Figura 15 – Relé de partida 35850-KCN-003	32
Figura 16 – <i>Layout</i> do circuito de acionamento desenvolvido (externo)	32
Figura 17 – Placa desenvolvida	34
Figura 18 – Função <i>main</i>	37
Figura 19 – Função “Leitura de Tensão”	38
Figura 20 – Função “Leitura de Tensão Painel”	39
Figura 21 – Função “Leitura de Tensão Bateria”	40
Figura 22 – Função “Acionamento Motor”	41
Figura 23 – Função “Desliga Motor”	42
Figura 24 – Função “Troca Modo”	43
Figura 25 – Diagrama de estados do sistema	44
Figura 26 – Protótipo do sistema desenvolvido	45
Figura 27 – Curvas tensão x corrente de uma célula fotovoltaica para diferentes valores de irradiação	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	10
1.2	Objetivos	11
1.3	Metodologia	12
1.4	Estrutura do Texto	13
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	15
2.1	Painel Fotovoltaico	15
2.2	Bateria de Chumbo-Acido	19
2.3	Motor de Corrente Contínua	20
2.4	Padrão CMSIS	22
3	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	24
3.1	Visão Geral do Funcionamento	24
3.2	Hardware	25
3.2.1	Bateria de Chumbo-Ácido	26
3.2.2	Painel Solar	27
3.2.3	Motor de Partida	28
3.2.4	Placa de Desenvolvimento	29
3.2.5	Acionamento	31
3.2.6	Placa Confeccionada	33
3.3	Algoritmo e Firmware	34
3.3.1	Ambiente de Programação	34
3.3.2	Funcionamento Geral	35
3.3.3	Bibliotecas Desenvolvidas	36
3.3.4	Algoritmo Implementado	37
4	RESULTADOS E CONCLUSÕES	45
4.1	Resultados	45
4.2	Conclusões	47
4.2.1	Dificuldades Encontradas	47
4.2.2	Conclusões Finais	48
5	TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

O conceito de bicicletas elétricas existe desde 1895, quando Ogden Bolton Jr. patenteou uma bicicleta elétrica nos Estados Unidos, com o acoplamento direto de um motor de 6 polos na roda traseira (BOLTON, 1895); a ideia de se alimentar, com energia elétrica, um veículo que esteve presente na humanidade desde 1817 (HERLIHY, 2004), pode soar como algo recente, mas data de uma época em que a maioria julgaria ser impossível tal tipo de tecnologia ser concebida. Porém, a tecnologia tal qual conhecemos hoje só surgiu em 1992, com a fabricação e comercialização de um bicicleta elétrica chamada *Zike*, produzida pela *Vector Services Limited*, que utilizava uma bateria de níquel cádmio para alimentar um motor, de peso elevado, composto de imãs permanentes (TURNER, 2013). Desde então, a tecnologia utilizada na fabricação desse veículos foi sendo aprimorada, com a utilização de baterias mais eficientes, motores mais leves e mais potentes e controles mais sofisticados. As bicicletas elétricas atuais permitem ao usuário tanto a utilização do sistema de propulsão elétrico do veículo, quanto o método tradicional de locomoção provindo do usuário; bicicletas elétricas vêm sido cada vez mais procuradas, devido a diversos fatores, como a não emissão de poluentes na atmosfera, o preço reduzido quando comparado a preços de outros veículos automotores, a possibilidade da realização de exercício físico, etc.

1.1 Justificativa

A tecnologia assistiva está cada vez mais presente no cotidiano do ser humano moderno; novas necessidades surgem, e a sociedade precisa adaptar-se para atender aos diversos tipos de pessoas com os mais variados tipos de limitações. Metodologias e tecnologias de inclusão vêm assumindo um papel cada vez mais importante nessa adaptação, sendo as implementações de assistência a pessoas idosas uma das principais vertentes; com o aumento da média da expectativa de vida geral da população, mais e mais pessoas idosas encontram-se entre os indivíduos que compõem a sociedade, evidenciando assim a necessidade de implantação de políticas e tecnologias de inclusão.

A obtenção de formas de energia limpa e renovável para a execução dos processos humanos é uma questão que vem sido levantada cada vez mais pela comunidade científica, industrial e social. Novas realizações sobre o estado do planeta e a fragilidade de seu ecossistema evidenciam a responsabilidade que possuímos em garantir que os recursos, ao serem utilizados, não se esgotem e não degradem o meio ambiente. Dentre as alternativas utilizadas atualmente, a energia solar ganha destaque, pois possui fonte energética praticamente infinita e tem um impacto ambiental extremamente baixo.

Inserido no contexto acima, o trabalho relatado nesse documento utiliza energia solar,

captada através de um painel fotovoltaico; a energia é utilizada para assistir o movimento inicial de um triciclo de 2 lugares, visando apenas viabilizar a utilização do veículo por pessoas idosas, ou com alguma dificuldade motora nos membros inferiores, de forma que seja vencida a barreira inicial da inércia mas ainda proporcionando o benefício do exercício físico a ser praticado no restante da atividade. O trabalho se propõe, portanto, a desenvolver a possibilidade do uso de um veículo de passeio para pessoas que tenham dificuldade com a utilização do mesmo atualmente.

O protótipo a ser desenvolvido possui características únicas, pois não se tem registro, atualmente, de um veículo com as características propostas; triciclos elétricos alimentados por energia solar que já existem são construídos com a finalidade de utilizar a assistência de locomoção durante todo o percurso, e não apenas durante o início do movimento (EVOVELO, 2004; TRANSIT, 2004); isso faz com que sua confecção seja realizada com componentes de maior custo, o que foge do escopo do projeto descrito neste documento, que visa apenas viabilizar o uso do veículo para pessoas com certas dificuldades motoras, de forma que a implementação do sistema seja de menor custo possível e seu uso possa possibilitar a prática de exercício proposta pelo triciclo. Dessa forma, a realização do projeto se justifica pela proposta de desenvolvimento de um sistema *low cost* que auxilie no deslocamento inicial de um veículo de passeio, utilizando energia solar, sem que a assistência automotora permaneça após a saída do estado inicial.

1.2 Objetivos

O trabalho descrito tem como objetivo originar um sistema que seja capaz de captar energia solar, transformá-la em energia elétrica, armazenar essa energia, e disponibilizá-la para o uso na locomoção inicial de um triciclo. O sistema deverá ser capaz de carregar uma bateria de chumbo-ácido através da energia proveniente de um painel solar de forma eficiente e segura, e, após fornecer carga suficiente para a bateria, ser capaz de alimentar um motor de partida por tempo determinado, a comando do usuário, satisfeitas determinadas condições de carregamento. O carregamento não deverá ser efetuado de forma simultânea com o acionamento do motor, e deverá possuir algum indicativo visual para o monitoramento do mesmo por usuários ausentes na implementação. Todo o sistema deverá ser controlado utilizando tecnologia embarcada, e o *hardware* dos acionamentos deverá ser implementado para que o módulo de controle seja capaz de acioná-los e os mesmos sejam aptos a fornecer a potência necessária aos componentes com maior demanda energética do sistema. Para a implementação do sistema descrito acima, alguns estudos deverão ser realizados pelo autor: princípio de funcionamento de carga e descarga de baterias, partida de veículos elétricos, eletrônica de acionamento, estrutura de microprocessadores *ARM*, codificação *CMSIS* e funcionamento e operação de painéis solares. Tais aquisições de conhecimento se encaixam

nos objetivos a serem alcançados, visto que o trabalho visa o enriquecimento de conteúdo adquirido pelo autor.

Para se alcançar os objetivos descritos acima, alguns objetivos foram definidos de forma mais precisa:

- Estudo e análise do cenário atual no que se refere à bicicletas e triciclos elétricos, que utilizem energia solar ou não.
- Estudo teórico dos diversos componentes que integram o sistema (painéis solares, motores elétricos, baterias e microcontroladores).
- Elaboração de bibliotecas específicas para o microcontrolador usado, que serão utilizadas no desenvolvimento do projeto, porém possuam aplicabilidades gerais, com o possível fornecimento das bibliotecas como *software* livre.
- Desenvolvimento de um sistema que seja capaz de carregar a bateria utilizando energia proveniente de um painel solar.
- Implementação de um sistema que, sendo acionado pelo usuário, energize um motor de partida de motocicleta por tempo determinado, drenando energia da bateria, e após esse tempo fixado desse o movimento do mesmo.
- Elaboração de indicadores visuais para usuários que não tenham sido participantes do processo de construção do trabalho, de forma que o sistema possa minimamente evidenciar se os níveis de tensão encontram-se adequados ou não.
- Desenvolvimento de interface simples com o usuário, de forma que o mesmo possa interagir com o protótipo de forma clara e satisfatória.

1.3 Metodologia

Para a elaboração do projeto, o mesmo foi dividido em diversas etapas de desenvolvimento com características específicas: pesquisa e aquisição de conhecimento, definição de *hardware* e *firmware*, programação do *firmware* embarcado, montagem do sistema, teste e verificação da sua funcionalidade, execução de possíveis ajustes no sistema, e elaboração da documentação do que foi executado. A seguir, essas etapas são descritas:

- Pesquisa e aquisição de conhecimento: essa etapa visa a preparação que será necessária para a elaboração do projeto; consiste na busca tanto de conhecimento

teórico referente às tecnologias a serem empregadas (funcionamento de painéis solares, baterias e motores elétricos) quanto na procura por tecnologias atuais que se aproximem do projeto em questão (partida elétrica em diversos tipos de veículos, triciclos e bicicletas elétricas, carregamento de sistemas de armazenamento de energia utilizando painéis fotovoltaicos, etc).

- Definição de *hardware* e *firmware*: essa é a parte mais crítica do desenvolvimento; nela serão tomadas as decisões com relação aos componentes a serem utilizados (que definem características como tensão de trabalho, potência requerida pelo acionamento, sinal solicitado no acionamento, temporizações e processamento requerido), assim como as soluções selecionadas com relação ao algoritmo embarcado que será utilizado no controle do sistema (que é responsável por definir tempo de resposta de controle, constantes de tempo das temporizações, etc).
- Programação do *firmware* embarcado: nessa etapa, será implementado o algoritmo desenvolvido em linguagem de programação; serão desenvolvidas as bibliotecas necessárias para a implementação do controle, utilizando o padrão de programação *CMSIS* para processadores *ARM*.
- Montagem do sistema: aqui será efetuada a montagem física do projeto, integrando desde os grandes componentes de consumo e fornecimento de potência elétrica até os componentes de controle.
- Teste e verificação da funcionalidade: esse estágio do desenvolvimento do projeto valida e garante que o sistema funciona de forma satisfatória e atende aos requisitos estabelecidos.
- Execução de possíveis ajustes no sistema: após a realização de testes, é possível que sejam necessários ajustes no projeto, para que o mesmo alcance os objetivos estabelecidos.
- Elaboração da documentação do que foi executado: nessa etapa final, desenvolve-se o documento final do projeto; este documento visa relatar o desenvolvimento do trabalho de forma clara e objetiva. Além disso, será necessária a elaboração de uma apresentação do projeto, para que o trabalho possa ser exibido.

1.4 Estrutura do Texto

Este documento, com a proposta de relatar as mais variadas partes do projeto, foi dividido em capítulos:

- Introdução: tem o papel de conteúdo introdutório, relatando as ideias conceituais envolvidas no projeto, justificativa da sua execução, objetivos a serem alcançados ao seu término e a metodologia que pretende ser adotada.
- Embasamento Teórico: esse capítulo visa descrever as tecnologias utilizadas no desenvolvimento do trabalho, necessárias para a implementação do mesmo.
- Desenvolvimento do Projeto: visa a descrição detalhada da implementação do trabalho descrito, detalhando tanto a parte de *hardware* quanto de *firmware* desenvolvidas e evidenciando as escolhas tomadas para a efetivação do projeto.
- Resultados e Conclusões: propõe a exposição dos resultados obtidos, avaliando o cumprimento dos objetivos propostos, bem como avalia a possibilidade de trabalhos futuros a serem realizados com o projeto.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

A seguir, são descritas de forma objetiva as principais tecnologias empregadas no desenvolvimento do projeto proposto.

2.1 Painel Fotovoltaico

Painéis fotovoltaicos são dispositivos que captam a energia emitida pelo Sol e transformam essa energia em energia elétrica, através do efeito conhecido como efeito fotovoltaico; são formados por células fotovoltaicas, unidades fundamentais no processo de conversão, que por sua vez são constituídas de material semicondutor (PINHO; GALDINO, 2014).

As células fotovoltaicas podem ser classificadas em 3 gerações, de acordo com o material semicondutor que as constitui. A primeira geração, que atualmente é a que representa majoritariamente a presença de células fotovoltaicas no mercado, é dividida em duas cadeias produtivas: silício policristalino (p-Si) e silício monocristalino (m-Si) (PINHO; GALDINO, 2014).

A segunda geração tem como materiais utilizados na confecção o silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Essa geração representa uma fração muito pequena das células utilizadas atualmente, pois sua tecnologia apresenta baixo rendimento, além de enfrentar dificuldades como vida útil reduzida e indisponibilidade de materiais (PINHO; GALDINO, 2014).

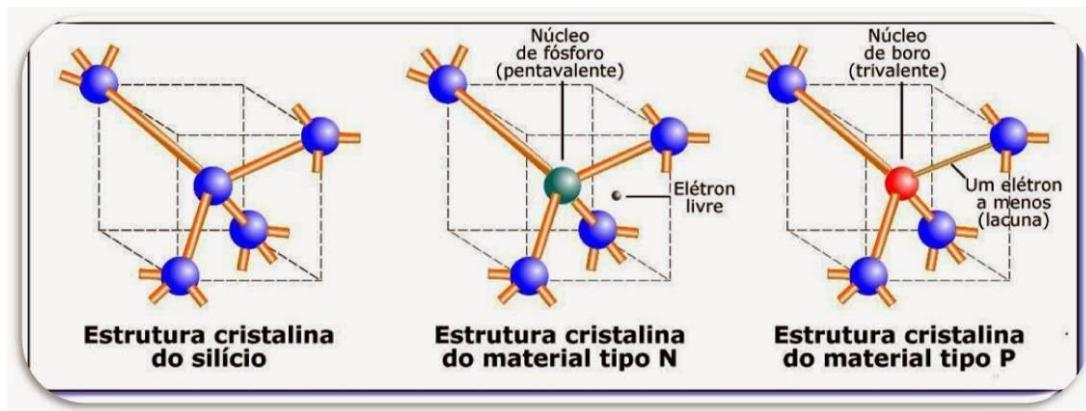
A terceira geração é a mais tecnologicamente avançada, estando em fase de testes e desenvolvimento, sendo dividida em 3 subcategorias: célula multijunção e célula para concentração (CPV), células sensibilizadas por corantes (DSSC), e células orgânicas e poliméricas (OPV). Tais tecnologias ainda não apresentam custo competitivo quando comparadas com a primeira geração, sendo utilizadas em aplicações específicas atualmente e reservadas para o uso futuro (PINHO; GALDINO, 2014).

O funcionamento das células fotovoltaicas se dá, principalmente, devido à característica dos materiais semicondutores que as constituem. No caso específico do silício, material mais utilizado atualmente na produção de células fotovoltaicas, o material constituinte possui 4 elétrons na camada de valência, ou seja, realiza 4 ligações covalentes com átomos vizinhos, resultando em uma rede cristalina (PINHO; GALDINO, 2014). Para que se possa obter o efeito desejado característico de uma célula fotovoltaica, deve-se realizar o procedimento conhecido como dopagem eletrônica; ao se adicionar um elemento pentavalente (como por exemplo o fósforo), ou seja, um elemento que possua 5 elétrons em sua camada de

valência, na estrutura cristalina do material semicondutor, cria-se uma situação em que um elétron apresenta uma fraca ligação com seu átomo de origem. À temperatura ambiente, esse elétron já possui energia suficiente para saltar para a banda de condução, ou seja, deixar seu átomo de origem com uma carga positiva. Tal dopagem é conhecida como *tipo n* (PINHO; GALDINO, 2014). Por outro lado, ao se dopar o material semicondutor com um elemento trivalente, ou seja, elemento que possua 3 elétrons em sua camada de valência, um fenômeno análogo, porém de caráter inverso se observa; haverá a falta de um elétron no átomo do elemento para que se completem as ligações com os átomos de silício na rede cristalina, ocasionando assim o que se chama de lacuna ou buraco. Tal lacuna, à temperatura ambiente, é capaz de atrair um elétron vizinho, atribuindo assim uma carga negativa ao átomo; esse tipo de dopagem é conhecido como *tipo p*, sendo o boro o elemento mais utilizado no processo (PINHO; GALDINO, 2014).

Na figura 1, pode-se visualizar, em um esquema simplificado, os átomos de boro e fósforo nas estruturas cristalinas de silício.

Figura 1 – Dopagens eletrônicas dos tipo *N* e *P*.

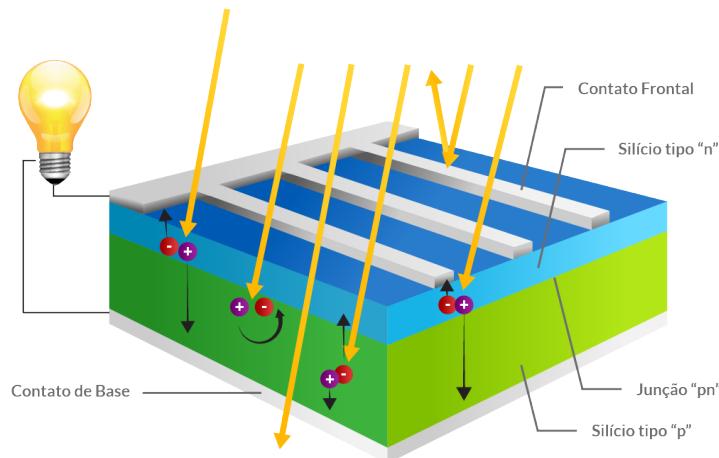


Fonte: (SILVA, 2013).

O efeito fotovoltaico ocorre na união das duas estruturas citadas, formando uma *junção p-n*. Na junção, os elétrons livres de boro fluem da camada *n* para a camada *p*, criando uma zona de equilíbrio de cargas, e consequentemente um campo elétrico, pois são deixados tanto lacunas na fronteira da parte *n* quanto elétrons na fronteira da parte *p*. Quando sob a incidência de luz, ocorre a quebra do equilíbrio estabelecido; os elétrons livres da camada *n* mais distantes da junção passam a ser atraídos para a camada *p*, gerando assim uma diferença de potencial entre seus terminais e uma corrente elétrica ao se estabelecer um caminho externo para a mesma (PINHO; GALDINO, 2014).

A figura 2 ilustra o fenômeno explicado anteriormente.

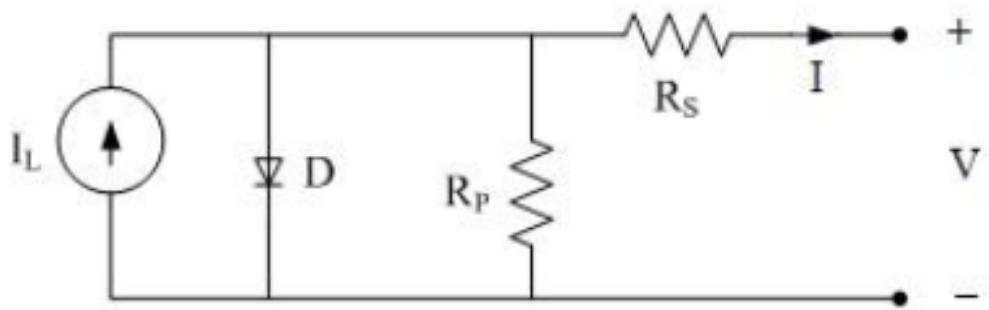
Figura 2 – Efeito fotovoltaico em uma célula.



Fonte: (SOUZA, 2017).

As células fotovoltaicas apresentam algumas características elétricas específicas, cuja análise é fundamental para suas aplicações; a sua modelagem, simplificada na forma linear, pode ser observada através da Figura 3.

Figura 3 – Modelagem de uma célula fotovoltaica

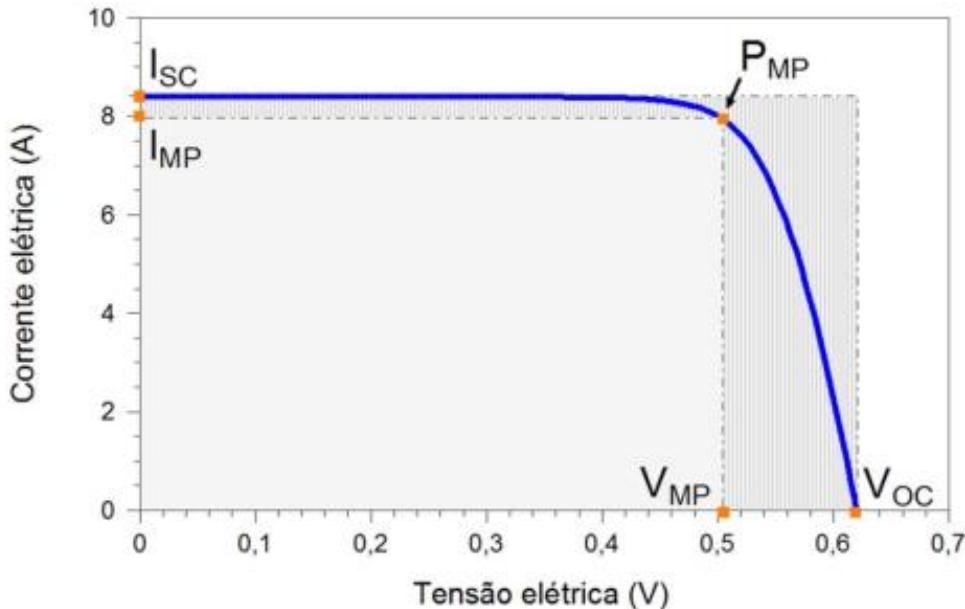


Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014).

A análise matemática equacional do modelo real de uma célula fotovoltaica se mostra demasiadamente complexa, sendo, na prática, observado o comportamento da célula através

da curva de corrente por tensão da célula; tal curva pode ser visualizada na figura 4.

Figura 4 – Curva de tensão x corrente de uma célula fotovoltaica



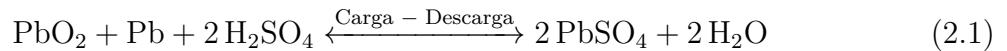
Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014).

A grandeza I_{sc} representa a corrente de curto-circuito da célula, ou seja, a máxima corrente que a célula pode fornecer, que ocorre quando os terminais da mesma estão curto-circuitados. O valor V_{oc} representa a tensão nos terminais quando os mesmos se encontram em aberto, e é a máxima tensão fornecida pela célula. Ao se observar a curva, pode-se concluir que, ao se aumentar a carga demasiadamente, a tensão fornecida nos terminais da célula tende a cair a partir de determinados valores de corrente. Tal fenômeno implica na não igualdade do valor de potência máxima fornecida ao produto de I_{sc} com V_{oc} ; observa-se, porém, a existência de um ponto de potência máxima, que fornece o valor de tensão necessário nos terminais da célula para que a máxima potência esteja disponível para a carga. Os valores V_{mp} e I_{mp} são os valores de tensão e corrente, respectivamente, em que ocorre a máxima transferência de potência (PINHO; GALDINO, 2014).

As informações apresentadas até o presente momento trataram do estudo de uma única célula fotovoltaica; entretanto, observa-se que uma célula sozinha, para a maioria das aplicações, não é o suficiente para suprir a potência demandada da carga. Para tal, são agrupadas várias células fotovoltaicas na forma de um painel fotovoltaico; diversas células são ligadas em série para que se obtenha uma tensão em seus terminais aplicável, assim como é feita a conexão em paralelo desses primeiros agrupamentos, para que se obtenha uma corrente de saída satisfatória para suprir as demandas da carga (PINHO; GALDINO, 2014).

2.2 Bateria de Chumbo-Acido

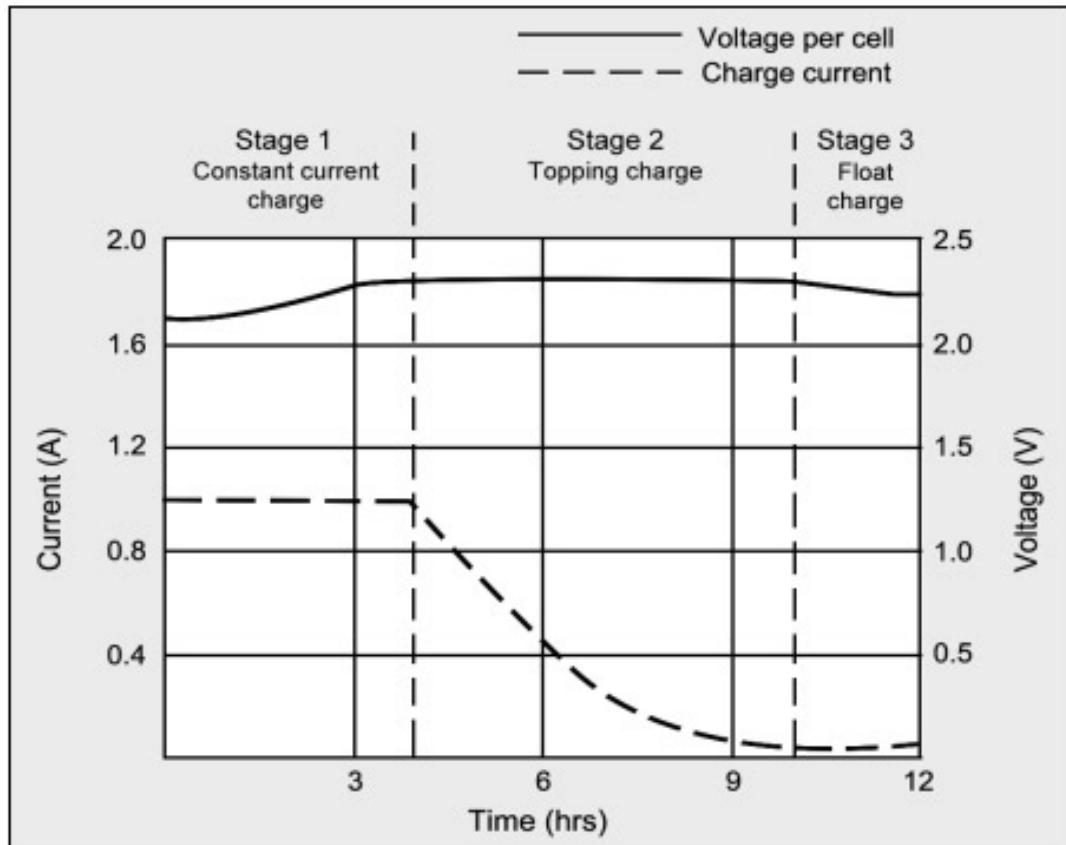
Baterias primárias (ou não-recarregáveis) são dispositivos que armazenam energia e não possuem a capacidade de serem recarregadas, sendo descartadas após o uso, enquanto baterias secundárias (ou recarregáveis) podem ser usadas novamente após o consumo total da energia previamente armazenada, através de um processo de carga que seja suficiente (CROMPTON, 2000, ix). Para a aplicação em estudo, serão utilizadas baterias recarregáveis de chumbo-ácido, pois as mesmas apresentam baixo custo, valor alto de tensão de saída, e uma vida útil relativamente alta, possuindo como desvantagem seu elevado peso (CROMPTON, 2000). O processo químico de carga e descarga de uma bateria de chumbo-ácido é demonstrado na equação 2.1.



Quando a bateria é recarregada, partículas de sulfato de chumbo (PbSO_4) são convertidas em chumbo (Pb) no eletrodo negativo e dióxido de chumbo (PbO_2) no eletrodo positivo pela corrente fornecida à bateria pela fonte que a carrega. No processo de descarga, ou seja, na alimentação do sistema pela bateria, ocorre o inverso: chumbo e dióxido de chumbo são convertidos em sulfato de chumbo, gerando uma corrente de elétrons que flui do terminal negativo para o positivo.

Existem várias formas de carregamento para uma bateria de chumbo-ácido; a mais eficiente é o chamado carregamento por corrente constante e tensão constante, em que uma tensão regulada é aplicada aos terminais da bateria, de forma que sua corrente de entrada seja constante, e após aproximadamente 70% da carga ter sido efetuada, uma tensão constante é aplicada, para finalizar o carregamento. Com a bateria completamente carregada, é aplicada uma tensão de flutuação, para impedir que a mesma descarregue devido a correntes de fuga (UNIVERSITY, 2017). A figura 5 ilustra tal processo.

Figura 5 – Curva de carregamento pelo método corrente constante e tensão constante



Stage 1: Voltage rises at constant current to V-peak.

Stage 2: Current drops; full charge is reached when current levels off

Stage 3: Voltage is lowered to float charge level

Fonte: (UNIVERSITY, 2017).

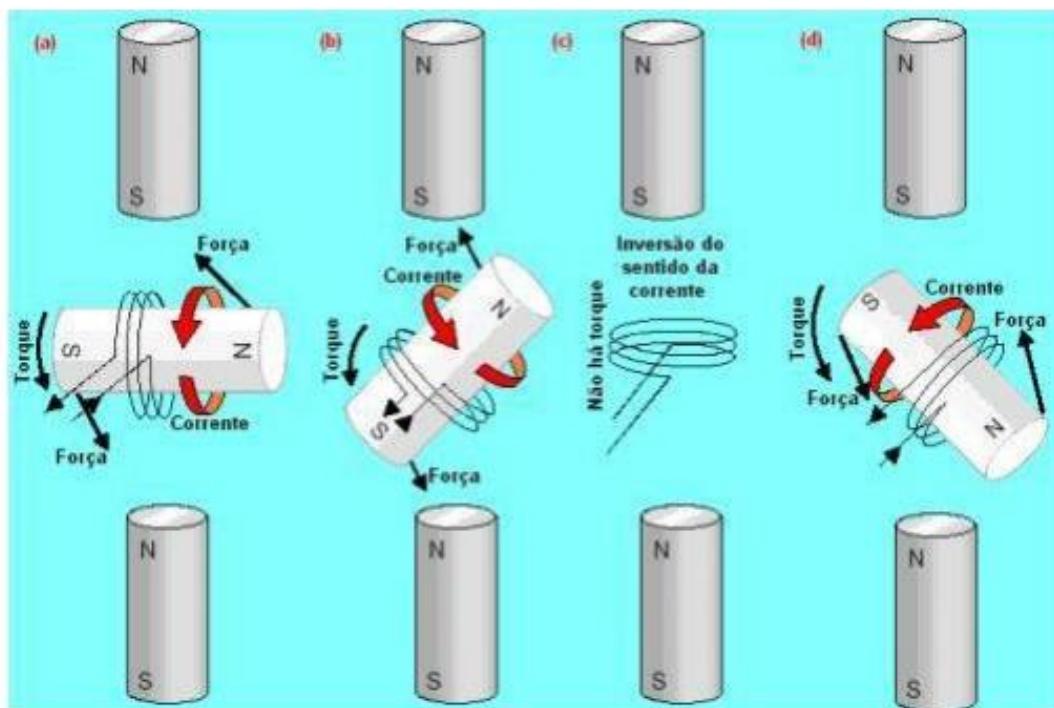
Entretanto, diversas formas de carregamento mais simples são aplicadas constantemente a baterias de chumbo-ácido, como a aplicação de tensão constante durante todo o processo, devido à facilidade de implementação desse método quando comparado ao citado acima (CROMPTON, 2000).

2.3 Motor de Corrente Contínua

Motores de corrente contínua (ou motores CC) são motores que utilizam uma fonte de energia elétrica, na forma de tensão contínua, para gerar potência rotativa mecânica (FITZ-GERALD; KINGSLEY; UMANS, 2005). O funcionamento básico de um motor CC se dá devido aos fenômenos eletromagnéticos; um corpo magnético fixo, chamado de estator, interage magneticamente com um corpo magnético fixo em um eixo, portanto livre para realizar um movimento de rotação, chamado de rotor. Devido às propriedades magnéticas

dos corpos, o rotor tende a alinhar seu polo norte com o polo sul do estator, realizando um movimento de rotação para tal. Após realizar o alinhamento, o rotor tende a permanecer na posição estabelecida até que haja uma mudança na dinâmica da interação com os campos; ao se modificar um dos campos, na direção desejada, haverá a continuação do movimento do rotor. Isso se dá através da modificação do campo do rotor, utilizando comutadores mecânicos conhecidos como escovas (SUFFERN, 1962). A Figura 6 ilustra o funcionamento básico de um motor de corrente contínua convencional de dois polos.

Figura 6 – Princípio Básico de funcionamento de um motor CC convencional



Fonte: (SIEMENS, 2006).

Motores de corrente contínua são utilizados para realizar a partida de motores de veículos a combustão interna; para essa aplicação, possuem dimensões reduzidas, pois têm a finalidade de funcionar por tempo limitado, e não em regime permanente, limitando assim sua capacidade de dissipação térmica. Uma demanda de tempo de funcionamento maior em um motor elétrico de partida de veículos a combustão interna sobrecarrega o dispositivo, e pode levar a danos irreversíveis ao mesmo, devido às reduzidas proporções quando comparados a motores de funcionamento contínuo de mesma potência. Por essa razão, motores produzidos com essa finalidade tendem a ser específicos para essa aplicação, sendo raros os casos em que se faz uso dos mesmos em outras situações.

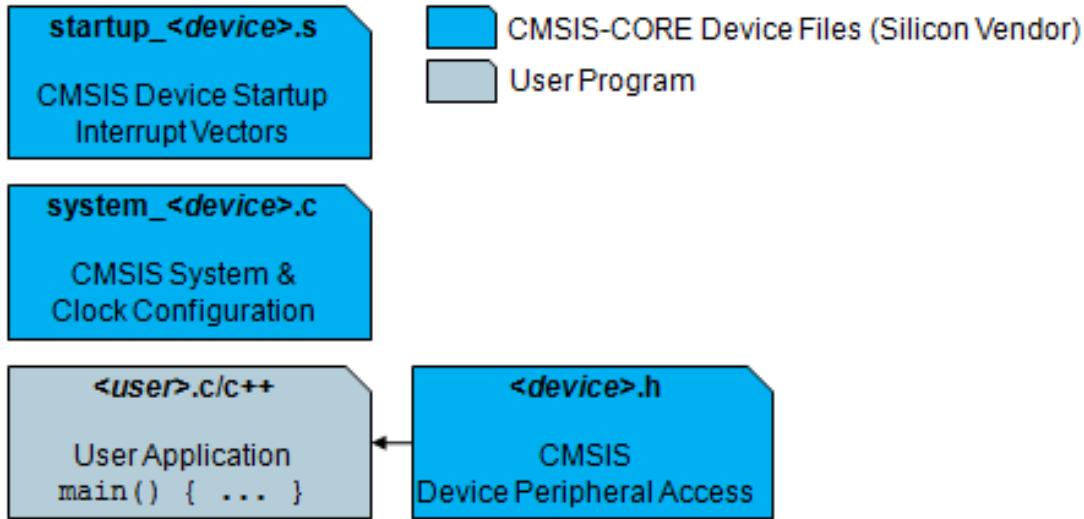
2.4 Padrão CMSIS

O padrão *CMSIS* (Padrão de Interface de *Software* para Microcontroladores *Cortex*, do inglês *Cortex Microcontroller Software Interface Standard*) é um padrão de camada de abstração para a linha de processadores com núcleos *Cortex-M* (braço de processadores com arquitetura *ARM* para aplicações em sistemas embarcados), desenvolvido pela *ARM* em cooperação com diversos fabricantes de microcontroladores; sua implementação se deu pela necessidade de se definir um padrão para programação de *firmware* dos microcontroladores baseados em arquitetura *ARM*, de modo que houvesse alguma portabilidade de desenvolvimento entre os diversos microcontroladores fabricados pelos variados produtores de *chips* de silício (ARM, 2017a). O padrão funciona como uma camada de abstração entre o desenvolvedor e o *hardware*, permitindo que a curva de aprendizado de desenvolvedores para novos microcontroladores seja reduzida (ARM, 2017a); todavia, não oferece abstração de alto nível para o desenvolvimento de aplicações, nem oferece definições para periféricos que compõem os microcontroladores de cada fabricante, ficando a cargo dos fabricante de *chips* e desenvolvedores a implementação de camadas superiores e a integração com os módulos periféricos adicionados pelos fabricantes.

O padrão *CMSIS* é compatível com as linguagens de programação *C* e *C++*, e utiliza os tipos de variáveis do padrão *ANSI C* definidos na biblioteca `<stdint.h>` (ARM, 2017a). É distribuído gratuitamente pela *ARM*, evitando que desenvolvedores se comprometam a utilizar as bibliotecas fornecidas pelos fabricantes de microcontroladores, que apesar de geralmente fornecerem um nível de abstração de programação maior, limitam o seu uso a dispositivos específicos, dificultando a portabilidade de aplicações para outros *chips*.

Para a utilização do padrão CMSIS, alguns arquivos são incluídos na aplicação embarcada. A figura 7 ilustra tais arquivos.

Figura 7 – Arquivos do padrão CMSIS



Fonte: (ARM, 2017b).

A seguir, são descritos os arquivos apresentados na figura 7:

- *startup_<device>.s*: arquivo que contém a inicialização do dispositivo, e é executado após o acionamento do mesmo; é responsável também por definir os vetores de interrupção do microcontrolador. É fornecido pelo fabricante do *chip*.
- *system_<device>.c*: executa as configurações de *clock* do processador, e também é fornecido pelo fabricante.
- *<user>.c/c++*: é código do usuário, que contém a função principal *main* e realiza as diversas funções definidas para a aplicação específica.
- *<device>.h*: arquivo principal de interação com o usuário; fornece acesso padronizado a registradores de periféricos, define funções de interrupção através de nomenclaturas específicas, define funções intrínsecas para instruções de *CPU*, entre outras funcionalidades.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo, serão descritos os procedimentos realizados para a execução do trabalho, bem como os recursos utilizados necessários para o desenvolvimento do mesmo. Serão detalhadas as estruturas de potência, tanto do armazenamento de energia do sistema, quanto do acionamento do motor, bem como será descrita a lógica de acionamento implementada, além do *hardware*, algoritmo de controle utilizados, e o ambiente de programação adotado.

3.1 Visão Geral do Funcionamento

O funcionamento do protótipo foi dividido em duas partes: o carregamento e a locomoção. Essas partes são definidas como modos de operação; os dois modos não podem ocorrer simultaneamente, pois a bateria deve ser carregada pelo painel solar ou estar disponível para fornecer energia ao motor, nunca as duas situações ao mesmo tempo. Dessa forma, a bateria ora se comporta como carga para o painel solar no modo “carregamento”, ora como fonte para o motor no modo “locomoção”. Esse intertravamento é realizado pelo *firmware* embarcado.

No modo “carregamento”, o sistema monitora a tensão de saída do painel, aplicando ou não uma tensão constante em seus terminais; essa prevenção foi implementada para impedir que níveis baixos de tensão de saída do painel fossem aplicados nos terminais da bateria. Foi, ainda, realizada a adição de um diodo, com a finalidade de se prevenir correntes reversas provindas do painel fotovoltaico aplicadas à bateria, devido à presença do diodo de corpo na estrutura dos *MOSFET*’s utilizados no acionamento, que permite a condução reversa. O método de carregamento escolhido foi o método de tensão de flutuação constante, e o mesmo se justifica para a aplicação, pois este método pode ser utilizado em aplicações em que a bateria se encontra sob processo constante de carga, e seu uso é efetuado de forma esporádica em momentos específicos (CROMPTON, 2000). Dessa forma, a bateria não se carrega em sua capacidade total (para uma dada tensão aplicada, a bateria satura após certo tempo de carga, anulando assim a corrente de entrada), o que prolonga sua vida útil, e seu descarregamento é evitado com a aplicação de tensão constante em seus terminais por tempo indeterminado.

O modo “locomoção” é caracterizado pela disponibilização da energia armazenada na bateria (durante o modo “carregamento”) ao motor, em função de um comando realizado pelo usuário. Ao ser solicitado, o sistema energiza o motor, durante apenas o tempo previamente estabelecido; após esse tempo, o sistema desativa de forma automática o motor, de modo a impedir o sobreaquecimento do mesmo. Ao ser solicitada a ativação

do motor, pelo usuário, durante o modo “carregamento”, o sistema não energiza o motor, visto que sua ativação deve ser exclusiva para o modo “locomoção”. O sistema também realiza o monitoramento periódico do nível de tensão disponível pela bateria no modo locomoção; o acionamento do motor só é possível se o nível de tensão nos terminais da bateria for satisfatório, havendo também um indicador visual que mostra se a bateria encontra-se inapta a ativar o motor devido a um nível de carga insuficiente, entre outros fatores.

Para facilitar o uso pelo usuário, bem como a identificação de problemas no desenvolvimento do projeto, foi desenvolvida uma codificação visual que evidencia o estado do sistema através de *LED's*:

- *LED* azul constantemente aceso: o sistema encontra-se no modo “carregamento”, com nível de tensão fornecido pelo painel solar satisfatório, e portanto, processo de carga habilitado.
- *LED's* azul e vermelho alternando-se: o sistema se encontra no modo “carregamento”, porém o painel solar está desconectado ou não fornece tensão suficiente nos seus terminais, fazendo com que o processo de carga seja desabilitado.
- *LED* verde constantemente aceso: o sistema encontra-se no modo “locomoção”, com nível de tensão fornecido pela bateria satisfatório, e portanto, acionamento do motor permitido ao comando do usuário.
- *LED's* verde e vermelho alternando-se: o sistema se encontra no modo “locomoção”, todavia, a bateria encontra-se desconectada do mesmo ou não fornece tensão suficiente nos seus terminais, fazendo com que o acionamento do motor não seja efetuado ao ser solicitado pelo usuário.

3.2 *Hardware*

A descrição do *hardware* necessário para a concepção do protótipo foi dividido da seguinte forma, de modo a facilitar a compreensão do desenvolvimento do mesmo: painel solar, bateria, motor de partida, placa de desenvolvimento, acionamento e placa confeccionada.

3.2.1 Bateria de Chumbo-Ácido

Para a escolha da bateria, foi determinado que a mesma deveria ser um modelo utilizado em sistemas elétricos de motocicletas; tal decisão se deu pelo fato das versões das baterias de chumbo-ácido para essa aplicação possuírem tamanho e peso reduzido, e a aplicação do projeto em questão não necessitar de uma capacidade de armazenamento elevada que seria fornecida por modelos utilizados em automóveis convencionais. O modelo de bateria adquirido foi o BTX3L-BS, do fabricante *Bosch*, com recurso financeiro fornecido pelo orientador do projeto Prof. Dr. Paulo José Mello Menegáz. O dispositivo adquirido tem capacidade de 3Ah e fornece a tensão padrão para baterias dessa categoria de 12 volts. A bateria escolhida pode ser visualizada na figura 8.

Figura 8 – Bateria adquirida



Fonte: (BOSCH, 2016).

3.2.2 Painel Solar

O painel solar adquirido foi o modelo YL150P-17b, fabricado pela empresa chinesa *Gain Solar* e comercializado no Brasil pela Solar Brasil, ambas as empresas especializadas em soluções fotovoltaicas, com recurso financeiro para a aquisição provindo do orientador do projeto, Prof. Dr. Paulo José Mello Menegáz. O painel é constituído de silício policristalino, e possui as seguintes dimensões: 1.47 metros de comprimento, 0.68 metro de altura e 0.025 metro de largura (SOLAR, 2016). A figura 9 apresenta os dados elétricos do painel fotovoltaico.

Figura 9 – Dados elétricos do painel fotovoltaico utilizado

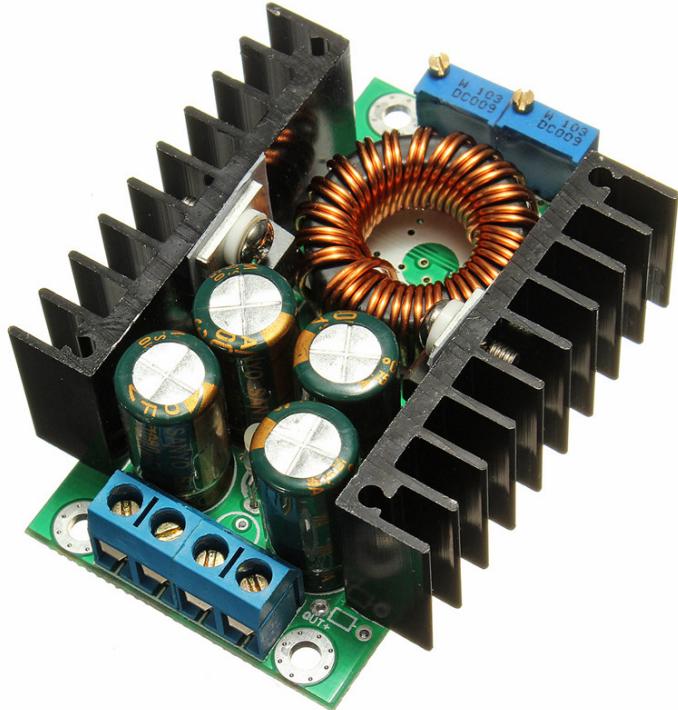
Parâmetros elétricos para as condições padrões (STC)			
Módulo			JS 150
Tipo de módulo			YLxxxP-17b
Potência de saída	P_{max}	W	150
Tolerância potência saída	ΔP_{max}	W	+/- 5
Eficiência módulo	η_m	%	15.0
Tensão em P_{max}	V_{mppt}	V	18.5
Corrente em P_{max}	I_{mppt}	A	8.12
Tensão em circuito aberto	V_{oc}	V	22.9
Corrente em curto-circuito	I_{sc}	A	8.61

Fonte: (SOLAR, 2016).

Como se pode observar, os valores de tensão de trabalho do painel vão de 18.5 a 22.9 volts; para se carregar a bateria, como se trata de um dispositivo de chumbo-ácido, tal tensão se mostra demasiadamente superior ao valor recomendado para baterias desse tipo aplicadas ao carregamento por tensão constante de aproximadamente 13.8 volts (CROMPTON, 2000). Para se contornar o problema, a solução encontrada foi a utilização de um conversor chaveado de tensão DC-DC *buck*, adquirido com recursos do autor, que opera a 300 KHz e tem a finalidade de reduzir a tensão fornecida pelo painel fotovoltaico para o valor estabelecido. O dispositivo recebe, como tensão de entrada, um valor que pode variar de 7 a 32 volts, e pode fornecer como saída um valor escolhido (através da regulagem de um de seus potenciômetros) de 0.8 a 28 volts, disponibilizando até 8 amperes de corrente para a carga (INSTRUMENTS, 2015). Para se obter o valor desejado aplicado na bateria, verificou-se empiricamente que o valor de saída do conversor deveria ser regulado para 14.8 volts.

A figura 10 ilustra o conversor adotado.

Figura 10 – Conversor DC-DC *buck* utilizado



Fonte: (INSTRUMENTS, 2015).

3.2.3 Motor de Partida

Para a escolha do motor, optou-se pela seleção de um motor de partida utilizado em motocicletas, devido ao fato de o mesmo ser concebido para trabalhar por um período curto de tempo, e não em regime permanente, pois é utilizado na partida dos motores a combustão de motocicletas, sendo logo desativado após a largada dos mesmos. Para a aplicação em questão, a decisão pela adoção desse tipo de máquina se mostrou ideal, pois o protótipo se propõe a iniciar o movimento do mesmo, dispensando assim o trabalho em regime. O motor escolhido foi o utilizado em motocicletas do modelo Honda Titan 160, adquirido com recurso do orientador do projeto, Prof Dr. José Paulo Mello Menegáz.

A figura 11 ilustra a máquina utilizada.

Figura 11 – Motor de partida utilizado



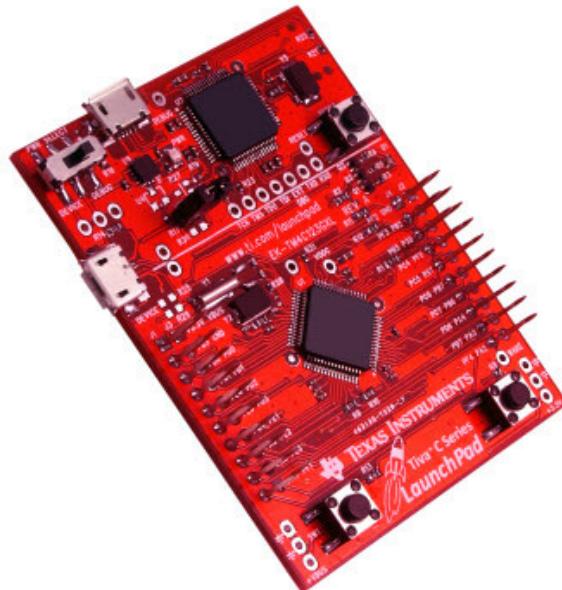
Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.4 Placa de Desenvolvimento

Na implementação do algoritmo de controle do sistema desenvolvido, optou-se pela utilização de um *launchpad* de desenvolvimento, pois esse tipo de ferramenta se mostra bastante eficaz na criação de protótipos que envolvem implementação embarcada. O modelo escolhido foi o *Tiva C TM4C123G*, que além de apresentar baixo custo, oferece uma excelente gama de recursos, entre eles *ICDI (In Circuit Debug Interface*, que facilita a programação do módulo, além de permitir a detecção de erros de forma mais eficiente através da interação com interfaces *desktop* via comunicação *USB*), 3 *LED's* e 2 botões (INSTRUMENTS, 2013a). O microcontrolador presente na placa é o ARM Cortex-M4F TM4C123GH6PM, um dispositivo baseado na arquitetura ARM, que possui, entre outros recursos, *clock* de 80 MHz, 256Kb de memória *flash* e 32Kb de memória *SRAM*, além de contar, entre seus periféricos, com 8 módulos *UART*, 43 portas *GPIO*, 12 canais *ADC* e 12 *timers* (INSTRUMENTS, 2013b).

O módulo adotado pode ser visualizado na figura 12.

Figura 12 – Kit de desenvolvimento *Tiva C TM4C123G*



Fonte: (INSTRUMENTS, 2016).

O dispositivo utiliza uma alimentação *USB* de 5 volts. Para se obter essa tensão, a partir da tensão de trabalho do sistema (12 volts), foi utilizado um módulo conversor *DC-DC*, adquirido com recurso do autor, com saída *USB* de 5 volts; dessa forma, foi possível a alimentação do *kit* de desenvolvimento de forma adequada. A figura 13 ilustra o conversor utilizado.

Figura 13 – Módulo conversor *DC-DC* utilizado na alimentação do *kit* de desenvolvimento *Tiva C TM4C123G*

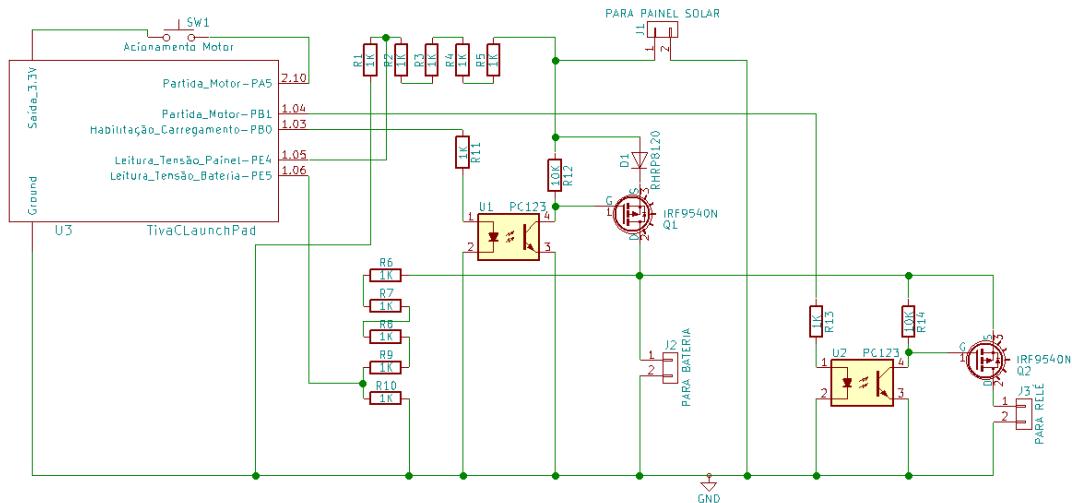


Fonte: Próprio autor.

3.2.5 Acionamento

Para os acionamentos das diversas partes do projeto que envolvem correntes elevadas, foi necessária a implementação de um circuito que fosse capaz de acionar tanto a transferência de energia do painel fotovoltaico para a bateria, quanto da bateria para o motor de partida, trabalhando com a tensão de 3.3 volts fornecida pelas saídas do microcontrolador (INSTRUMENTS, 2013b). O *layout* do circuito pode ser visualizado a seguir na figura 14, produzida através do *software open source* KiCad.

Figura 14 – *Layout* do circuito de acionamento desenvolvido



Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 14 mostra o acionamento de forma simplificada, com apenas os pinos utilizados da placa de desenvolvimento sendo representados. Foram utilizados 2 optoacopladores modelo pc123 (com a finalidade de isolar o circuito de potência das portas do microcontrolador) que acionam dois *MOSFET*'s de canal P. A escolha desse tipo de *MOSFET* se deu devido à necessidade de os acionamentos serem realizados através da conexão positiva, para que todos os componentes do circuito se encontrassem no mesmo referencial; caso contrário, ao serem utilizados *MOSFET*'s canal N, os acionamentos necessitariam de ser realizados pela conexão negativa da alimentação, impedindo que todos os componentes se encontrassem no mesmo referencial e inviabilizando a utilização dos módulos conversores analógico-digital do microcontrolador, que utiliza a referência da alimentação do mesmo como referência para suas conversões.

Para o acionamento do motor, além dos recursos mencionados, foi necessária a aquisição de um relé eletromecânico de partida, utilizado no acionamento de motores elétricos de partida em motocicletas, devido ao alto consumo de corrente dos mesmos. O modelo escolhido foi o 35850-KCN-003 (adquirido com recurso do autor), produzido pela empresa brasileira *Magnetron*, e suporta até 15 amperes de corrente, sendo compatível com a

motocicleta Honda Titan 160 (modelo com a qual o motor de partida também é compatível) (MAGNETRON, 2017). O relé funciona como a maioria dos componentes de sua categoria: ao ser aplicada uma tensão em sua bobina (que no presente caso deve ser a tensão de trabalho da bateria de 12 volts), uma chave que liga dois contatos é acionada, provocando o curto-círcuito entre os mesmos. O relé adotado pode ser visualizado na figura 15.

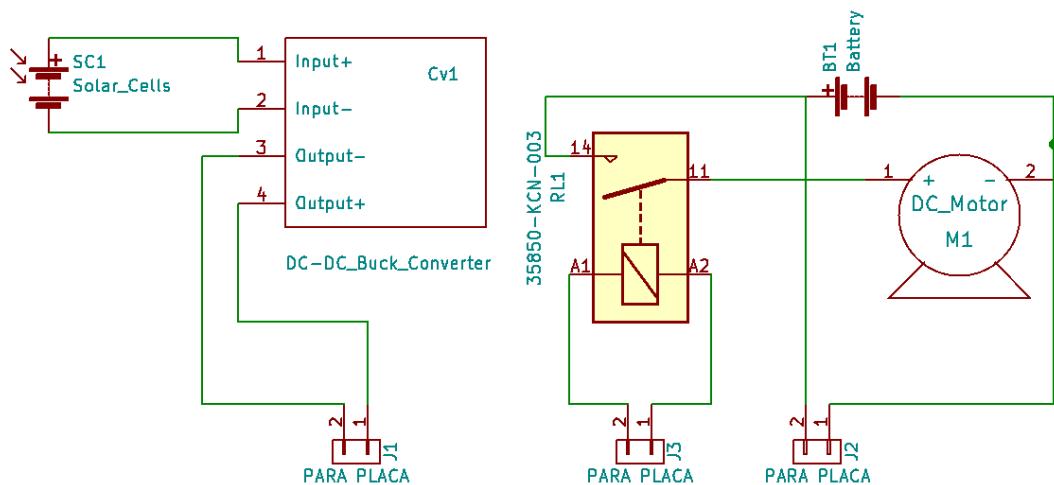
Figura 15 – Relé de partida 35850-KCN-003



Fonte: (MAGNETRON, 2017).

Alguns componentes não foram representados na figura 14, para facilitar a representação do circuito completo. A figura 16 ilustra a bateria, o conjunto painel solar com o conversor DC-DC *buck*, o motor de partida e o relé de acionamento do mesmo. A conexão com o circuito da figura 14 pode ser inferida através dos conectores J1, J2 e J3.

Figura 16 – Layout do circuito de acionamento desenvolvido (externo)



Fonte: Produção do próprio autor.

Como as figuras 14 e 16 ilustram, o carregamento da bateria pelo painel fotovoltaico é realizado através do *MOSFET* Q1, que por sua vez é acionado pela saída PB0 do microcontrolador, através do optoacoplador U1. O acionamento do motor é realizado de forma semelhante: o microcontrolador, através da porta PB1, satura o optoacoplador U2, que aciona o *MOSFET* Q2; este, por sua vez, energiza o relé RL1, realizando assim a partida do motor.

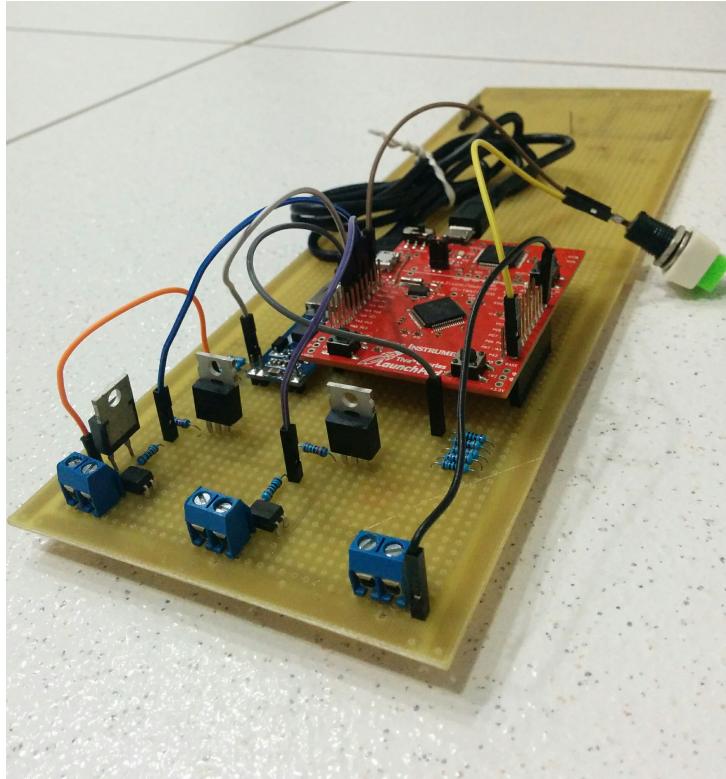
Além dos acionamentos acima descritos, o circuito conta ainda com 2 conjuntos de 5 resistores de valor $1\text{ k}\Omega$, que têm a finalidade de tornar as tensões fornecidas pelo painel e pela bateria mensuráveis dentro do valor máximo permitido pelo microcontrolador, que é de 3.3 volts (INSTRUMENTS, 2013b). Tais valores de resistência foram definidos empiricamente; optou-se, inicialmente, por valores de resistências maiores, a fim de minimizar a fuga de corrente provocada pela criação de um ramo em paralelo. Todavia, verificou-se que para tais valores o circuito *ADC* do microcontrolador comportava-se como um curto, pois apresentava impedância muito inferior aos valores adotados, viabilizando assim apenas a adoção de valores menores de resistores.

3.2.6 Placa Confeccionada

Para implementação do protótipo, foi elaborada uma placa com o circuito ilustrado na figura 14. Utilizou-se uma placa ilhada de prototipagem, sendo as ligações realizadas com solda de estanho em estado líquido, de forma manual.

A figura 17 mostra a placa desenvolvida.

Figura 17 – Placa desenvolvida



Fonte: Produção do próprio autor.

Como se pode observar, 3 conectores foram fixados à placa para que fossem feitas as ligações do circuito com o painel solar (através do conversor chaveado *buck*), a bateria, e o relé de acionamento do motor de partida.

3.3 Algoritmo e *Firmware*

O detalhamento do processo de programação envolvido no desenvolvimento do protótipo será dividido da seguinte forma, para facilitar a compreensão do mesmo: ambiente de programação, funcionamento geral, bibliotecas desenvolvidas e algoritmo implementado.

3.3.1 Ambiente de Programação

Para o desenvolvimento do *firmware* embarcado, foi necessária a utilização de uma plataforma de programação que atendesse às necessidades do projeto. Entre essas necessidades, destacam-se: *open source software*, compatibilidade com o padrão *CMSIS* e eficiência na gravação de *firmware's* embarcados.

O sistema operacional utilizado, instalado em computadores do autor, foi o *Linux Mint* (nas versões 18 *Sarah* e 18.2 *Sonya*), devido à preferência pessoal do autor pela plataforma; o sistema é baseado nos sistemas *Debian* e *Ubuntu*, fazendo com que compartilhe o mesmo repositório de pacotes. Além disso, o sistema operacional apresenta uma interface simples, enquanto fornece ferramentas que tornam o trabalho de desenvolvimento mais eficiente (MINT, 2006).

Para o processo de compilação, foi adotado o compilador *GNU ARM Embedded Tool-chain*, desenvolvido pela *ARM*, que é baseado no famoso *GCC* e voltado para aplicações embarcadas com processadores *ARM* (ARM, 2017c).

Uma vez compilado, o programa necessita ser gravado no microcontrolador. Para essa tarefa, foi adotado o programa *lm4flash*; o *software* foi, inicialmente, desenvolvido para placas de desenvolvimento do modelo *Stellaris*, que é a versão anterior do *launchpad Tiva C* utilizado, porém devido à equivalência das duas placas em todos os aspectos, o programa é utilizado em qualquer um dos 2 dispositivos.

Para facilitar o versionamento do *firmware* desenvolvido, foi utilizada a ferramenta de controle de versão *Git*, juntamente com o *GitHub* (repositório de código *online* integrado com a plataforma *Git*) e a versão gratuita do *GitKraken* (interface gráfica para versionamento *Git*). Essas ferramentas se mostraram extremamente úteis no desenvolvimento do *firmware*, pois permitiram o versionamento de forma prática do mesmo, possibilitando, por exemplo, que uma versão antiga de código fosse recuperada de forma simples se assim fosse necessário.

Optou-se pela abstenção do uso de uma *IDE*, tendo em vista a utilização de *software's* livres e o aprendizado sobre desenvolvimento embarcado adquirido através do uso das ferramentas citadas.

3.3.2 Funcionamento Geral

O *firmware* implementado foi desenvolvido para funcionar de forma a reduzir o consumo energético da unidade de controle. Para tal, optou-se por modificar a frequência de *clock* do processador para 20Mhz, através da modificação do arquivo de inicialização fornecido pelo fabricante (*system_TM4C123.c*). Além disso, o código foi desenvolvido para funcionar em “*sleep mode*”; todas as atividades realizadas pelo microcontrolador são executadas por interrupções, enquanto o mesmo executa seu código principal apenas no início do programa, a fim de realizar as inicializações. Dessa forma, o consumo energético é reduzido significativamente, pois o microcontrolador não fica em constante estado de processamento, realizando tarefas apenas quando solicitado pelas interrupções.

3.3.3 Bibliotecas Desenvolvidas

Para a correta implementação do *firmware* embarcado, foram desenvolvidas diversas bibliotecas utilizando o padrão *CMSIS*. A utilização do padrão se faz presente na nomenclatura de funções específicas e nomes de registradores, bem como na inicialização padrão do dispositivo. Cada biblioteca é composta por um arquivo com extensão .h (que contém as definições utilizadas na biblioteca, bem como a inclusão de outras bibliotecas necessárias para seu uso) e um arquivo .c (contendo a implementação das funções da biblioteca). Cada biblioteca contém uma função específica que tem a finalidade de retornar o endereço do registrador do módulo periférico específico utilizado (por exemplo, módulo *timer 3*) utilizando um parâmetro de entrada definido na chamada da função pelo usuário; tal função é utilizada pelas demais funções da biblioteca de forma a encapsular o endereçamento dos periféricos. A seguir, as bibliotecas desenvolvidas são detalhadas.

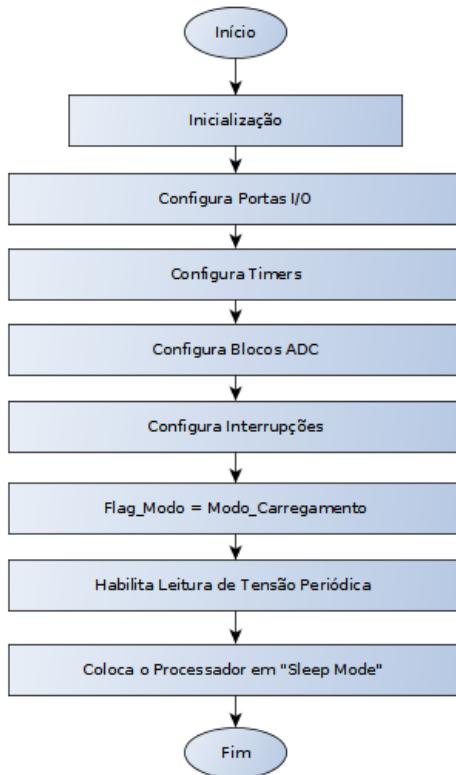
- *GPIO (General Purpose Input/Output)*: Biblioteca que é responsável pela configuração de parâmetros dos pinos de entrada e saída do microcontrolador utilizados como *GPIO* (Saídas e Entradas de Uso Geral), como interrupções e definição do sentido de dados, bem como a leitura e a escrita de valores digitais nos mesmos.
- *Timers*: Contém funções responsáveis pelas configurações dos módulos contadores de tempo, como tempo de contagem, habilitação de interrupções e eventos de *trigger*, bem como habilitação e desabilitação dos módulos.
- *ADC (Analog to Digital Converter)*: Responsável pela configuração dos módulos conversores de sinais analógicos em valores digitais, definindo parâmetros como geração de interrupções e evento de *trigger*, bem como leitura dos valores gerados, início de conversão, habilitação e desabilitação dos módulos.
- *UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)*: Biblioteca gerada para a detecção de erros, não estando presente na implementação final, com a finalidade de se poupar energia. Utiliza parâmetros definidos pela arquitetura *UART* (Receptor/Transmissor Assíncrono Universal) para permitir uma comunicação com outros dispositivos. No caso do projeto desenvolvido, foi utilizado o *hardware* de *debug* presente na placa de desenvolvimento, que realiza a interface da comunicação *UART* efetuada no microcontrolador com uma conexão *USB*, que por sua vez é conectada a um computador. Dessa forma, foi possível a impressão de caracteres e frases em tela, facilitando assim a detecção de erros durante o desenvolvimento.

3.3.4 Algoritmo Implementado

Como descrito anteriormente, o *firmware* embarcado funciona, após a inicialização do microcontrolador, no modo de baixo consumo de energia; a execução de instruções se dá apenas no tratamento das interrupções geradas externamente pelo usuário, por eventos de *timeout* de *timers*, e por conversões finalizadas pelos módulos *ADC*. A seguir, é feita a descrição das funções implementadas para o tratamento de tais interrupções, bem como a função principal, que inicializa e configura o dispositivo. Para a ilustração dos fluxogramas que demonstram as funções do algoritmo, utilizou-se o *software yEd*, ferramenta gratuita de confecção de diagramas.

- Função “*main*”: Função responsável pela inicialização do sistema, habilita e configura as portas *GPIO*, os blocos de *timers*, conversores analógico-digital e interrupções. Após essa execução, inicializa o modo de operação como modo “carregamento”, atualizando a *flag* utilizada para sinalização entre as diversas funções. Em seguida, habilita a tensão de leitura periódica, para logo após colocar o processador em “*sleep mode*”. A figura 18 ilustra a função.

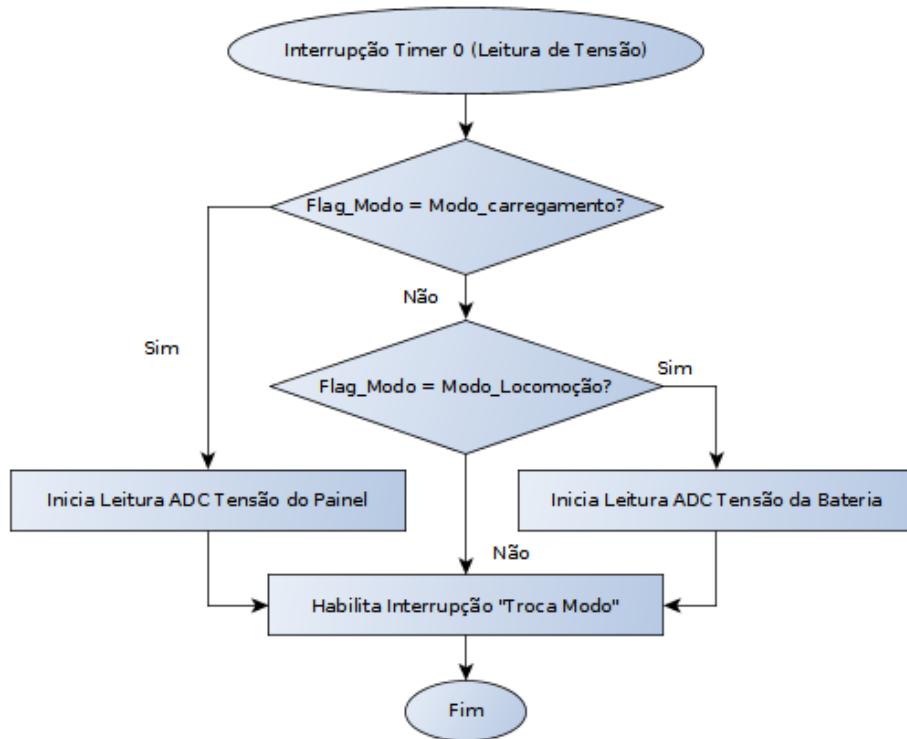
Figura 18 – Função *main*



Fonte: Produção do próprio autor.

- Função “Leitura de Tensão”: É executada a cada 1 segundo por um módulo *timer*; tem a finalidade de realizar a leitura analógico-digital de tensão do painel solar se o sistema se encontra no modo “carregamento”, ou dos terminais da bateria se o mesmo encontra-se no modo “locomoção”. Em seguida, a interrupção externa “Troc Modo” é habilitada; isso se faz necessário para que a mesma possa ser habilitada periodicamente, sendo a razão de a mesma ser desabilitada explicada adiante. A figura 19 ilustra o algoritmo.

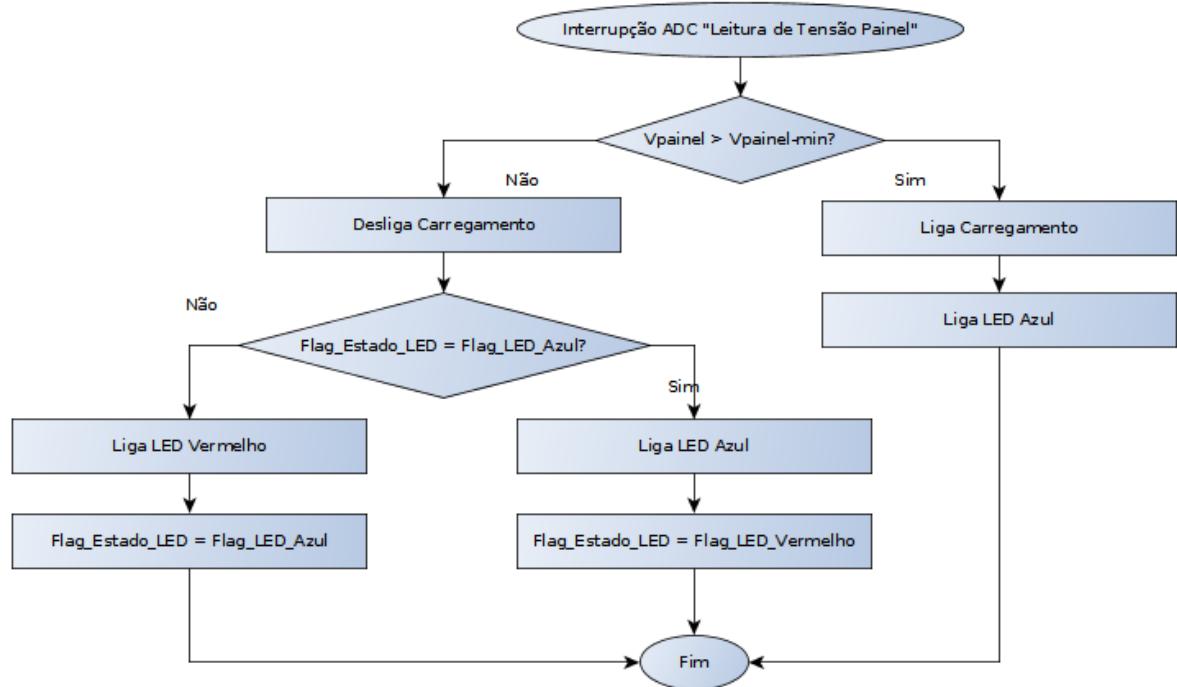
Figura 19 – Função “Leitura de Tensão”



Fonte: Produção do próprio autor.

- Função “Leitura de Tensão Painel”: Executada após o término da leitura *ADC* da tensão fornecida pelo painel solar, inicializada pela função “Leitura de Tensão” se o dispositivo se encontra no modo “carregamento”; o valor lido é comparado ao valor estabelecido como limite mínimo permitido para o carregamento (14.4 volts), sendo o carregamento e o *LED* azul acionados caso a tensão seja suficiente. Caso o nível de tensão lido não seja satisfatório, o carregamento é desabilitado e o *LED* azul ou vermelho é acionado, dependendo do valor da *flag*, que também é invertida para que a próxima chamada da função possa ativar o outro *LED*, gerando assim a alternância que indica o baixo nível de tensão do painel fotovoltaico. A figura 20 ilustra a função.

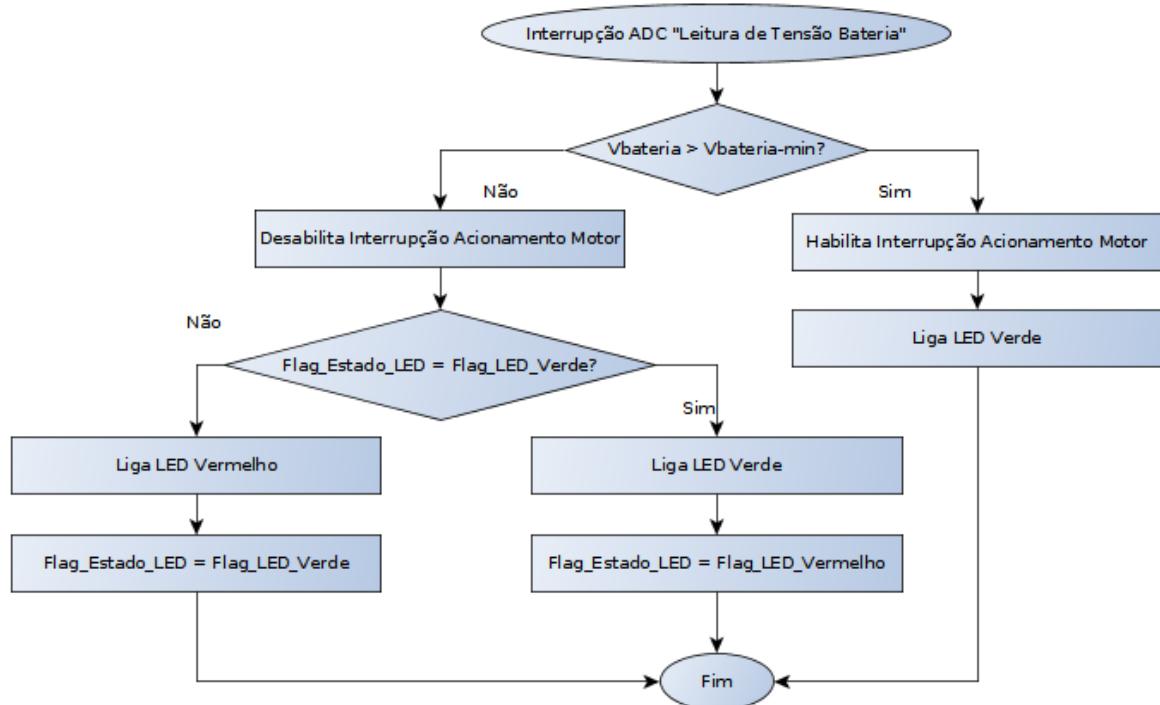
Figura 20 – Função “Leitura de Tensão Painel”



Fonte: Produção do próprio autor.

- Função “Leitura de Tensão Bateria”: Função que é chamada após o término da leitura *ADC* da tensão fornecida pelos terminais da bateria, inicializada pela função “Leitura de Tensão” se o dispositivo se encontra no modo “locomoção”. Funciona de forma semelhante à função “Leitura de Tensão Painel”: é feita a verificação do nível de tensão da bateria, habilitando a interrupção externa de acionamento do motor se a mesma for suficiente (12 volts). Caso contrário, a interrupção é desabilitada, e é executado o algoritmo de alternância dos *LED’s* verde e vermelho, para que haja o indicativo visual de insuficiência de carga. A figura 21 ilustra a função.

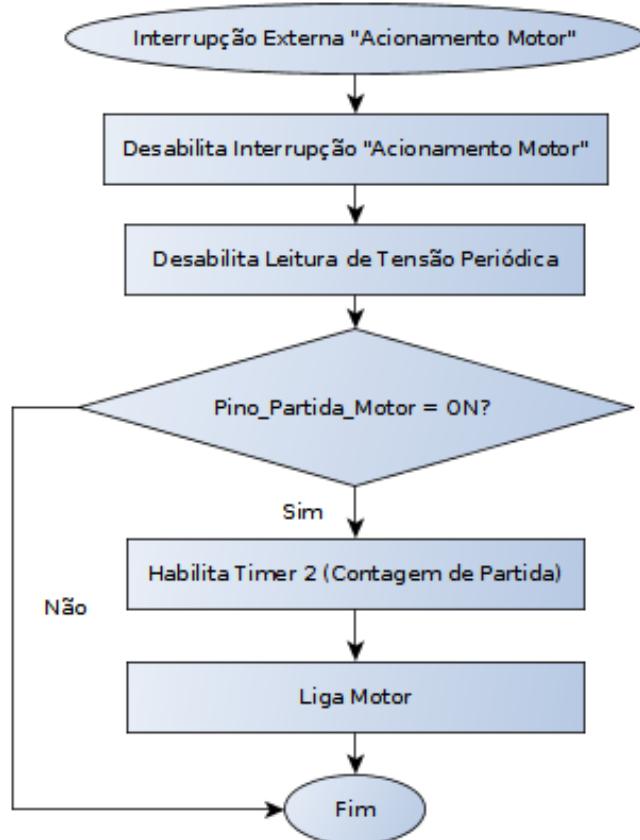
Figura 21 – Função “Leitura de Tensão Bateria”



Fonte: Produção do próprio autor.

- Função “Acionamento Motor”: Executada a pedido externo do usuário através de um botão ligado ao pino correspondente, quando o mesmo solicita o acionamento do motor de partida e a interrupção foi habilitada pela função “Leitura de Tensão Bateria”. Logo ao ser executada, a função desabilita a interrupção; tal medida é adotada como tratamento *debounce* para o sistema, devido à natureza mecânica do botão utilizado no acionamento (a interrupção é novamente habilitada, pela função “Leitura de Tensão Bateria”, ao se verificar nível suficiente de tensão na bateria). Em seguida, a leitura periódica de tensão é desabilitada (desabilitando a interrupção gerada pelo *timer* responsável), evitando assim que o microcontrolador execute a função “Leitura de Tensão”, de forma a prevenir conflitos de execução. É feita, então, a verificação de acionamento do pino específico; isso se faz necessário devido ao fato de o microcontrolador tratar as interrupções externas por porta, e não por pinos específicos, fazendo com que a verificação *in function* específica para o pino seja necessária. Após a verificação, o motor é ativado, através da alimentação do relé de partida; inicia-se, então, o *timer* de contagem de partida, que tem a finalidade de desligar o motor após o tempo definido de 0.5 segundo. A figura 22 ilustra a função descrita.

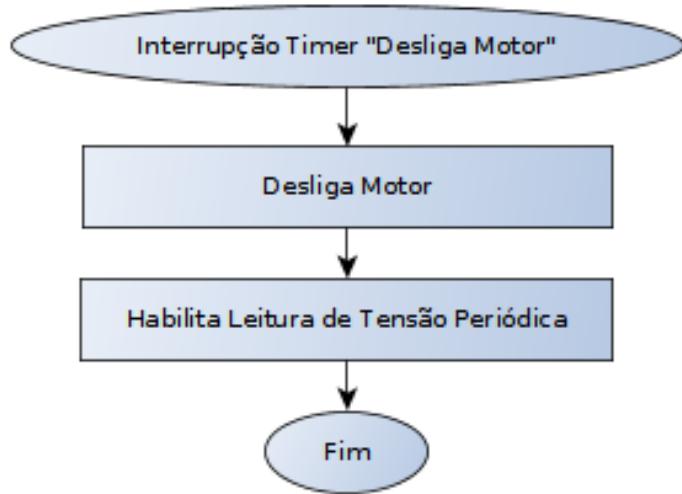
Figura 22 – Função “Acionamento Motor”



Fonte: Produção do próprio autor.

- Função “Desliga Motor”: Função que tem como finalidade desativar o motor de partida, executada após o evento de *time out*, de 0.5 segundo, do contador responsável. Antes de seu término, executa a reabilitação da leitura periódica de tensão, desativada no acionamento do motor. A figura 23 ilustra a função acima descrita.

Figura 23 – Função “Desliga Motor”

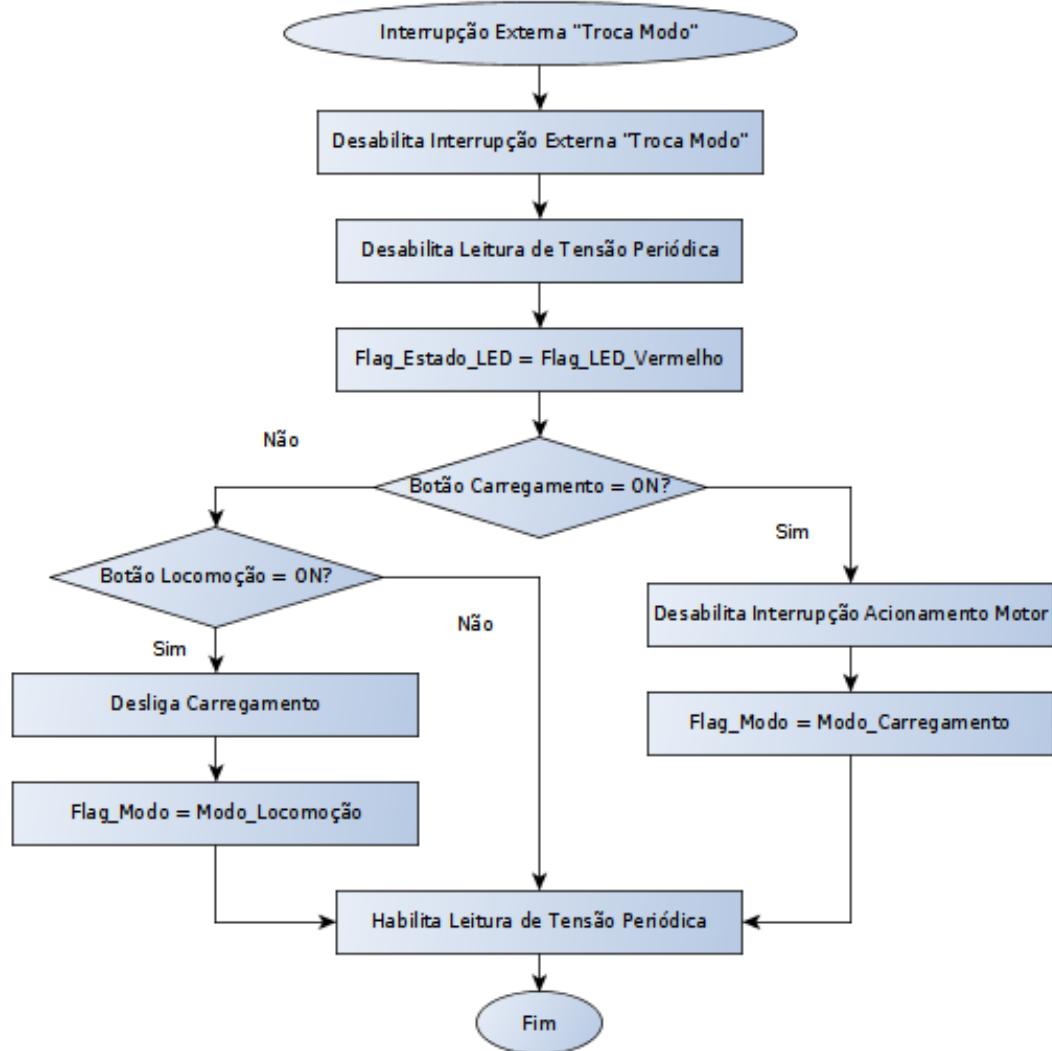


Fonte: Produção do próprio autor.

- Função “Troca Modo”: Executada através de pedido externo do usuário, utilizando os 2 botões disponíveis no *launchpad*, essa função tem a finalidade de trocar o modo de operação do sistema. Ao ser executada, desabilita a interrupção das portas utilizadas; dessa forma, evita-se o *bounce* mecânico (a interrupção é novamente habilitada pela função periódica “Leitura de Tensão”). Em seguida, a leitura de tensão periódica é desabilitada, e a *flag* indicadora do *LED* a ser aceso em casos de níveis de tensão insuficientes, tanto no modo “carregamento” quanto no modo “locomoção”, é definida como “vermelho”; dessa forma, ao se realizar a troca do modo de operação, o acendimento do *LED* vermelho indicará de imediato a situação de nível baixo de tensão, caso essa seja a atual situação, não sendo necessária a espera de 1 segundo para tal constatação. Logo após, é feita a verificação de qual botão foi pressionado, ou seja, qual modo foi solicitado; ambos os botões são conectados na mesma porta, fazendo com que o tratamento da interrupção seja realizado pela mesma função e provocando a necessidade de tal verificação. Após a verificação, por medida de segurança, é feito o desligamento do carregamento (caso o modo solicitado seja “locomoção”) ou a desabilitação do motor (caso o modo solicitado seja “carregamento”), e realizada a devida atribuição do valor correspondente ao modo para a *flag*, que é utilizada na função “Leitura de Tensão”. Por fim, a função habilita novamente a leitura de tensão periódica.

A figura 24 ilustra a execução descrita acima.

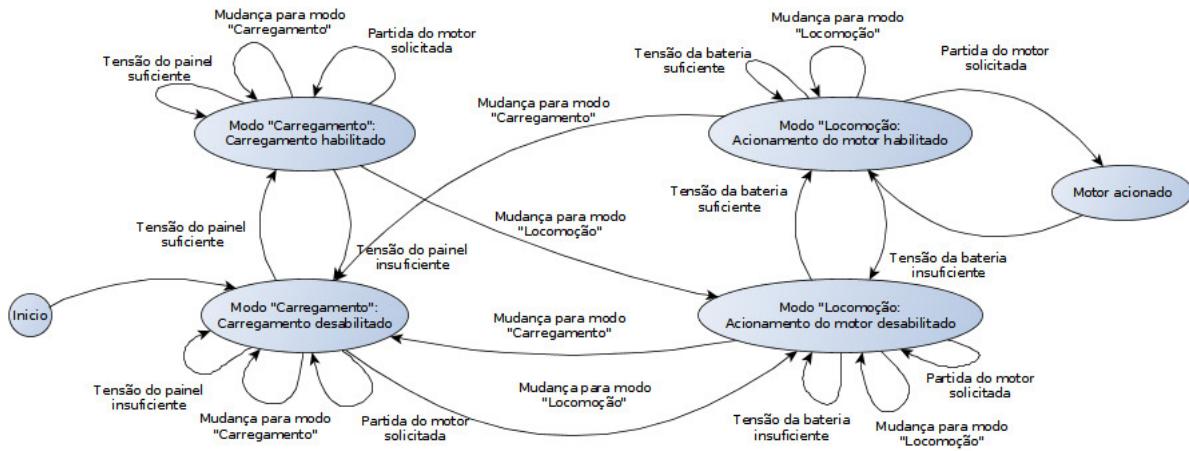
Figura 24 – Função “Troca Modo”



Fonte: Produção do próprio autor.

A seguir, um diagrama de estados que representa o funcionamento do algoritmo é ilustrado na figura 25.

Figura 25 – Diagrama de estados do sistema



Fonte: Produção do próprio autor.

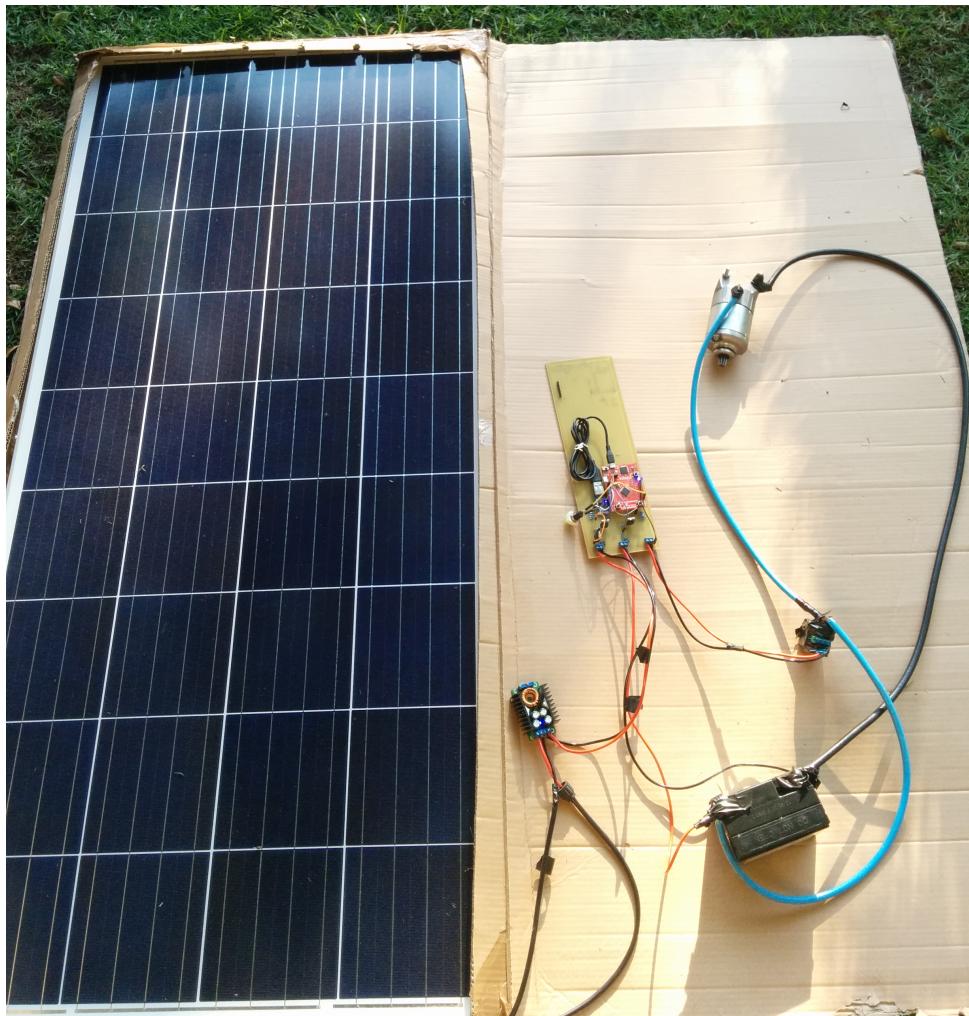
4 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Este capítulo tem como finalidade relatar os resultados alcançados e as conclusões obtidas ao término do projeto executado, bem como a análise de possíveis trabalhos, envolvendo o protótipo desenvolvido, a serem realizados no futuro.

4.1 Resultados

Ao final do desenvolvimento do trabalho implementado, foi realizada a montagem do sistema a ser acoplado em um triciclo. Após a confecção, foram realizados alguns testes, dentre os quais destacam-se pela sua importância o teste de carregamento da bateria pelo painel e o teste do acionamento do motor pela bateria. O protótipo do sistema desenvolvido pode ser visualizado na figura 26.

Figura 26 – Protótipo do sistema desenvolvido



Fonte: Produção do próprio autor.

Para testar o carregamento, o conjunto, no modo “carregamento”, foi submetido à exposição

a luz solar, com o *LED* indicador de carregamento sendo observado, bem como a tensão aplicada à bateria através de um multímetro. Foi feita a constatação de que sistema carregava a bateria quando exposto à luz solar, sendo o processo verificado até mesmo com o painel não sendo exposto diretamente à irradiação do sol; verificou-se que o processo de carregamento foi efetuado até o horário de 16 horas e 30 minutos aproximadamente, do dia 22/07/2017, com o conjunto exposto à sombra. Ao se bloquear totalmente a chegada de luz ao painel fotovoltaico, tapando-se por completo o mesmo, foi realizada a constatação da abertura do circuito de carga pelo microcontrolador, bem como o acionamento do indicador visual de tensão baixa nos terminais do painel. A tentativa de acionamento do motor no modo “carregamento” não provocou o acionamento do mesmo, como esperado. Não foi possível estabelecer um tempo de carga da bateria pelo sistema, devido à carência de uma forma de medição do estado de carga da bateria.

Na verificação de funcionamento do circuito de acionamento do motor, com o modo “locomoção” selecionado para o sistema, foi verificada a correta energização da máquina, através do relé de partida, pela placa confeccionada; o motor é ativado durante o tempo programado estabelecido no algoritmo, após o qual é desativado e volta ao estado de repouso. Foi constatado também que não há carregamento da bateria pelo painel nesse modo, como foi estabelecido para o projeto.

Além da verificação do correto funcionamento dos dois modos, também foi realizada a troca dos modos de operação, sendo tanto a troca do modo “carregamento” para o modo “locomoção”, quanto o contrário, efetuadas com sucesso.

Não foi possível a integração do sistema desenvolvido a um triciclo; a adaptação do motor a uma corrente de tração utilizada nesse tipo de veículo demonstrou requerer um serviço especializado, que consiste na fabricação de uma peça adaptativa entre o eixo do motor e a corrente, e apesar de tal serviço não requerer um investimento financeiro alto, não houve tempo hábil para se realizar o estudo, procura de fabricante e encomenda da peça, bem como todo o processo de adaptação do restante do sistema ao triciclo (fixação do motor, do painel e da bateria, passagem de fios e de cabos, etc), devido ao curto prazo estabelecido para a entrega do projeto.

4.2 Conclusões

Com os resultados obtidos, foi possível se chegar a algumas conclusões, bem como citar algumas dificuldades encontradas no desenvolvimento do projeto.

4.2.1 Dificuldades Encontradas

Durante o desenvolvimento do projeto, foram encontradas várias dificuldades, sendo as principais citadas abaixo.

- Aquisição de componentes e partes utilizados: Devido à natureza de construção física do projeto, no desenvolvimento do mesmo foram utilizadas várias partes de *hardware*. Algumas dessas peças apresentam custo elevado; é o caso, por exemplo, do painel solar, da bateria e do motor de partida elétrico (todos esses componentes foram adquiridos com recurso do orientador do projeto, Prof. Dr. José Paulo Mello Menegáz, permitindo a execução do projeto), e, enquanto outras apresentam custo relativo menor do que as citadas anteriormente (*MOSFET's*, relé de partida, cabos, etc), representaram um investimento significativo por parte do autor. Além disso, a maioria dos componentes foi adquirida *online*, o que faz com que a efetiva posse dos mesmos seja retardada, fator que atrasa significativamente o andamento de um projeto que depende tão fortemente desses componentes, que é o caso corrente.
- Dificuldade de aquisição de dados técnicos de alguns componentes: Para o dimensionamento do sistema, ao se buscar por especificações dos componentes utilizados em sistemas elétricos de motocicletas (bateria de chumbo-ácido, relé e motor de partida), encontrou-se certa dificuldade na aquisição de tais dados; a maioria das informações disponíveis se referia à compatibilidade do componente em questão com modelos de motocicletas, devido à finalidade do produto, e não informações como corrente elétrica máxima suportada e torque máximo fornecido (para o caso do motor de partida), por exemplo.
- Utilização de ambiente de programação gratuito: Na preparação do ambiente de desenvolvimento do *firmware* embarcado, ao se optar por ferramentas gratuitas e que não dependessem de algum fabricante específico, foi necessário um estudo aprofundado de tais ferramentas, tendo sido criado um *shell script* com a finalidade de preparar um ambiente *Linux* para o desenvolvimento no microcontrolador adotado, utilizando o padrão *CMSIS*.
- Realização de testes dependente do clima: Ao se aproximar a conclusão do projeto, em meados dos meses de Junho e Julho de 2017, o protótipo foi alcançando sua concretização, se tornando cada vez mais apto a testes de campo; todavia, infelizmente,

essa época correspondeu ao inverno, período que no ano em questão se mostrou particularmente chuvoso, limitando assim a quantidade de testes realizados.

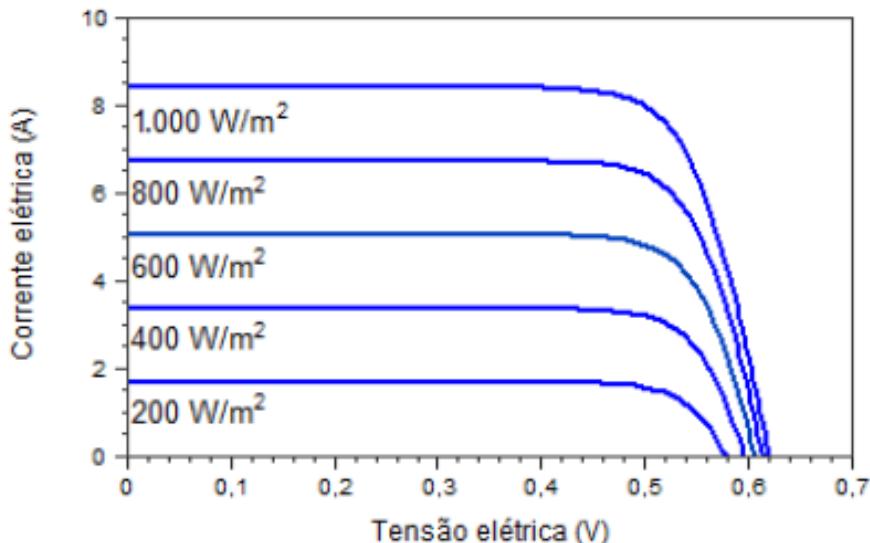
4.2.2 Conclusões Finais

Com a finalização do protótipo, constatou-se que o mesmo cumpriu alguns objetivos propostos para o sistema, dentro das diretrizes estabelecidas. Foi possível a implementação de um protótipo a ser acoplado em um triciclo, que é capaz de armazenar energia em uma bateria através da captação solar, e alimentar um motor de partida, esse último tendo a finalidade de tirar o conjunto do estado inercial de repouso, através dessa energia armazenada. Foi possível, também, o controle dos processos de carga e de acionamento do motor de forma digital, utilizando-se um microcontrolador que foi programado através de um padrão de código *open source* utilizando soluções embarcadas de baixo custo.

No processo de carregamento, verificou-se que o método escolhido foi suficiente para se realizar a carga da bateria; a aplicação de tensão de flutuação constante nos terminais da bateria, por um período suficientemente longo, foi capaz de oferecer carga para o dispositivo de forma a satisfazer as necessidades do sistema. Verificou-se, também, que a potência máxima fornecida pelo painel solar de 150 watts (SOLAR, 2016) excedeu a taxa máxima que a bateria possui de absorver energia (para qualquer tipo de bateria, deve-se limitar a corrente de entrada); mesmo quando não exposto diretamente à luz solar, o painel fotovoltaico gerava tensão e corrente suficientes em seus terminais para carregar a bateria (dada uma carga inicial estabelecida, onde a corrente solicitada não foi a corrente inicial de carregamento) evidenciando assim que para o método adotado de carregamento, o ponto de operação na curva corrente por tensão do painel solar se encontra na parte linear de tensão aproximadamente constante com variação da corrente solicitada (região abaixo do “joelho” da curva), provocando assim um constante fornecimento de corrente à carga mesmo com a diminuição da irradiação solar sobre o painel fotovoltaico.

A figura 27 ilustra esse comportamento para uma única célula fotovoltaica.

Figura 27 – Curvas tensão x corrente de uma célula fotovoltaica para diferentes valores de irradiação



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014).

Durante o funcionamento do modo “locomoção”, verificou-se que, dado um nível de tensão satisfatório de tensão dos terminais da bateria lido pelo sistema, ao ser solicitado, pelo usuário, o acionamento do motor, este era devidamente acionado, sendo desenergizado após o tempo programado (0.5 segundo) pelo *firmware* embarcado.

Foi constatada também a verificação da funcionalidade do método de verificação de tensão, tanto do painel fotovoltaico quanto da bateria; ambas as leituras, realizadas com a simples adição de divisores resistivos de tensão em paralelo com os níveis a serem medidos, se mostraram suficientes na detecção de níveis baixos de tensão tanto no painel quanto na bateria, evitando assim a aplicação desses níveis na bateria e no motor de partida, além de fornecer o indicativo visual que evidencia sua ocorrência.

Infelizmente, não foi possível a integração do sistema desenvolvido com um triciclo, sendo essa meta proposta não alcançada com a conclusão do projeto, devido ao tempo escasso. Esse objetivo, porém, demonstra-se como algo facilmente realizável; a fabricação da peça adaptativa necessária pode ser feita sem grandes dificuldades por profissionais especializados, bem como a fixação dos componentes do sistema no triciclo pode ser efetuada de forma simples (triciclos de passeio geralmente possuem tetos, onde seria possível a alocação do painel). Todavia, a maior dificuldade que se julga poder encontrar reside no torque gerado pelo motor de partida possivelmente não ser suficiente para tirar o veículo do seu estado inercial de repouso; tal problema poderia ser facilmente contornado

com a adição de sistemas de transmissão de torque, semelhante aos utilizados nas marchas de bicicletas, com a finalidade de se reduzir a velocidade e aumentar o torque aplicado à corrente do triciclo.

O desenvolvimento do projeto produziu resultados satisfatórios, de forma sumária.

5 TRABALHOS FUTUROS

Com a conclusão do projeto, algumas atividades de desenvolvimento complementares foram definidas como futuras possíveis implementações. Tais atividades são listadas abaixo.

- Integração do sistema a um triciclo: Como descrito anteriormente, a integração do protótipo desenvolvido a um triciclo pode ser realizada, sendo realizadas as devidas adaptações necessárias, de forma a se obter um veículo funcional na assistência de seu uso por pessoas com limitações de força nos membros inferiores.
- Utilização de um conjunto fotovoltaico de menor potência: O painel fotovoltaico utilizado demonstrou-se super-dimensionado, sendo a sua seleção feita devido à escassez de opções no mercado. Com a utilização de um painel de menor potência, ou mesmo um conjunto de pequenos painéis, pode-se reduzir de maneira significativa o peso do sistema, diminuindo o esforço de locomoção; todavia, ao se utilizar um conjunto fotovoltaico de menor potência, o uso de um controlador de carga pode se fazer necessário, a fim de se ajustar o ponto de operação para o ponto de potência máxima, dependendo da potência máxima fornecida pelo painel adotado.
- Aprimoramento do sistema de monitoramento: Um aperfeiçoamento da parte responsável pelo monitoramento pode ser efetuado, ao se integrar uma leitura de corrente para a detecção da situação de carga da bateria durante o carregamento.
- Solicitação automática de acionamento do motor de partida: Ao se implementar uma forma de detecção automática de movimento, o sistema seria capaz de realizar o deslocamento inicial de forma instantânea através da tentativa de movimento do usuário, dispensando assim o acionamento do botão por parte do mesmo. Tal implementação poderia ser feita por meio da utilização de um *encoder*, que enviaria um sinal ao microcontrolador na ocorrência de movimento inicial realizado pelo usuário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARM. *CMSIS: Introduction*. 2017. Disponível em: <<https://www.keil.com/doc/CMSIS/General/html/index.html>>. Acesso em: 18-07-2017. Citado na página 22.
- ARM. *CMSIS: Using CMSIS in Embedded Applications*. 2017. Disponível em: <http://www.keil.com/doc/CMSIS/Core/html/using_pg.html>. Acesso em: 18-07-2017. Citado na página 23.
- ARM. *GNU ARM Embedded Toolchain*: Pre-built gnu toolchain for arm cortex-m and cortex-r processors. 2017. Disponível em: <<https://developer.arm.com/open-source/gnu-toolchain/gnu-rm>>. Acesso em: 23-07-2017. Citado na página 35.
- BOLTON, O. *Electrical bicycle*. Google Patents, 1895. US Patent 552,271. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US552271>>. Citado na página 10.
- BOSCH. *Bosch Canal da Peça: BATERIA DE MOTO - BTX3L-BS - Bosch - 0092M68010 - Unitário*. 2016. Disponível em: <<https://bosch.canaldapeca.com.br/p/1770932/bateria-de-moto-btx3l-bs-bosch-0092m68010-unitario?loja=escap-online>>. Acesso em: 19-07-2017. Citado na página 26.
- CROMPTON, T. R. *Battery Reference Book*. [S.l.]: Newnes, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 24 e 27.
- EVOVELO. *evovelo*. 2004. Disponível em: <<http://www.evovelo.com>>. Acesso em: 17-07-2017. Citado na página 11.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas*. [S.l.]: Bookman, 2005. Citado na página 20.
- HERLIHY, D. V. *Bycicle THE HISTORY*. [S.l.]: Yale University Press, 2004. Citado na página 10.
- INSTRUMENTS, T. *Tiva C Series TM4C123G LaunchPad Evaluation Board*: User's guide. [S.l.], 2013. Citado na página 29.
- INSTRUMENTS, T. *Tiva TM TM4C123GH6PM Microcontroller*: Datasheet. [S.l.], 2013. Citado 3 vezes nas páginas 29, 31 e 33.
- INSTRUMENTS, T. *Wholesale Price C-D C CC CV Buck Converter Step-down Power Module 7-32V to 0.8-28V 12A 300W On-board laptop power supply Module*. 2015. Disponível em: <https://www.aliexpress.com/store/product/Wholesale-Price-C-D-C-CC-CV-Buck-Converter-Step-down-Power-Module-7-32V-to-1523130_32624431930.html?spm=2114.12010608.0.0.CXgl31>. Acesso em: 21-07-2017. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- INSTRUMENTS, T. *ARM® Cortex®-M4F Based MCU TM4C123G LaunchPad™ Evaluation Kit*. 2016. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/ek-tm4c123gxl#TechnicalDocuments>>. Acesso em: 21-07-2017. Citado na página 30.

- MAGNETRON. *RELÉ DE PARTIDA – FUSÍVEL 15A*: Ref. 90280490 / cÓd. 35850-kcn-000. 2017. Disponível em: <<http://www.magnetron.com.br/motopecas/rele-de-partida-fusivel-15a-4/>>. Acesso em: 18-07-2017. Citado na página 32.
- MINT, L. *About Linux Mint*. 2006. Disponível em: <<https://www.linuxmint.com/about.php>>. Acesso em: 23-07-2017. Citado na página 35.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. [S.l.]: GTES, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 15, 16, 17, 18 e 49.
- SIEMENS. *Motores de Corrente Contínua: guia rápido para uma especificação precisa*. [S.l.]: Siemens, 2006. Citado na página 21.
- SILVA, G. *Radiação Solar e Produção da Energia Fotovoltaica*. 2013. Disponível em: <<http://radiacao-solar.blogspot.com.br/2013/11/sol-o-nosso-protagonista.html>>. Acesso em: 18-07-2017. Citado na página 16.
- SOLAR, G. *JS 150 Series*: Yl150p-17b. [S.l.], 2016. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 48.
- SOUZA, R. di. *Célula Fotovoltaica – O Guia Técnico Absolutamente Completo*. 2017. Disponível em: <<http://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>>. Acesso em: 18-07-2017. Citado na página 17.
- SUFFERN, M. G. *Basic Electrical and Electronic Principles*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1962. Citado na página 21.
- TRANSIT organic. *organic transit*. 2004. Disponível em: <<https://organictransit.com/>>. Acesso em: 17-07-2017. Citado na página 11.
- TURNER, J. *A Brief History of Electric Bikes*. 2013. Disponível em: <<https://optibike.com/brief-history-electric-bikes/?v=19d3326f3137>>. Acesso em: 16-07-2017. Citado na página 10.
- UNIVERSITY, B. *Charging Lad-Acid*. 2017. Disponível em: <http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_the_lead_acid_battery>. Acesso em: 18-07-2017. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

Apêndices

Link's, disponíveis *online*, dos códigos implementados:

- *Link* do *shell script* desenvolvido para a preparação do ambiente de programação do *firmware*: <<https://github.com/Pedrohgv/Initial-setup-for-Stellaris-and-Tiva-boards.git>>.
- *Link* das bibliotecas geradas em CMSIS para a confecção do código: <<https://github.com/Pedrohgv/CMSIS-Library-for-Stellaris-and-Tiva-Boards.git>>.
- *Link* do código implementado: <<https://github.com/Pedrohgv/Triciclo.git>>.