



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

NATANEA CAROLINE GUIMARÃES

**TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR DE CARGA
DE BATERIA COM APLICAÇÃO EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

ARAXÁ/MG

2016

NATANEA CAROLINE GUIMARÃES

**TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR DE CARGA
DE BATERIA COM APLICAÇÃO EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Henrique José Avelar

ARAXÁ/MG

2016



Serviço Público Federal
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL/ ARAXÁ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC – ATA DE DEFESA

ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL da aluna *Natânea Caroline Guimarães*

Às 16h do dia 04 de agosto de 2016, reuniu-se, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG/ Unidade Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **Desenvolvimento de um Controlador de Carga de Bateria com Aplicação em Painéis Fotovoltaicos** como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Engenheiro de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Dr. Henrique José Avelar, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra à candidata para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa da candidata. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença da candidata e do público, para julgamento e expedição do resultado final.

Após a reunião da Banca Avaliadora, a candidata foi considerada: APROVADA Com nota final de: 88 / 100.

O resultado final foi comunicado publicamente à candidata pelo Presidente da Comissão. A aluna abaixo-assinado declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que as mesmas identifiquem claramente a fonte original, explicitando as autorizações obtidas dos respectivos autores, quando necessárias. Declara ainda, neste âmbito, não estar a violar direitos de terceiros.

Natânea Caroline Guimarães
Nome da aluna

Natânea Caroline Guimarães
assinatura/

Araxá, 04 de agosto de 2016.
local e data

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Araxá, 04 de Agosto de 2016.

Henrique José Avelar
Prof. Dr. Henrique José Avelar (Orientador)

Wanderley Alves Parreira
Prof. Dr. Wanderley Alves Parreira

Paulo de Azevedo Soave
Prof. Dr. Paulo de Azevedo Soave

DEDICO ESTE TRABALHO

*Aos meus pais, à minha irmã e à minha sobrinha ,
que sempre me fizeram acreditar na realização dos meus sonhos e me deram todo o apoio
para que eu pudesse realizá-los.*

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e por iluminar os meus caminhos com a presença de pessoas tão especiais. Por me dar forças para vencer os momentos difíceis; coragem para continuar superando as dificuldades e paciência para não me entregar ao desânimo diante das minhas fraquezas.

Aos meus pais, Edna e Norberto, que sempre me deram uma boa educação e uma base para ir à luta e conquistar o meu espaço. Sempre me ensinaram que tudo tem o seu valor e a sua hora e que com esforço, paciência, honestidade e humildade eu posso conquistar os meus sonhos.

À minha irmã, Alessandra, que sempre está ao meu lado, sendo o meu anjo da guarda e me protegendo de tudo o que me faz mal.

À minha sobrinha, Ana Antônia, que me ensina o que é o amor puro todos os dias e que é minha fonte de inspiração para correr atrás dos meus objetivos.

Às minhas amigas, Nayara e Liliane, que sempre estiveram comigo e me ajudaram muito nessa jornada.

Ao meu orientador, Henrique que me ajuda e me ensina sempre, desde o projeto da extensão até o TCC, com paciência, dedicação e maestria.

Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.

Charles Chaplin

RESUMO

Nos últimos anos a população mundial está sofrendo com impactos ambientais devido à poluição causada principalmente pela emissão de dióxido de carbono, resultado da combustão de recursos não renováveis. Uma das principais causas desses impactos ambientais é a geração de energia por meio de fontes não renováveis, incluindo a energia elétrica obtida através de combustíveis fósseis, tais como petróleo e carvão mineral. No Brasil a energia elétrica é gerada, em sua maioria, por hidrelétricas que, mesmo sendo uma matriz renovável, ainda trazem grande impacto ambiental com a construção de barragens. Com isso, a necessidade de se pesquisar tecnologias para a geração de energia renovável é cada vez maior, com destaque para a energia fotovoltaica. Para baratear o custo do sistema fotovoltaico é preciso investir no melhoramento de seus componentes e equipamentos acessórios, de forma a reduzir a necessidade de manutenção. Dentro deste contexto, este trabalho de conclusão de curso consiste em estudar e construir um controlador de carga que proteja a bateria do sistema fotovoltaico de danos, como sobrecarga ou descarga total, a fim de se obter um maior aproveitamento energético, fornecendo a máxima potência dos painéis para a recarregar a bateria, através da aplicação da técnica de rastreamento do ponto máximo de potência (MPPT) e do controle da corrente de carga da bateria.

Palavras-chave: Controlador de carga. Energia fotovoltaica. MPPT.

ABSTRACT

In the last years, the world population is suffering environmental impacts due to pollution mainly caused by carbon dioxide emissions, resulted by the combustion of pollutants resources. One of the main causes of this environmental impact is the use of nonrenewable sources for the energy generation, including energy obtained from fossil fuels such as crude oil and coal. Hydropower is the largest renewable energy source for electricity generation in Brazil, but even though brings great environmental impact by the construction of dams. Thus, currently is increasing the need of technology research for renewable energy generation, especially the photovoltaic. To lower the photovoltaic system cost, investments for improving its components or equipment in order to reduce the maintenance need are necessary. Therefore, this completion of coursework research aims to study and build a charge controller that protects the photovoltaic system battery of damages such as overload or complete discharge, in order to achieve a greater energy use, by providing panels maximum power for battery recharging and by applying the maximum power point tracking technique (MPPT) and control of the battery charging current.

Keywords: Charge controller. Photovoltaic energy. MPPT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de geração fotovoltaica de energia elétrica	17
Figura 2: Bateria estacionária	18
Figura 3: Características da potência e da corrente pela tensão de um módulo fotovoltaico com diferentes irradiâncias	19
Figura 4: Configuração básica de um sistema fotovoltaico.....	21
Figura 5: Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado em série.	21
Figura 6: Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado em paralelo	22
Figura 7: Sistema Híbrido com geração de energia solar e eólica	23
Figura 8: Sistema conectado à rede elétrica	23
Figura 9: Célula fotovoltaica de silício cristalino.....	24
Figura 10: Efeito da conexão de células em série (a) e em paralelo (b).....	25
Figura 11: Curva típica de potência versus tensão para uma célula solar	25
Figura 12: Modelo eletrônico da célula fotovoltaica.....	27
Figura 13: Curva de corrente e tensão nas três regiões da bateria de chumbo-ácido	29
Figura 14: Conversor em série	30
Figura 15: Conversor em paralelo (shunt).....	30
Figura 16: Arquitetura básica do conversor CC-CC	31
Figura 17: Modulação por largura de pulso (PWM)	32
Figura 18: Topologia do conversor Buck	32
Figura 19: Curvas obtidas das duas etapas de operação do Conversor Buck.....	33

Figura 20: Conversor Buck em modo de operação contínuo e descontínuo	34
Figura 23: Modo de operação contínuo e descontínuo do conversor Boost.....	36
Figura 24: Topologia do conversor Buck/Boost	37
Figura 25: Etapas de operação do conversor Buck/Boost	38
Figura 26: Modo de operação contínuo e descontínuo do conversor Buck/Boost	38
Figura 27: Indutor com elementos a dimensionar	39
Figura 28: Circuito magnético equivalente do núcleo.....	40
Figura 29: Polarização e simbologia do MOSFET.....	41
Figura 30: Diagrama de blocos do controle PID.	42
Figura 31: (a) Gráfico das curvas $e(t)$ e $u(t)$ que mostram sinal de controle não nulo quando o sinal de erro atuante é zero (controle integral); (b) gráfico das curvas $e(t)$ e $u(t)$ que mostram sinal de controle zero quando o sinal de erro atuante é zero	43
Figura 32: Eficiência dos métodos de MPPT	44
Figura 33: Fluxograma do Método P&O.....	45
Figura 34: Arduino UNO.....	46
Figura 35: Pinagem ATmega328 usado no Arduino UNO	47
Figura 36: Painel fotovoltaico Kyocera 80W Policristalino.....	48
Figura 37: Especificações técnicas do painel fotovoltaico Kyocera	49
Figura 38: Bateria Multitoc	49
Figura 39: Diagrama representativo do sistema	50
Figura 41: Gráfico gerado na simulação do conversor Buck no software PSIM	52
Figura 42: Simulação da placa do conversor Buck no ISIS - Proteus.....	53

Figura 43: Desenho do ARES - Proteus para circuito impresso.....	53
Figura 44: Circuito impresso do conversor Buck.....	54
Figura 45: Placa do conversor Buck.....	54
Figura 46: Indutor utilizado de 400 μ H.....	55
Figura 47: sensor de efeito hall.....	55
Figura 48: Simulação PSIM	56
Figura 49: Oscilação do sistema com amplitude constante.....	57
Figura 50: Fluxograma do método P&O	58
Figura 51: Circuito para completa simulação do sistema.....	58
Figura 52: Fluxograma método P&O e proteção da bateria.....	59
Figura 53: Arduino UNO simulado do ISIS – Proteus.....	60
Figura 54: Phase and Frequency correct PWM.....	61
Figura 55: Simulação PSIM do controlador de carga com frequência de 20kHz.....	64
Figura 56 - Simulação PSIM do controlador de carga com frequência de 8kHz	65
Figura 57: Simulação 1 do conversor no ISIS-Proteus.....	65
Figura 58: Simulação 2 do conversor no ISIS-Proteus.....	66
Figura 59: Simulação 3 do conversor no ISIS-Proteus.....	67
Figura 60: Zoom da Simulação 3 (perturbe) do conversor no ISIS-Proteus	67
Figura 61: Zoom da Simulação 3 (observe) do conversor no ISIS-Proteus	68
Figura 62: Teste 1- controlador de carga.....	69
Figura 63: Teste 2 do controlador de carga	69

Figura 64: Teste 3 do controlador de carga	70
Figura 65: Teste 4 do controlador de carga	70
Figura 66: Teste 5 do controlador de carga	71
Figura 67: Teste 6 - Gráfico plotado no MATLAB.....	71

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1: Rendimento elétrico dos vários tipos de células fotovoltaicas	16
Tabela 2: Vida útil da bateria em função da descarga	18
Tabela 3: Características Elétricas de um painel fotovoltaico de 80W	26
Tabela 4: Especificações Técnicas do painel fotovoltaico com irradiação máxima	49
Tabela 5: Parâmetros para a sintonia do PID	56
Tabela 6: Tensão medida no conversor e Tensão convertida no Arduino.....	63
Tabela 7: Corrente medida no conversor e Corrente convertida no arduino.....	63
Quadro 1: Comparativo entre as ações de controle	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Filtro capacitivo
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
fs	Frequência
G	Ganho estático
I _{cc}	Corrente de curto-circuito
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
L	Indutor
MOSFET	Transistor de efeito de campo
MPP	Ponto de máxima Potência
MPPT	Rastreamento de Máxima Potência
P&O	Perturbe e observe
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
P _{máx}	Potência máxima
R _{pm}	Resistência em paralelo
R _{sm}	Resistência em série.
t _{on}	Tempo de condução do transistor
V _e	Tensão fixa na entrada
V _{oc}	Tensão de Circuito Aberto
V _s	Tensão variável na saída

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	O sistema fotovoltaico	21
2.2	O painel solar.....	24
2.3	O armazenamento de carga.....	27
2.4	Controladores de carga	29
2.5	Topologia do conversor CC-CC.....	31
2.6	Conversor Buck	32
2.7	Conversor <i>Boost</i>	35
2.8	Conversor <i>Buck/Boost</i>	37
2.9	O Indutor	39
2.10	Os Transistores de Efeito de Campo	41
2.11	O Controle PID.....	41
2.12	Rastreamentos da Máxima Potência de Pico (MPPT).....	44
2.13	O método Perturbe e Observe.....	44
2.14	O Arduino	45
3	METODOLOGIA.....	48
3.1	O sistema de controle	50
3.2	Escolha, dimensionamento e montagem do conversor <i>Buck</i>	50
3.3	O Controle PID.....	55
3.4	O Método Perturbe e Observe do MPPT.....	57
3.5	A programação do Arduino	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	Simulações.....	64
4.2	Testes práticos	68
5	CONCLUSÕES.....	72
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICE A – Programação do controlador de carga do arduino.....	75
	APÊNDICE B – Programação de envio de dados pela serial do arduino uno.....	84

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica no mundo, em sua maioria, é gerada através de combustíveis fósseis, tais como carvão, petróleo e gás natural, que, com a combustão, emitem gases poluentes, como o dióxido de carbono, além de não serem fontes de energia renovável. A combustão desses combustíveis causa mudanças climáticas em nível global e provocam o efeito estufa. No Brasil, a fonte de energia elétrica mais utilizada é a gerada por hidrelétricas, que é resultado da força potencial criada pelo curso das águas e pelos desníveis dos rios. Essa energia é transformada em energia mecânica, girando turbinas que são acopladas no gerador, transformando a energia mecânica em energia elétrica. Mas, mesmo sendo renovável e não poluente, essa fonte de energia gera grande impacto ambiental e custo muito elevado com a construção de barragens.

Em virtude de todas as desvantagens da geração de energia elétrica com os métodos não renováveis e poluentes, viu-se a necessidade de um estudo para a aplicação mais efetiva de energia renovável, em especial aquela proveniente da luz solar. Sobre essa, no século XIX, conforme a Universidade Técnica de Lisboa (2014), o físico francês Alexandre Edmond Becquerel verificou, por acaso, que, quando expunha eletrodos de platina ou de prata à luz solar, dava origem ao efeito fotovoltaico, o qual possuía o rendimento de conversão da energia solar em energia elétrica de cerca de 0,5%. Hoje em dia, o rendimento dos painéis fotovoltaicos é bem maior que aquele inicialmente obtido. Dessa forma, estudos e aplicações da energia solar fotovoltaica tornaram-se interessantes, dado que se trata de uma fonte inesgotável, renovável e limpa.

De acordo com Palz (2002), um efeito de conversão fotovoltaico pode ser obtido em todos os semicondutores, porém a primeira célula solar de eficiência razoável, de silício, foi feita em 1954 por Pearson, Fuller e Chapin. Com base nesse processo, as células solares de silício são aplicadas na maioria dos arranjos fotovoltaicos até hoje, pois elas propiciam um rendimento razoável e uma maior relação custo-benefício. Na tabela 1 relaciona-se os tipos e os rendimentos de cada célula usada atualmente.

Tabela 1: Rendimento elétrico dos vários tipos de células fotovoltaicas

	Rendimento Típico	Máximo registrado em aplicações	Rendimento máximo registrado em laboratório
Mono-cristalina	12 – 15%	22,7%	24,0%
Poli-cristalina	11 – 14%	15,3%	18,6%
Silício amorfo	6 – 7%	10,2%	12,7%

Fonte: Tecnologias de Micro-Geração e Sistemas Periféricos (2014).

Para a geração de energia solar fotovoltaica é preciso instalar o arranjo fotovoltaico que, no seu modo básico, consiste em: painéis ou módulos fotovoltaicos, controlador de carga, bateria ou banco de baterias e inversor de corrente; conforme ilustrado na figura 1.

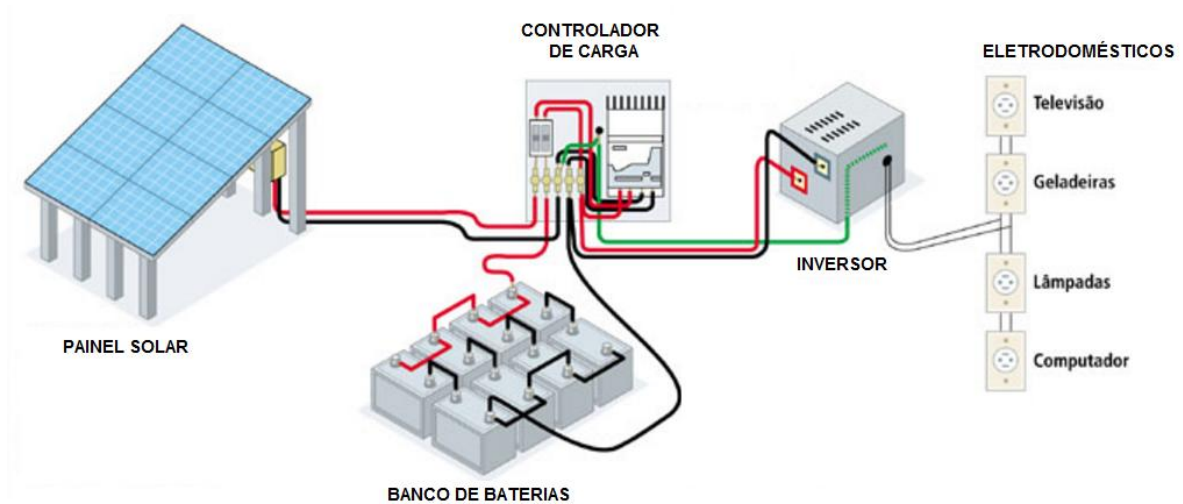


Figura 1: Sistema de geração fotovoltaica de energia elétrica
Fonte: ANEEL – Energia Solar (2014).

Esse tipo de geração de energia renovável ainda não é muito utilizado devido ao custo elevado para a montagem de todo o sistema, pois a maioria dos equipamentos é originada de outros países. Por isso, atualmente, esse sistema está sendo aplicado em pequenos projetos, principalmente em lugares de difícil acesso e em comunidades rurais do norte e do nordeste, para o suprimento de energia elétrica.

Nesse sentido, visando o melhor aproveitamento da energia e a fim de se evitar manutenções, o melhoramento de todos os componentes do arranjo ou sistema fotovoltaico é primordial. Desses, um dos principais componentes do sistema solar fotovoltaico é a bateria, que garante o fornecimento de energia à noite ou quando os níveis de incidência solar são baixos. Nessa medida, o foco deste trabalho consiste em, devido à necessidade e intentando o melhoramento desse equipamento, obter um controle especial da carga para proteção e maior vida útil da bateria.

Em vista dessas considerações, neste projeto será utilizada uma bateria estacionária, conhecida também como bateria de ciclo profundo, que possui alta capacidade Ampère x hora e pode perder até 80% de carga total sem se danificar. Essa bateria é fabricada a partir de chumbo-ácido, possui robustez e, se sua carga for devidamente controlada, possuirá uma longa vida útil, não tendo necessidade de manutenção. Na figura 2 ilustra-se a referida bateria.



Figura 2: Bateria estacionária
Fonte: Minha casa solar (2014).

Conforme exposto, a vida útil das baterias é definida por cargas e descargas, ou seja, pela profundidade da descarga. Na tabela 2 apresenta-se os dados acerca da vida útil da bateria em função da descarga. Como é possível verificar, quanto menor a profundidade da descarga, maior é a vida útil da bateria.

Tabela 2: Vida útil da bateria em função da descarga

Vida útil em função da descarga		
Profundidade da descarga	Número de ciclos	Vida útil em Anos
10%	2500	6,84
20%	1500	4,10
30%	900	2,46
40%	600	1,64
50%	440	1,20
60%	360	0,98
70%	220	0,60
80%	140	0,38

Fonte: Minha Casa Solar (2014).

A sobrecarga danifica a bateria, pois

Se uma bateria está com carga completa e recebe energia adicional, isto causa um aumento no gaseamento, levando assim a um maior consumo de água. A bateria continua gaseando até que o carregador seja desligado ou não haja mais água. Com o aumento do aquecimento, os processos químicos são executados mais rapidamente na bateria. A tensão de gaseamento cai e se a tensão de carga não for adaptada à mudança de temperatura, a bateria será

sobrecarregada. Isto implica o perigo de que aconteça a corrosão da grade e a bateria envelheça demais. Com aumento de temperatura por volta de 10 graus Celsius, por exemplo, a velocidade de reação é duplicada - há uma dupla corrosão da grade. Devido ao gaseamento forte, o risco de explosão aumenta consideravelmente.

Baterias fechadas, ou seja, baterias gel e AGM podem ser danificadas com apenas uma sobrecarga. Nestes modelos de baterias, o eletrólito - o ácido - está em forma vinculada e não pode ser recarregado. (FRONIUS,2016).

Frente ao exposto, o foco principal deste projeto consiste em desenvolver um circuito para controlar a carga da bateria em sistemas fotovoltaicos, algo que é de extrema importância, visto que garantirá maior vida útil e proteção contra descarga e sobrecarga, aproveitando melhor a energia disponibilizada pelo painel solar. Sendo assim, a pergunta a se responder neste projeto é: como controlar a carga da bateria para garantir a maior vida útil e o melhor aproveitamento da energia em sistema fotovoltaico?

Para que isso ocorra, é necessário usar técnicas de controle como, por exemplo, o MPPT (*Maximum Peak Power Tracking*), que nada mais é do que o rastreamento da máxima potência de pico fornecida pelos painéis fotovoltaicos. Essa técnica consiste em captar o ponto de potência máxima que o painel fotovoltaico oferece em determinada condição climática, ou seja, ela rastreia o ponto em que o produto da corrente e da tensão, variáveis de saída do painel, seja o maior possível para um maior aproveitamento da energia solar. As curvas características da potência e da corrente pela tensão de um módulo fotovoltaico e os pontos de máxima potência de cada curva estão ilustradas na figura 3.

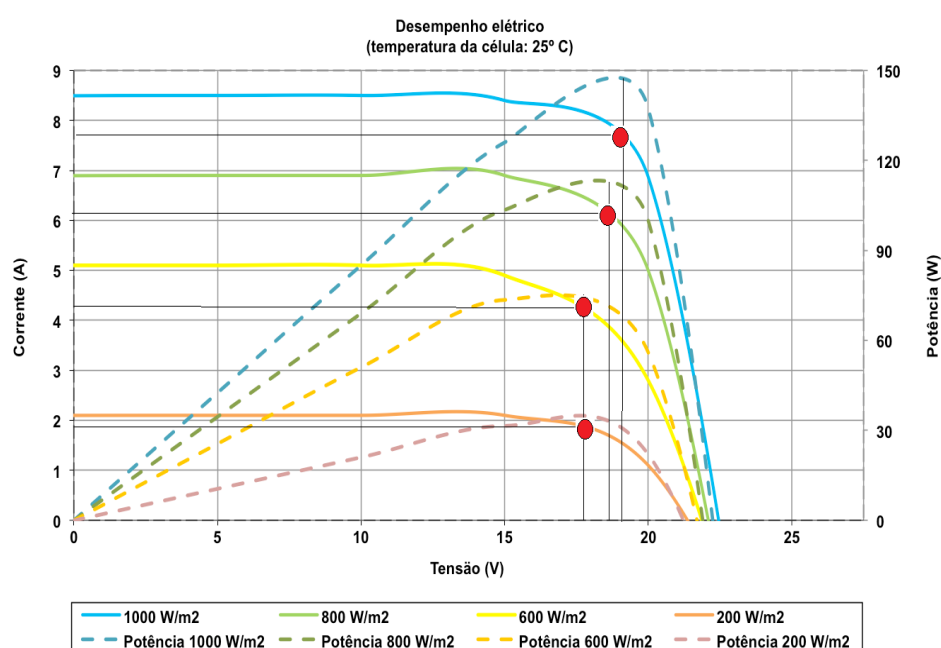


Figura 3: Características da potência e da corrente pela tensão de um módulo fotovoltaico com diferentes irradiações

Fonte: SOLARINOVA (2016)

Existem várias técnicas de MPPT, contudo, neste projeto será abordada somente a Perturbe e Observe (P&O), devido à simplicidade do método e à sua fácil implementação, pois necessita somente dos parâmetros de tensão e corrente do módulo fotovoltaico. Essa técnica incrementa ou decrementa, periodicamente, a tensão ou a corrente de saída do painel, e compara com a potência atual e a potência anterior do sistema. Desse modo, para aplicar o algoritmo de MPPT e o controle de corrente da bateria, será utilizado um microcontrolador. Sendo assim, pela disponibilidade e facilidade de programação foi escolhida a plataforma de desenvolvimento de microcontrolador Arduino. McRoberts (2001) define o Arduino como sendo um pequeno computador que se pode programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de *hardware* e *software*.

Levando em consideração tais apontamentos, este projeto será desenvolvido para estudo e fabricação de um controlador de carga que objetiva a aplicação nos sistemas fotovoltaicos adquiridos pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG – Campus Araxá-MG. Tal aplicação será importante, pois a instituição terá o domínio da tecnologia envolvida no arranjo fotovoltaico, em especial, no que se refere ao controlador de carga e, com esse domínio, irá garantir o melhor funcionamento das baterias, reduzindo custos de manutenção do sistema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O sistema fotovoltaico

O sistema fotovoltaico, em sua configuração básica, é formado por módulos solares, uma unidade de controle de potência (controlador de carga) e também uma unidade de armazenamento (banco de baterias). Essa configuração está descrita na figura 4:

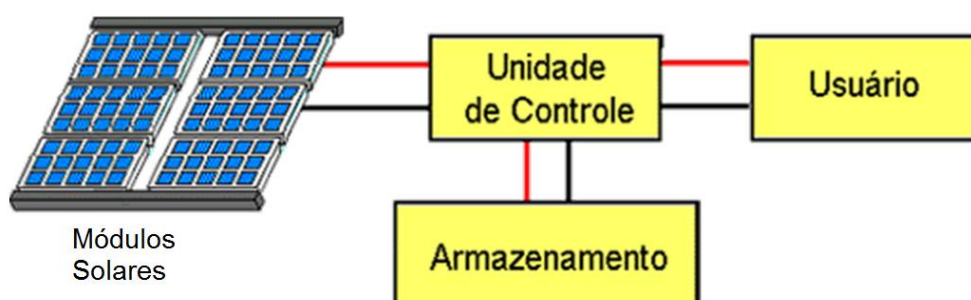


Figura 4: Configuração básica de um sistema fotovoltaico
Fonte: CRESESB (2014).

Salienta-se, ainda, que esse sistema pode ser classificado nas categorias: sistema isolado, híbrido e conectado à rede, as quais serão descritas na sequência.

No sistema isolado utiliza-se algum dispositivo de armazenamento que é caracterizado de duas formas, sistema em série ou sistema em paralelo. Essas formas se diferenciam pelo modo como é feito o armazenamento de carga. Quando o sistema isolado é conectado em série, o sistema de armazenamento é ligado em série com o fluxo de energia e, nessa configuração, o controlador ou carregador tem a função de ajustar a tensão de entrada para o carregamento do banco de baterias, não deixando que elas se danifiquem com sobrecarga ou descarga profunda, além de rastrear o ponto de máxima potência. Essa forma, sistema em série, é usada em sistemas pequenos com baixa tensão e corrente contínua (CC). Em sistemas de corrente alternada (CA), é necessário o uso do inversor, que converte a saída de corrente contínua do banco de baterias para corrente alternada, utilizada nos eletrodomésticos convencionais. O esquema dessa configuração é apresentado na figura 5.

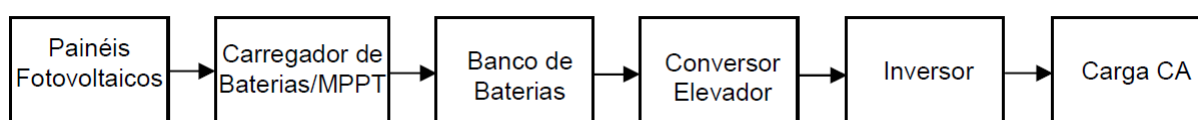


Figura 5: Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado em série.
Fonte: Seguel (2009).

No sistema isolado conectado em paralelo, por sua vez, o sistema de armazenamento é ligado em paralelo com o fluxo de energia. O diagrama dessa configuração está descrito na figura 6.

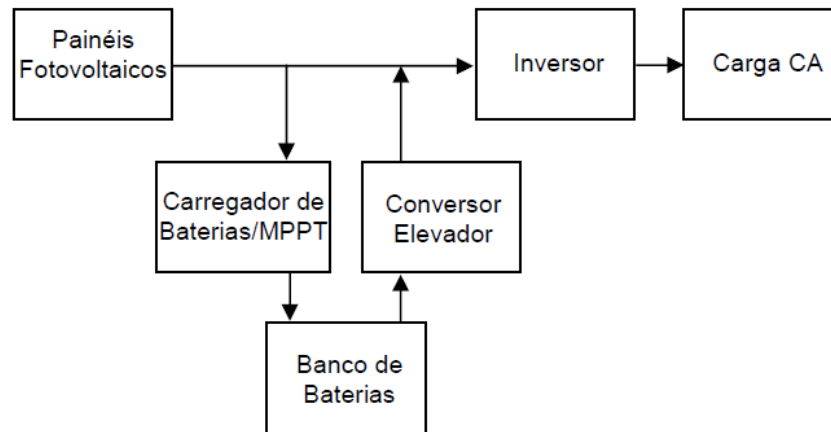


Figura 6: Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico isolado em paralelo
Fonte: Seguel (2009).

Sobre essa forma, sistema isolado conectado em paralelo, destaca-se a redução do número de estágios condicionadores de energia em série, o que resulta em um aumento na eficiência global do sistema fotovoltaico. Segundo Seguel (2009, p.24):

[...] esta configuração possui algumas vantagens em relação à configuração em série, principalmente pelo fato do banco de baterias, após estar completamente carregado, poder ser desconectado do sistema, podendo a carga ser alimentada apenas pela energia gerada pelos painéis fotovoltaicos.

Os sistemas fotovoltaicos classificados como sistemas híbridos apresentam várias fontes de captação e geração de energia elétrica, tais como: turbinas eólicas, combustíveis fósseis e módulos fotovoltaicos. Esse tipo de sistema, ilustrado na figura 7, não é conectado à rede e é aplicado somente para sistemas de médio e grande porte, sendo necessário um controle de todas as fontes para o fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

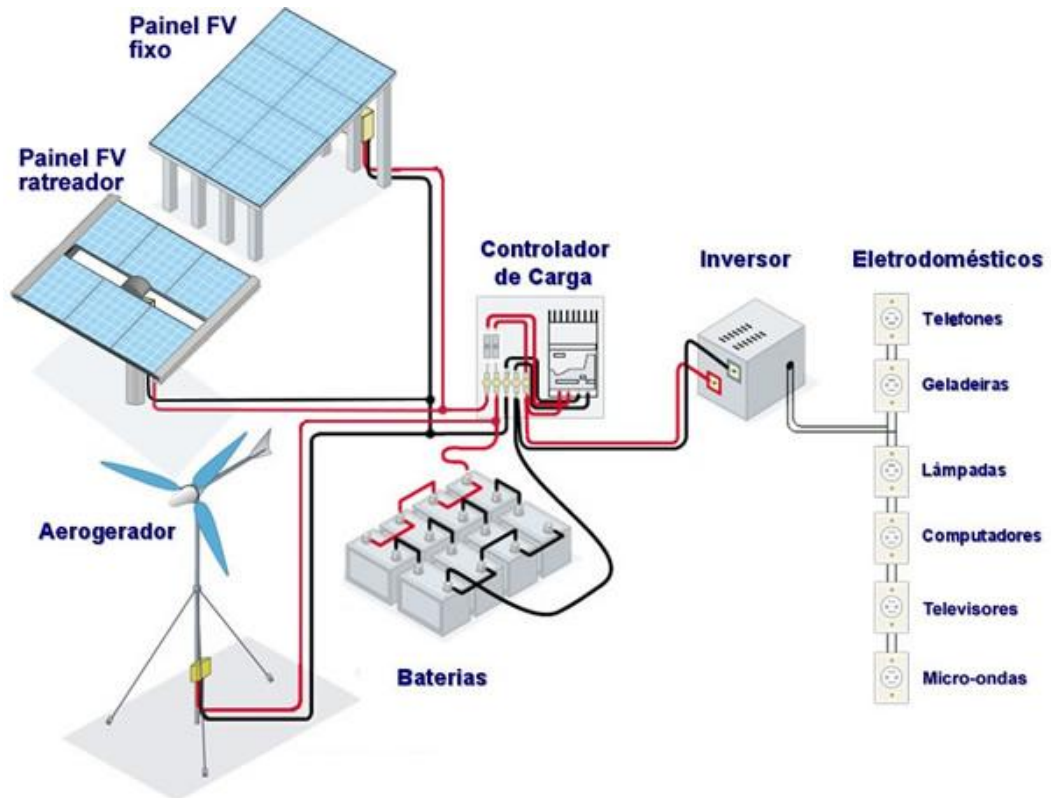


Figura 7: Sistema Híbrido com geração de energia solar e eólica
Fonte: BLOG-ENERGIA (2016).

Por fim, nos sistemas conectados à rede, toda energia gerada é entregue à rede de fornecimento, logo, não se utiliza unidade de armazenamento. Portanto, a aplicação de controlador de carga, nesse caso, não é necessária. A figura 8 exibe um exemplo de sistema conectado à rede elétrica.

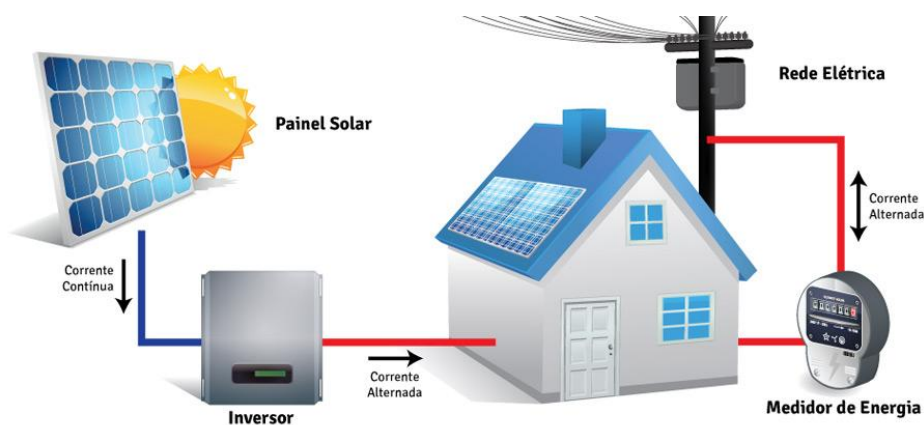


Figura 8: Sistema conectado à rede elétrica
Fonte: BLOG-ENERGIA (2016).

2.2 O painel solar

O painel ou módulo solar é formado por um conjunto de células fotovoltaicas conectadas entre si em série ou em paralelo. Sendo assim, é nele que ocorre a geração de energia elétrica. Conforme Neves Jr. (2010, p. 18), uma célula fotovoltaica consiste basicamente em um diodo, cuja junção PN é exposta à luz. A incidência de luz faz com que a junção PN absorva a energia dos fótons e, conseqüentemente, crie pares elétrons-lacunas, gerando um campo elétrico na junção PN. Ao conectar uma carga externa à célula fotovoltaica, figura 9, é possível observar uma circulação de corrente elétrica no circuito.

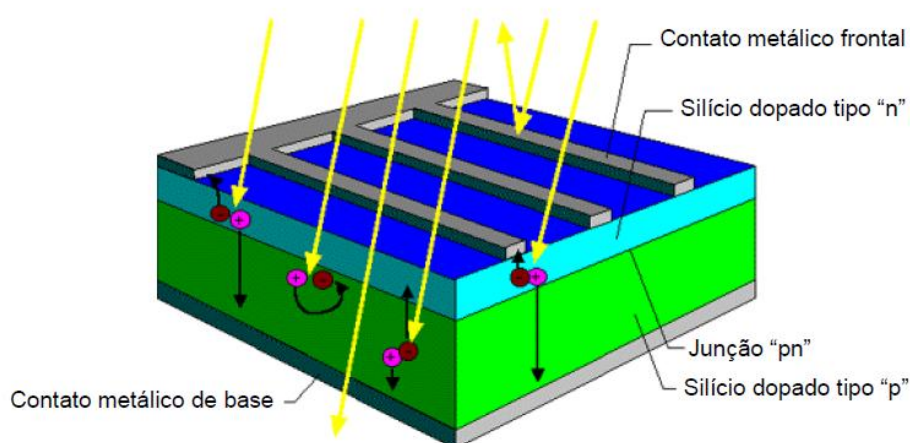


Figura 9: Célula fotovoltaica de silício cristalino
Fonte: SEGUEL (2009).

Para Palz (2002, p. 257),

A maioria das células solares de silício empregadas para aplicações terrestres está por volta de folhas de 5 cm de diâmetro e espessura de 0,3 a 0,5mm. A tendência é para maiores diâmetros. Uma célula de 5 cm de diâmetro com uma área de 20 cm² gera, em pleno Sol, rendimento de 15% e, em temperatura ambiente, uma potência de 0,3 W a menos de 0,5V. Uma célula de 10 cm (80 cm²) gera cerca de 1,2 W sob as mesmas condições.

Para definir o valor da tensão e/ou potência, é necessário conectar (agrupar) as células fotovoltaicas e definir o número de células que serão interligadas e o tipo de conexão entre elas. Um conjunto de células fotovoltaicas, conhecido também como *strings*, pode ser ligado em paralelo ou em série. Quando as células são ligadas em série determina-se o nível de

tensão desejado e quando são ligadas em paralelo determina-se o nível de corrente desejado. O efeito da conexão série e paralelo está ilustrado na figura 10.

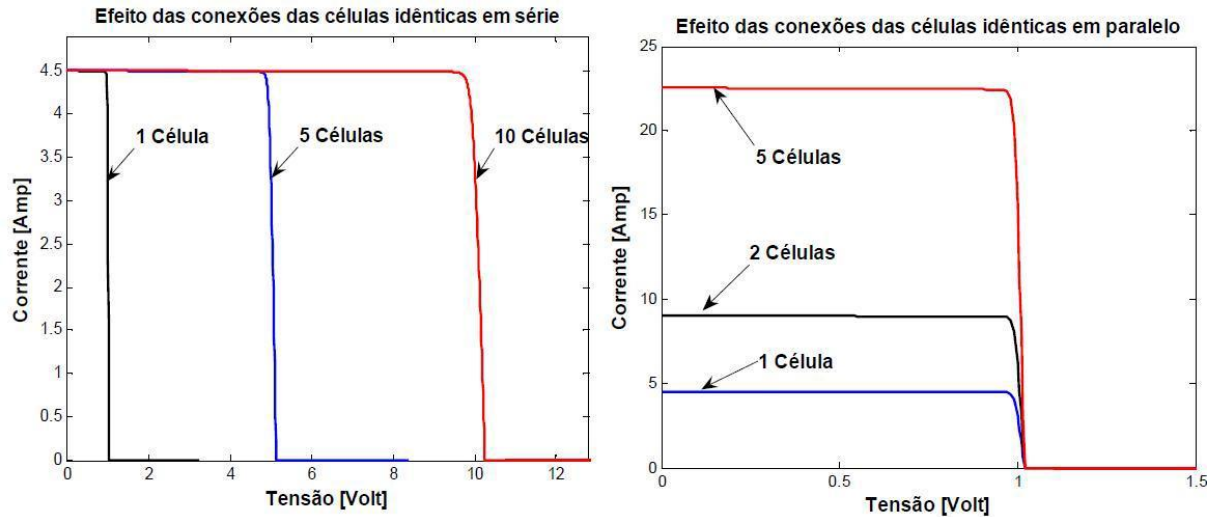


Figura 10: Efeito da conexão de células em série (a) e em paralelo (b)
Fonte: Neves Jr. (2010).

Em vista disso, objetiva-se agrupar painéis solares (grupos de células em série/paralelo) de tal forma que forneçam tensão e potência padrão que satisfaça as restrições específicas (tensão-padrão de painéis fotovoltaicos: 1,5V, 6V, 12V, 24V, 48V). Salienta-se, ainda, que a principal característica dos módulos fotovoltaicos é a potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$), fator determinante para caracterizar o módulo. Essa característica pode ser verificada na figura 11.

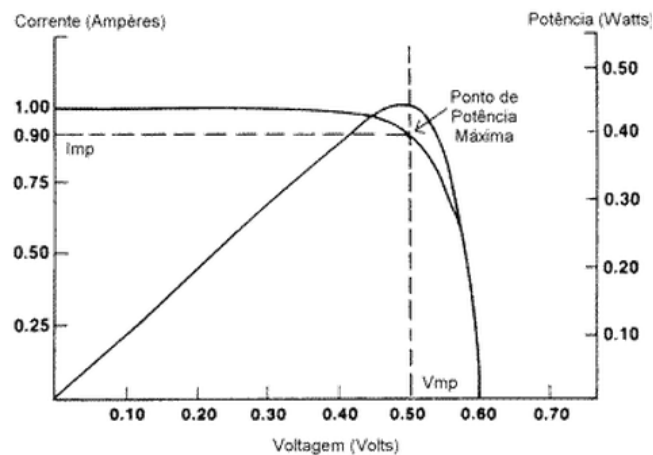


Figura 11: Curva típica de potência versus tensão para uma célula solar
Fonte: CRESESB (2014).

É válido ressaltar, conforme Spaduto e Freitas (2013, p. 2), que há outros parâmetros que também apresentam a funcionalidade dos painéis e que devem ser considerados, sendo eles:

- Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}): é o máximo valor da tensão nos terminais do módulo fotovoltaico, quando nenhuma carga está conectada a ele. O seu valor é fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação e temperatura;
- Corrente de curto-circuito (I_{cc}): Corrente máxima que o painel pode fornecer, sob determinadas condições de radiação e temperatura, quando a tensão nos seus terminais é nula e conseqüentemente a potência também é nula;
- Ponto de máxima Potência (MPP): Em um painel fotovoltaico, para uma dada condição climática, só existe um ponto na curva I (corrente) x V (tensão) no qual a potência máxima pode ser alcançada. Esse ponto corresponde ao produto da tensão e corrente para $P_{máx}$.

A tabela 3 expõe os parâmetros do painel fotovoltaico de 80W, para o qual foi dimensionado o projeto.

Tabela 3: Características Elétricas de um painel fotovoltaico de 80W

Características do painel fotovoltaico	
Potência Máxima	80W _p
Tensão no Ponto de Máxima Potência	17.6V
Corrente no Ponto de Máxima Potência	4.55A
Corrente de Curto Circuito	4.8A
Tensão de Circuito Aberto	22.1V

Fonte: Imhoff (2007).

A potência e a tensão desejadas, quando dimensionar os módulos, podem ser obtidas ligando-se um número adequado de módulos fotovoltaicos em série ou em paralelo.

Segundo Seguel (2009), um modelo eletricamente equivalente à uma célula fotovoltaica, demonstrado na figura 12, pode ser criado para facilitar o entendimento do comportamento eletrônico dela. Se a célula funcionasse idealmente, ela poderia ser representada apenas com uma fonte de corrente em paralelo com um diodo. Mas o comportamento real da célula apresenta perdas que podem ser representadas por resistências inseridas juntamente com a fonte de corrente e o diodo no modelo da célula ideal. A queda de tensão do material semicondutor, causadas por perdas ôhmicas, pode ser representada por uma resistância em série R_{sm} . As perturbações elétricas entre as partes da frente e de trás da célula e as perturbações pontuais na zona de transição PN pode ser representadas com uma resistância em paralelo R_{pm} .

O modelo eletrônico, ilustrado na figura 12, pode ser usado também como a representação do modelo eletricamente equivalente do painel solar, segundo Imhoff (2007).

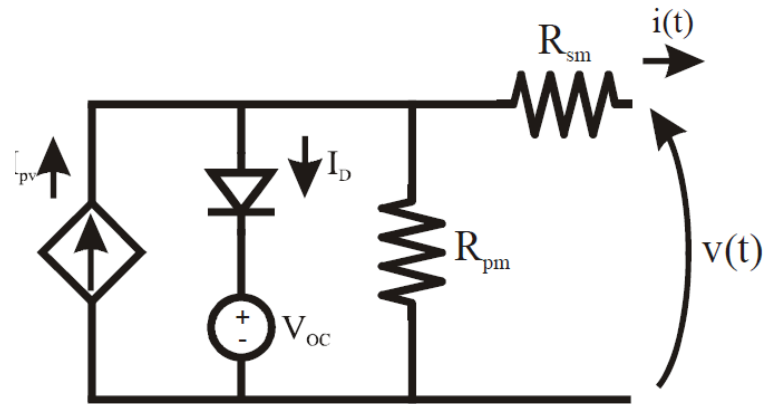


Figura 12: Modelo eletrônico da célula fotovoltaica
Fonte: Imhoff (2007).

$$R_{sm} = \frac{V_{oc} - V_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (1)$$

$$R_{pm} = \frac{V_{oc}}{I_{cc} - I_{MPP}} \quad (2)$$

2.3 O armazenamento de carga

O módulo fotovoltaico é uma alternativa para geração de energia renovável e limpa, porém essa geração só acontece durante o dia e em sol pleno. Quando o dia está nublado ou à noite, os painéis não fornecem tensão suficiente para gerar energia diretamente à carga. Sendo assim, em sistemas isolados da rede, é necessário utilizar um dispositivo que armazene a carga fornecida pelos painéis para ser utilizada quando não houver a geração de energia ou quando essa energia estiver em níveis abaixo do exigido pela carga.

O dispositivo de armazenamento utilizado é a bateria eletroquímica, que é capaz de transformar energia elétrica em energia potencial química e, posteriormente, converter em energia elétrica novamente. Existem dois tipos de bateria: primárias (não recarregáveis) e secundárias (recarregáveis). As baterias secundárias mais usadas são as de Chumbo-ácido e as de Níquel-cádmio, porém a relação custo-benefício das baterias de Chumbo-ácido é maior, mesmo não tendo tanta durabilidade e resistência ao descarregamento completo como as de Níquel-cádmio.

Dentre as vantagens da bateria de Níquel-cádmio, destacam-se: vida útil longa, altas taxas de descarga e pouca necessidade de manutenção, porém, como desvantagens, assinala-se a presença de Cádmio, que é um metal pesado e tóxico, e elevado custo. Já a bateria de Chumbo-ácido é considerada a mais econômica para aplicações de elevada potência. Portanto, a bateria de Chumbo-ácido será utilizada neste projeto.

Sobre a descarga, Seguel (2009, p. 41) afirmou que a profundidade de descarga indica, em termos percentuais, quanto da capacidade nominal da bateria foi retirada a partir do estado de plena carga. Uma profundidade de descarga muito alta (acima de 80%) diminui a vida útil da bateria. Sendo assim, a aplicação de um controlador para evitar o descarregamento da bateria é necessária, de tal forma a não deixar a bateria descarregar completamente, mantendo a carga da bateria maior do que 20%. Portanto, quando a bateria estiver com a carga menor ou igual a 20%, o controlador de carga terá a função de desconectar a saída da bateria com a entrada da carga consumidora da energia.

O problema quanto ao carregamento da bateria é a sobrecarga, ou seja, o fornecimento contínuo de energia dos painéis enquanto a bateria está 100% carregada. Seguel (2009, p. 44), sobre isso, afirmou que, para se obter um rápido, seguro e completo processo de carga da bateria Chumbo-ácido, alguns fabricantes de baterias recomendam dividir o processo em três regiões, sendo elas:

- Região 1: carga profunda (*bulk charge*), em que a bateria se encontra completamente descarregada (tensão = V_{CHGENB}) e se aplica uma corrente de recarga constante (I_{BULK}). A aplicação da corrente de recarga pode provocar o aquecimento excessivo e o desgaste da bateria.
- Região 2: sobrecarga (*over charge*): nela o controlador regulará a tensão da bateria no valor V_{OCH} . O fim do processo de carregamento pode ser detectado quando a corrente de recarga cair a um valor predeterminado I_{TC} e a tensão permanecer em V_{OCH} .
- Região 3: carga flutuante (*float charge*), a tensão de entrada da bateria deve ser reduzida até alcançar V_{FLOAT} , gerando uma corrente de descarga muito pequena.

O fabricante da bateria fornece os parâmetros V_{CHGENB} , V_{OCH} e V_{FLOAT} . A figura 13 mostra graficamente as três regiões.

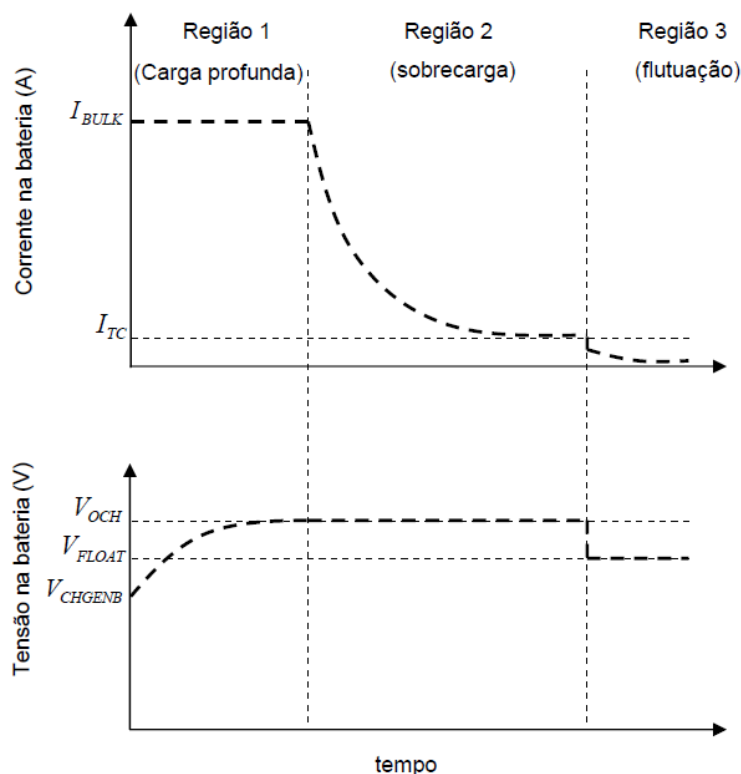


Figura 13: Curva de corrente e tensão nas três regiões da bateria de chumbo-ácido
 Fonte: Seguel (2009, p. 28).

2.4 Controladores de carga

Segundo Imhoff (2007), controladores de carga são dispositivos eletrônicos que controlam o fluxo de potência entre os painéis fotovoltaicos, as baterias e a carga. Quando a carga da bateria estiver em 100%, o controlador se encarrega de desconectar os módulos fotovoltaicos da bateria, interrompendo o fornecimento de energia para ela ou controlando a tensão fornecida. Isso deve acontecer quando o carregamento da bateria atingir um limite crítico determinado pelo fabricante.

A tensão nominal do painel deverá ser superior à tensão de carga das baterias, de tal forma que a tensão máxima de pico seja alta o suficiente para que possibilite a carga das baterias. Quando os níveis de fornecimento de energia forem baixos ou inexistentes, a tensão de saída dos painéis será inferior à tensão atual da bateria, levando à descarga da bateria através dos módulos. Sendo assim, o controlador de carga também precisa entrar em ação, evitando a descarga total da bateria.

Visto isso, as principais funções que serão abordadas neste projeto são: proteção contra sobrecargas e prevenção de descargas indesejáveis. Para tanto, existem dois tipos de controladores: em série e em paralelo (*shunt*), que se diferenciam pelo modo como o

controlador desconecta os módulos da bateria quando ela atingir plena carga. Em resumo: quando o armazenamento da energia estiver com a carga completa, o controlador de carga em série desconectará os módulos fotovoltaicos, como ilustra a figura 14.

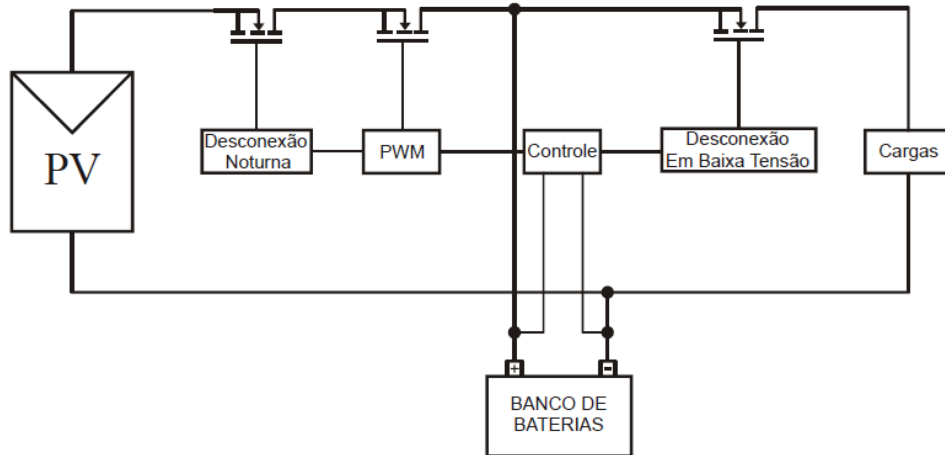


Figura 14: Conversor em série
Fonte: Imhoff (2007).

Por sua vez, o controlador de carga paralelo curto-circuita os terminais dos módulos fotovoltaicos. Isso acontece porque os módulos podem operar quando estão curto-circuitados, mas é preciso adicionar um diodo para a proteção da bateria. Essa ligação está ilustrada na figura 15.

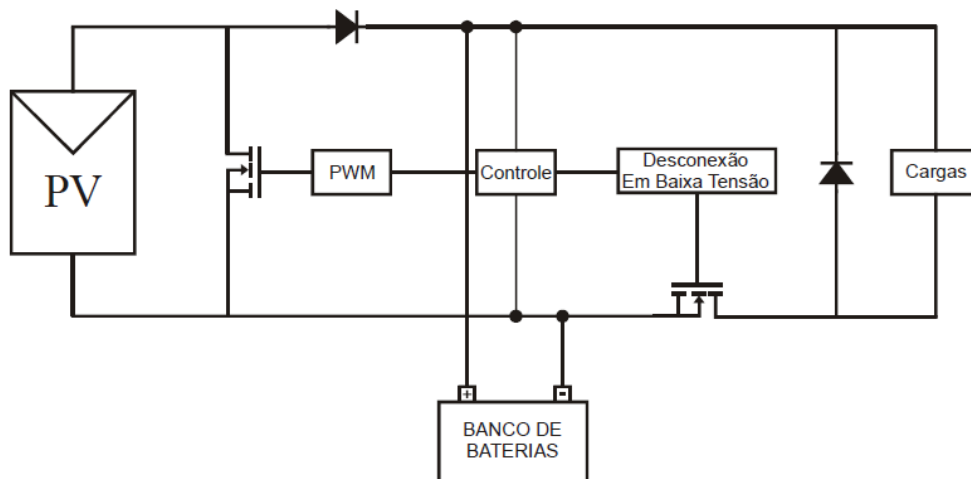


Figura 15: Conversor em paralelo (shunt)
Fonte: Imhoff (2007).

2.5 Topologia do conversor CC-CC

Os conversores CC-CC (Corrente Contínua para Corrente Contínua) são necessários para adequar os níveis de tensão entre os elementos de um sistema fotovoltaico, elevando ou reduzindo a tensão de sua saída em relação à tensão de entrada. Portanto, a partir de uma fonte de tensão fixa na entrada (V_e), os conversores CC-CC têm a função de fornecer uma tensão variável na saída (V_s), a qual possui um filtro capacitivo (C) que mantém, sobre ele, uma tensão estabilizada e de ondulação desprezível.

Para limitar a corrente da conexão entre a fonte de entrada e um capacitor, provocada por uma variação topológica (em função da condução dos interruptores), deverá conter, no circuito, um elemento que limite a corrente. Nesse caso, o elemento será um indutor (L).

A chave ou interruptor no circuito dos conversores CC-CC comutam, entre ligado e desligado, em uma dada frequência (f_s), em um determinado período (T) e com um tempo de condução do transistor (t_{on}).

A razão cíclica (*duty-cycle*) ou largura do pulso D é definida pela razão entre t_{on} e T , ou seja,

$$D = \frac{t_{on}}{T}. \quad (3)$$

As conversões CC-CC possíveis são:

$$V_s > V_e$$

$$V_s < V_e$$

$$V_s = V_e$$

A arquitetura do conversor CC-CC é demonstrada na figura 16.

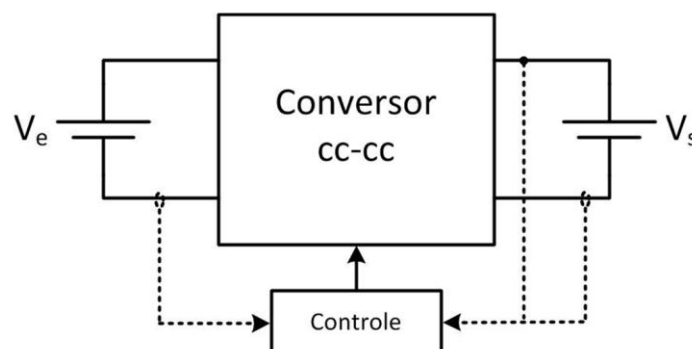


Figura 16: Arquitetura básica do conversor CC-CC
Fonte: Elmano (2011).

A relação entre V_s e V_e é definida como Ganho estático G . Portanto:

$$G = \frac{V_s}{V_e}. \quad (4)$$

Para obter a largura de pulso, em uma determinada frequência constante e com variação do tempo em que a chave permanece ligada, é necessário utilizar a Modulação por largura de pulso (PWM) que está ilustrada na figura 17.

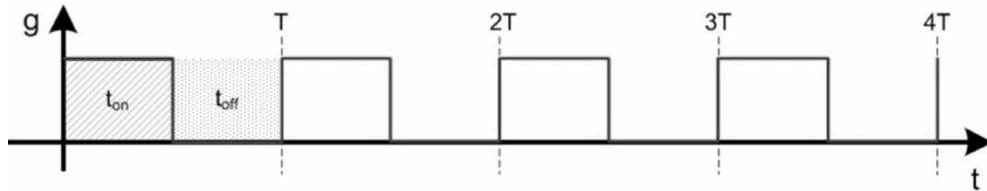


Figura 17: Modulação por largura de pulso (PWM)
Fonte: Elmano (2011).

$$t_{on} + t_{off} = T \quad (5)$$

$$D = \frac{t_{on}}{T} \begin{cases} 0 \leq t_{on} \leq T, \\ 0 \leq D \leq 1, \end{cases}$$

$$f_s = \frac{1}{T} \quad (6)$$

A seguir são descritos alguns tipos de conversores CC-CC.

2.6 Conversor Buck

O conversor *Buck* é composto por duas chaves e um indutor. A chave 1 é constituída por um diodo e a chave 2 é constituída por um transistor. Quando está no modo de condução contínua ou descontínua, esse tipo de topologia abaixa a tensão de saída, portanto $V_s < V_e$. Esse é o método escolhido para o projeto, visto que o painel fotovoltaico, em sol pleno, oferece tensão maior do que a tensão máxima da bateria e, sendo assim, é necessário reduzir a tensão de saída do painel para proteger a bateria contra sobrecarga. O esquema do conversor *Buck* está ilustrado na figura 18.

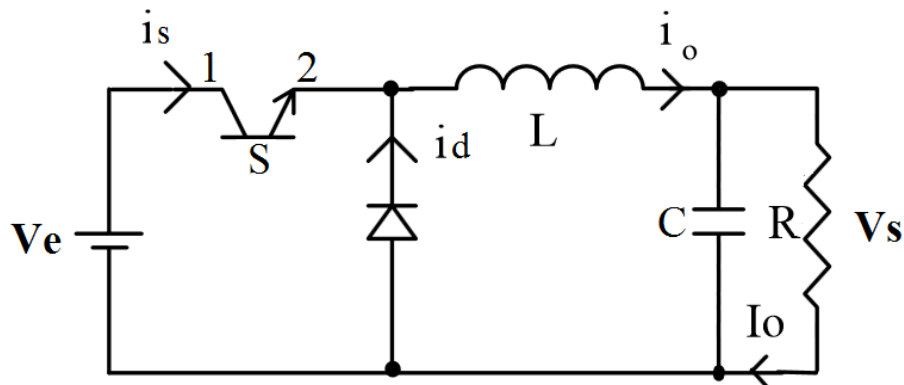


Figura 18: Topologia do conversor Buck
Fonte: Elmano (2011).

O sistema é dividido em duas etapas: Etapa 1 e Etapa 2.

Etapa 1(t_{on}) – Transistor conduzindo: A energia é transferida da fonte para o indutor, aumentando a corrente i_0 , e para o capacitor, quando i_0 for maior do que o produto da tensão de saída pela resistência da carga ($i_0 > \frac{V_s}{R}$).

Etapa 2(t_{off}) – Transistor desligado: O diodo passa a conduzir energia e dá continuidade à corrente do indutor. A energia que foi armazenada no indutor na Etapa 1 é entregue ao capacitor e à carga. Se o valor da corrente no indutor for maior do que a corrente que passa pela carga, a diferença entre as duas carrega o capacitor. Porém, se a corrente for menor, o capacitor descarrega a energia armazenada para suprir a diferença, mantendo a corrente da carga constante. A figura 19 ilustra as curvas obtidas das duas etapas de operação do Conversor Buck.

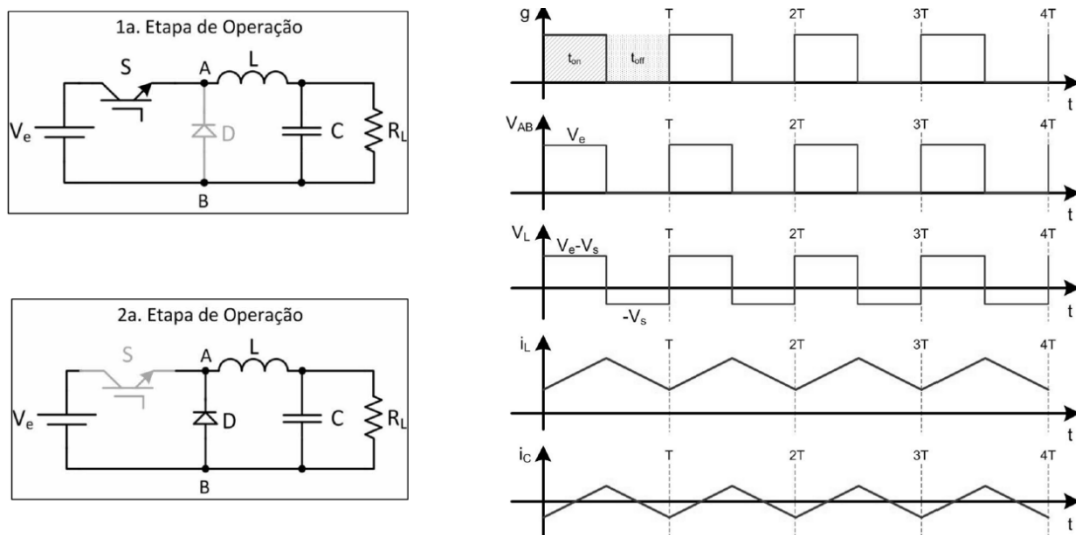


Figura 19: Curvas obtidas das duas etapas de operação do Conversor Buck
Fonte: Elmano (2011).

O ganho estático, nesse conversor, varia entre 0 e 1, ou seja, $0 \leq G \leq 1$, e a relação entre razão cíclica e ganho estático é direta, portanto

$$G = D \quad (7)$$

As fórmulas para dimensionar o sistema do conversor Buck são apresentadas na sequência:

- Corrente de carga nominal:

$$i_n = \frac{P_n}{V_s} \quad (8)$$

- Razões cíclicas máxima e mínima:

$$D_{máx} = \frac{V_s}{V_{e_{mín}}} \quad D_{mín} = \frac{V_s}{V_{e_{máx}}} \quad (9)$$

- Valor mínimo de indutância:

$$L = \frac{(V_e - V_s) * D_{m\acute{a}x}}{\Delta i_L * f_s} \quad (10)$$

- Valor mínimo de capacitância:

$$C = \frac{i_n * (1 - D_{m\acute{i}n})}{\Delta V_s * f_s} \quad (11)$$

Quando o circuito opera em modo contínuo, significa que a corrente que passa pelo indutor não vai a zero, caso contrário, o circuito opera em modo descontínuo. No modo contínuo, a relação entre a largura de pulso e a tensão média de saída é bem definida, portanto, prefere-se operar em modo contínuo. A figura 20 mostra as formas de onda típicas dos dois modos de operação.

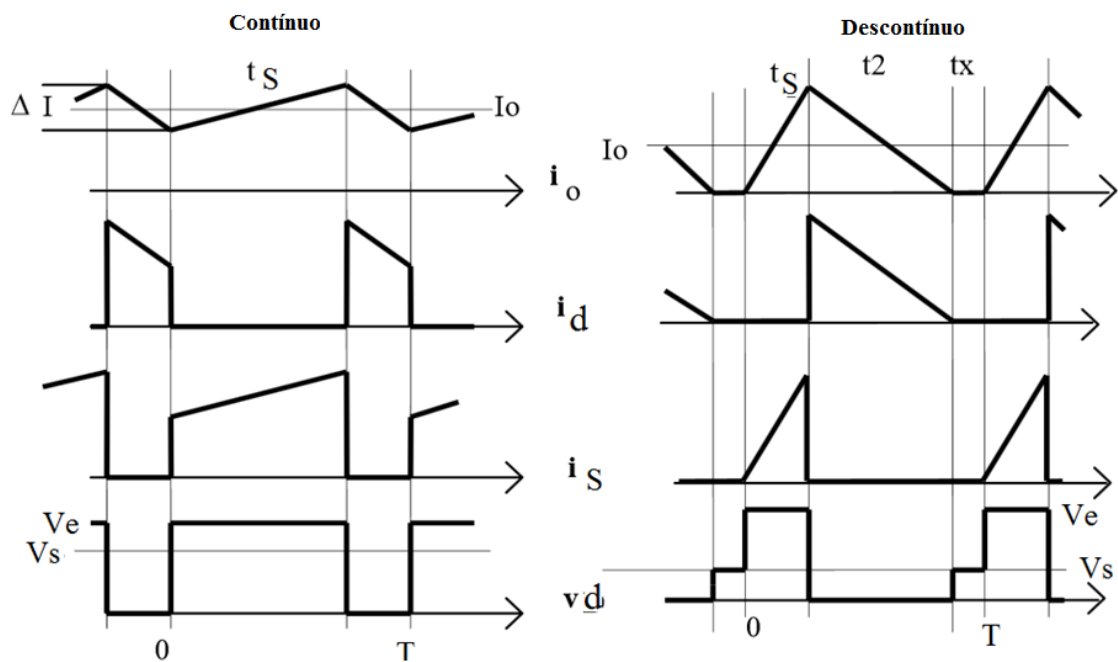


Figura 20: Conversor Buck em modo de operação contínuo e descontínuo

Fonte: Elmano (2011).

No conversor Buck em modo contínuo quando o transistor conduz, ou seja, está ligado, tem-se a relação:

$$v_L = V_e - V_s \quad (12)$$

E quando o diodo conduz, com o transistor desligado, tem-se:

$$v_L = -V_s \quad (13)$$

2.7 Conversor *Boost*

Essa topologia possui os mesmos componentes do conversor *Buck*, porém são posicionados de forma distinta, para garantir o aumento de tensão na saída, ou seja, $V_s > V_e$. Na sequência, ilustra-se o esquema do conversor *Boost*:

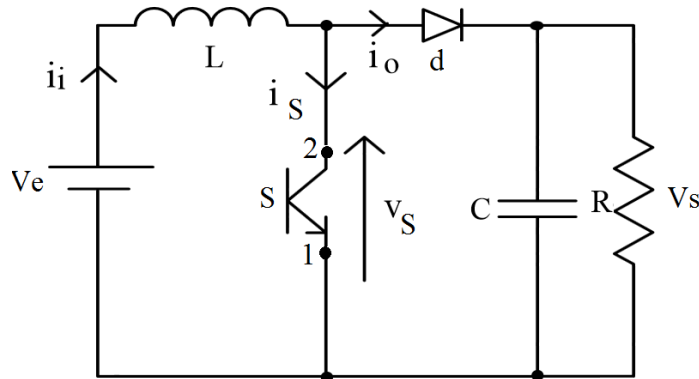


Figura 21: Topologia do conversor Boost
Fonte: Elmano (2011).

Esse sistema é dividido em duas etapas: Etapa 1 e Etapa 2.

Etapa 1 (t_{on}) – Transistor ligado (conduzindo): Quando o transistor S está conduzindo, a tensão de entrada V_e é aplicada no indutor L . Como, no Conversor *Boost*, a tensão de saída é maior do que a tensão de entrada; o diodo d fica reversamente polarizado e, então, se acumula energia no indutor L .

Etapa 2 (t_{off}) – Transistor desligado (cortado): Quando o transistor S está desligado, a energia acumulada no indutor, na Etapa 1, é enviada ao capacitor C e à carga R .

As duas etapas estão ilustradas na figura 22:

O ganho estático, nesse conversor, é maior ou igual a um, ou seja, $G \geq 1$, e a relação entre razão cíclica e ganho estático é:

$$G = \frac{1}{1-D}. \quad (14)$$

Salienta-se, ainda, que há dois modos de operação do conversor *Boost*, quais sejam: contínuo e descontínuo, tal como no conversor *Buck*. As curvas que representam esses modos estão representadas na figura 23:

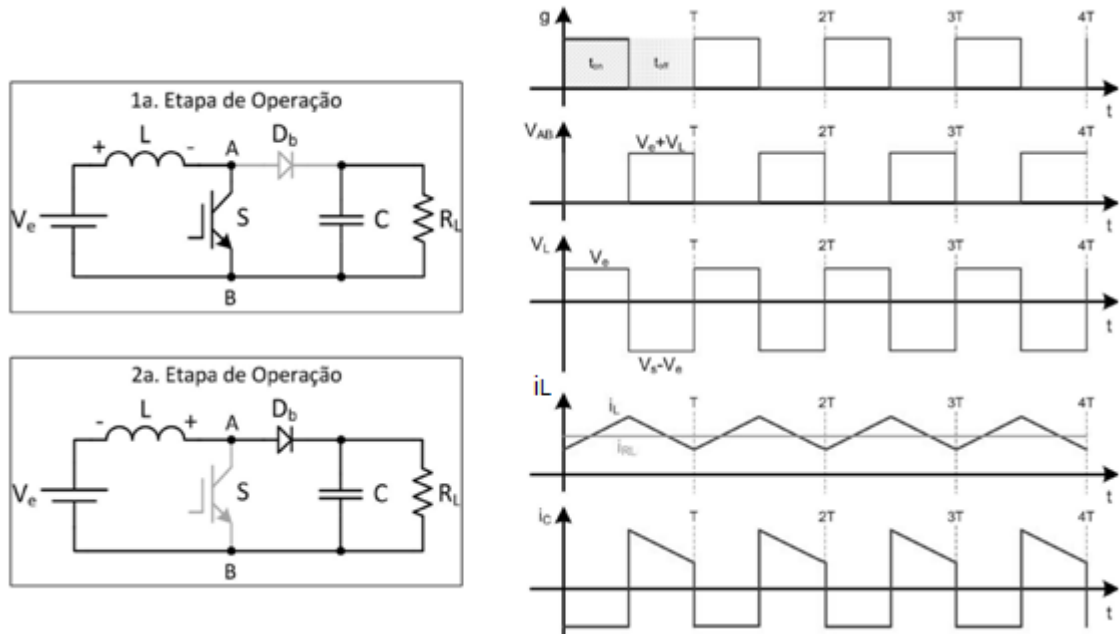


Figura 22: Etapas de operação do Conversor Boost
 Fonte: Elmano (2011).

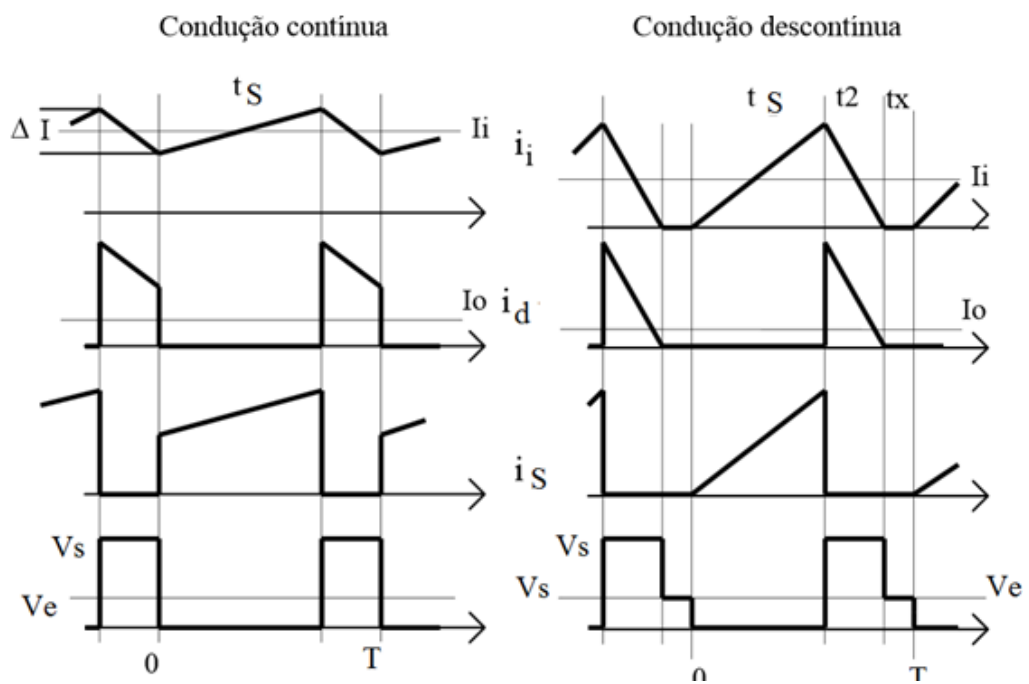


Figura 23: Modo de operação contínuo e descontinuo do conversor Boost
 Fonte: Elmano (2011).

No conversor *Boost* em modo contínuo quando o transistor conduz (durante t_{on}), ou seja, está ligado tem-se a relação:

$$v_L = V_e \tag{15}$$

E quando o diodo conduz (durante $T - t_{on}$), com o transistor desligado, tem-se:

$$v_L = -(V_s - V_e) \tag{16}$$

2.8 Conversor *Buck/Boost*

A topologia *Buck/Boost*, como o próprio nome já diz, é a união das duas topologias citadas anteriormente, porém permite a obtenção de tensões maiores ou menores que a tensão de entrada do conversor. Essa característica é importante na aplicação com painéis fotovoltaicos, pois garante o melhor aproveitamento da potência fornecida, não importando os níveis de irradiação solar e o quanto a bateria está carregada. O esquema do conversor *Buck/Boost* está ilustrado na figura 24,

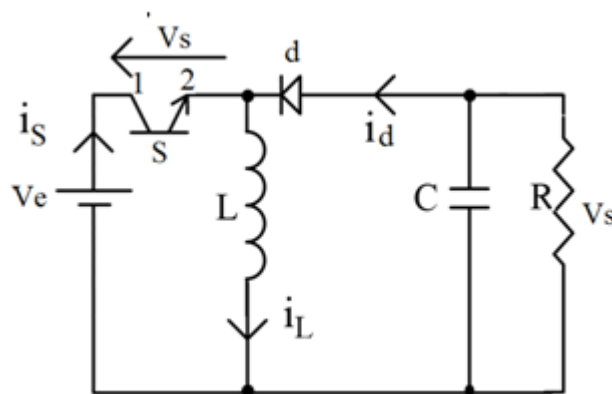


Figura 24: Topologia do conversor Buck/Boost
Fonte: Elmano (2011).

O sistema é dividido em duas etapas, Etapa 1 e Etapa 2, descritas a seguir:

Etapa 1(t_{on}) – Transistor ligado (conduzindo): Quando o transistor S é fechado, a energia da fonte é transferida para o indutor L . Nesse estado, o diodo d não conduz e o capacitor C alimenta a carga R .

Etapa 2(t_{off}) – Transistor desligado (cortado): Quando o transistor S é aberto, o diodo passa a conduzir, dando continuidade à corrente do indutor; e a energia que é armazenada no indutor L é entregue ao capacitor C e à carga R . A figura 25 ilustra as etapas de operação do conversor *Buck/Boost*.

O ganho estático, nesse conversor, é maior ou igual a zero, ou seja, $G \geq 0$, e a relação entre razão cíclica e ganho estático é:

$$G = \frac{D}{1-D}. \quad (17)$$

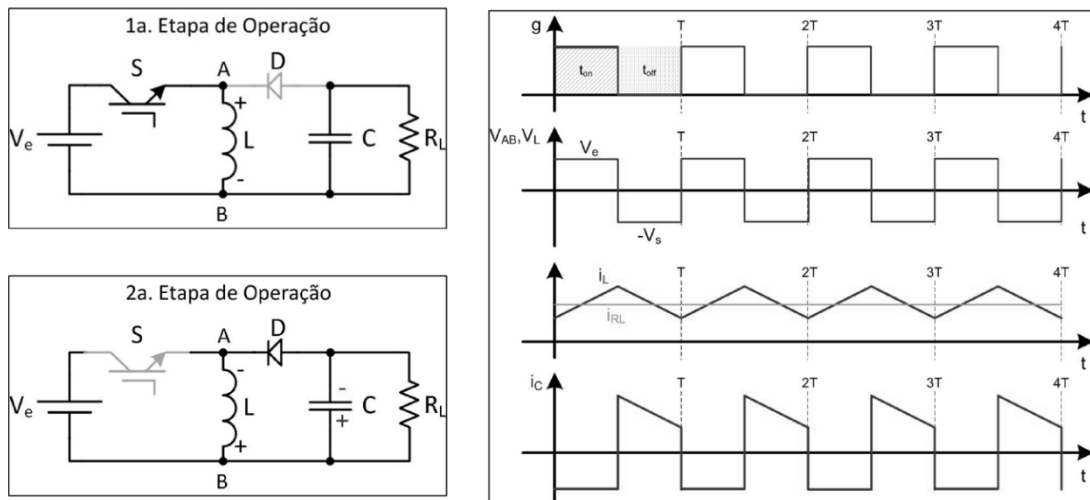


Figura 25: Etapas de operação do conversor Buck/Boost
 Fonte: Elmano (2011).

No conversor *Buck/Boost* também se tem os modos de operação contínuo e descontínuo, tal como nos conversores *Buck* e *Boost*. Acerca desses modos de operação, apresenta-se a representação das curvas na figura 26.

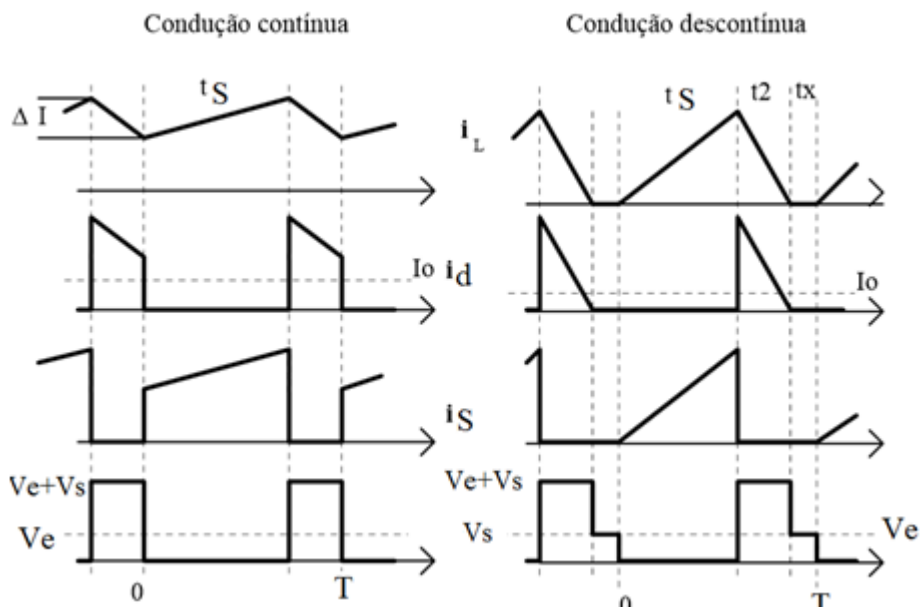


Figura 26: Modo de operação contínuo e descontínuo do conversor Buck/Boost
 Fonte: Elmano (2011).

No modo contínuo, no conversor *Buck/Boost*, quando o transistor conduz (durante t_{on}), ou seja, está ligado, tem-se a relação:

$$v_L = V_e \tag{18}$$

E quando o diodo conduz (durante $T - t_{on}$), com o transistor desligado, tem-se:

$$v_L = -V_s \tag{19}$$

Visto as três topologias dos conversores CC-CC, observa-se que a corrente de saída do conversor *Buck* aproxima-se de uma corrente contínua, diferentemente das outras topologias aqui estudadas que a corrente de saída é pulsada. Portanto, como é necessário fazer o controle de corrente, escolheu-se o conversor *Buck*.

2.9 O Indutor

O indutor é um elemento passivo capaz de armazenar e fornecer quantidades finitas de energia. Ao contrário de uma fonte ideal, ele não pode fornecer quantidades ilimitadas de energia ou manter o fornecimento de uma determinada potência média (RODRIGUES, 2006, p. 2). Nessa medida, segundo Pomilio (2010, p. 5), o adequado dimensionamento dos elementos magnéticos pode ser fator determinante para o funcionamento apropriado de um conversor CC-CC. A figura 27 ilustra o indutor a ser dimensionado.

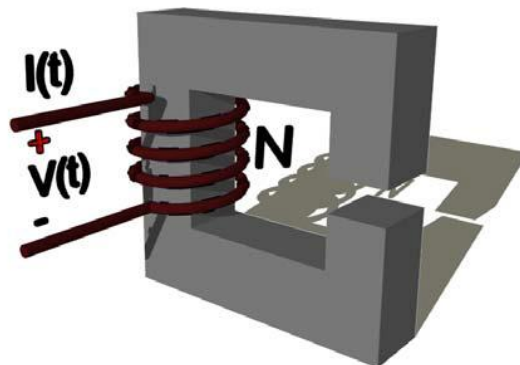


Figura 27: Indutor com elementos a dimensionar
Fonte: Teixeira (2008).

Para dimensionar o indutor, é necessário calcular os seguintes elementos:

- Cálculo do entreferro

Para calcular a extensão do entreferro, é preciso conhecer a indutância nos conversores CC-CC. Os cálculos da indutância mínima foram feitos nas sessões: Conversor *Buck*, Conversor *Buck* e Conversor *Buck-Boost* acima. Na sequência, apresenta-se o circuito magnético equivalente ao campo magnético no interior do núcleo de *ferrite*:

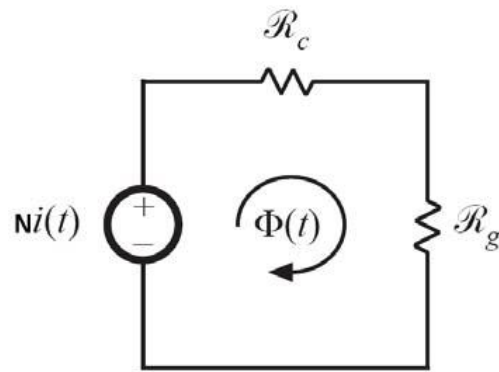


Figura 28: Circuito magnético equivalente do núcleo
Fonte: Teixeira (2008).

Para equacionar o circuito, faz-se necessário apresentar os seguintes parâmetros:

\mathfrak{R}_c é a relutância no caminho do entreferro ($espira^2/H$);

\mathfrak{R}_g é a relutância do entreferro ($espira^2/H$);

Φ é o fluxo magnético no núcleo (Wb);

N é o número de espiras;

lg é o comprimento do entreferro (m);

Ac é a área da seção do entreferro (m^2);

μ_0 é a permeabilidade magnética do ar ($H * m^{-1}$);

L é o valor da indutância (H);

B é o campo induzido no núcleo (T);

i é a corrente que passa pelo indutor (A).

O valor da largura do entreferro pode ser obtido através da equação:

$$lg = \frac{\mu_0 \times L \times i^2}{B^2 \times Ac} \quad (20)$$

- Cálculo do número de voltas:

A equação para obter o número de voltas é:

$$N = \frac{L \times i}{B \times Ac} \quad (21)$$

2.10 Os Transistores de Efeito de Campo

Os Transistores de Efeito de campo, conhecidos também como MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*), são amplificadores de sinais elétricos, podem ser usados também como chave e possuem 3 terminais: Porta, Fonte e Dreno (ou *Gate, Source e Drain*).

A tensão aplicada no terminal *Gate* do MOSFET controla a corrente a ser fornecida para o circuito que circulará entre o *Source* e o *Drain*.

Existem dois tipos de MOSFET, o canal N e o canal P que diferem pela polarização, como mostra a figura 29.

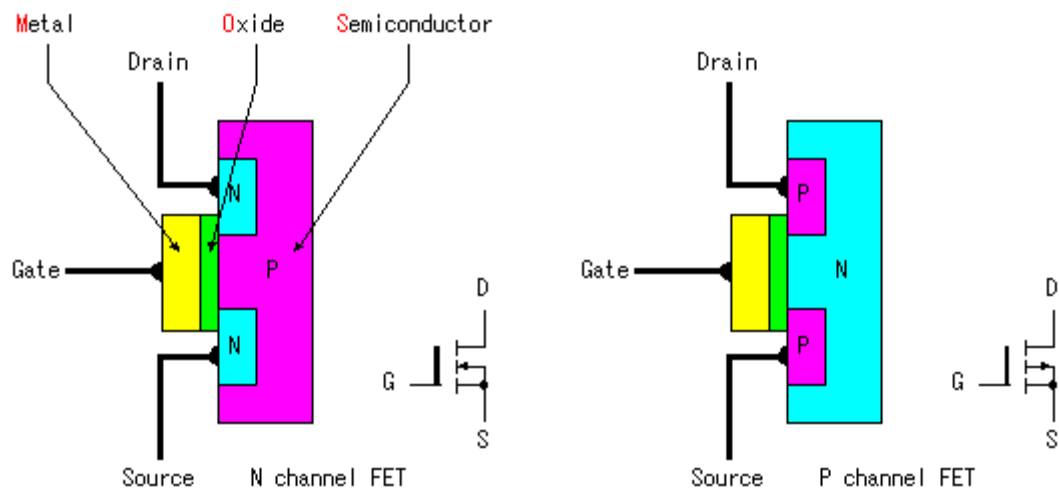


Figura 29: Polarização e simbologia do MOSFET
Fonte: LABDEGARAGEM (2016).

2.11 O Controle PID

Atualmente, o controlador PID é o mais difundido na indústria. Esse controlador combina as ações de controle proporcional, integral e derivativo, obtendo as vantagens individuais de cada uma dessas três ações de controle. A equação de um controlador PID é dada por (OGATA, 2003 apud NEVES JR.,2010):

$$u(t) = K_p \times [e(t) + \frac{1}{T_i} \times \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{d}{dt} e(t)] \quad (22)$$

Onde, K_p é o ganho proporcional, T_i é o tempo integrativo, T_d é o tempo derivativo e $e(t)$ é o sinal de erro na entrada do controlador no instante t . e a resposta ideal é obtida com a variação

das três ações de controle. O diagrama de blocos do controle PID está demonstrado na figura 30.

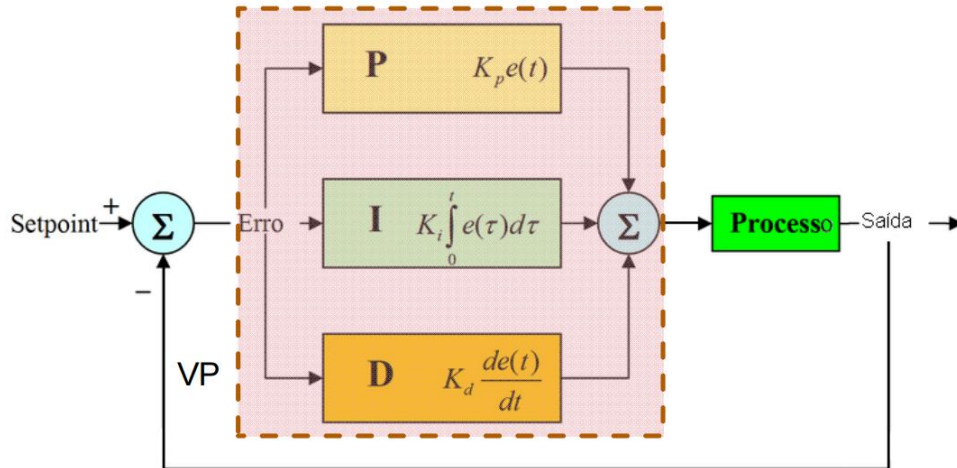


Figura 30: Diagrama de blocos do controle PID.
Fonte: Teixeira (2008).

A seguir, algumas características de cada ação de controle e uma tabela comparativa (OGATA, 2003 apud NEVES JR, 2010,38):

- Ação de controle proporcional: O controle proporcional é capaz de eliminar o erro, mas diante de uma entrada degrau apresentará um erro residual em regime permanente. Isso se explica pelo fato de o sinal de controle ser proporcional ao erro atuante. Se o erro atuante for nulo, implica em um sinal de controle nulo. Logo, para que o controlador continue atuando, não é possível eliminar o erro residual. Na figura 31, relaciona-se o sinal de controle $u(t)$ com o erro atuante $e(t)$.
- Ação de controle integral: Considerando-se apenas a ação de um controlador proporcional, pode-se detectar a existência de um erro residual, na resposta a um degrau unitário. Se incluirmos no controlador uma ação integral, é possível eliminar o erro residual. Em um controle integral, o sinal de saída do controlador (sinal de controle) em qualquer instante é a integral do erro atuante até o momento em questão. Dessa forma, ao contrário do controle proporcional, é possível ter um sinal de controle não-nulo, mesmo quando o erro atuante naquele momento for nulo. Na figura 31 podemos ver a relação entre o sinal de controle $u(t)$ e o erro atuante $e(t)$. Apesar de o controlador integral ser capaz de eliminar o erro residual ou o erro estacionário, o mesmo pode apresentar uma resposta oscilatória, cuja amplitude decresce lentamente, ou se torna crescente. Essas duas situações são indesejáveis.

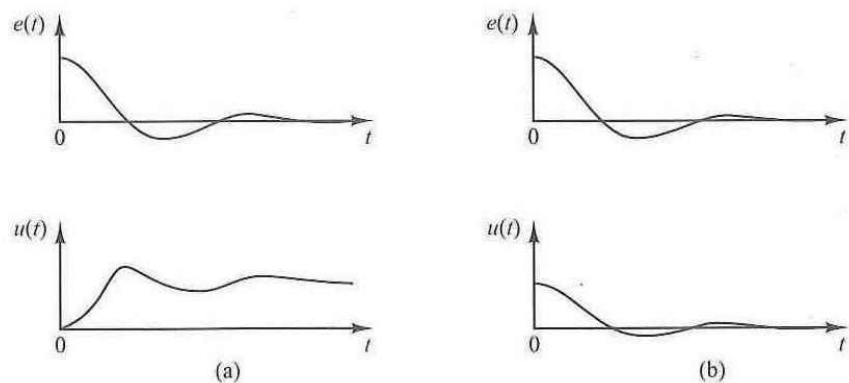


Figura 31: (a) Gráfico das curvas $e(t)$ e $u(t)$ que mostram sinal de controle não nulo quando o sinal de erro atuante é zero (controle integral); (b) gráfico das curvas $e(t)$ e $u(t)$ que mostram sinal de controle zero quando o sinal de erro atuante é zero
Fonte: (Ogata, 2003 apud Neves Jr, 2010 p. 39).

- Ação de controle derivativo: O controle derivativo, quando acrescentado ao controle proporcional, permite elevar a sensibilidade do controlador. O sinal de controle derivativo é proporcional à taxa de variação do erro atuante, permitindo que uma atuação preventiva sobre o erro atuante, evitando que o mesmo assuma valores muito altos. Essa característica permite um aumento de estabilidade do sistema.

Apesar de o controle derivativo não afetar diretamente o erro estacionário, ele permite o aumento no amortecimento do sistema. Consequentemente, permite um valor mais elevado do ganho K_p , resultando em maior precisão no regime permanente.

Considerando que o controle derivativo opera sobre a taxa de variação do erro atuante e não sobre o próprio erro atuante, não se utiliza esse método sozinho. Sempre estará agindo juntamente com o controle proporcional. Esse tipo de controle mostra-se altamente vulnerável a ruídos, reagindo violentamente aos mesmos e introduzindo flutuações ao elemento final de controle. Nestes casos, recomenda-se filtragem ou até mesmo evitar sua utilização.

No quadro 1 é feito o comparativo entre as ações de controle proporcional, integral e derivativo.

Quadro 1: Comparativo entre as ações de controle

	P	I	D
Saída Proporcional a	Erro	Magnitude e duração do erro	Taxa de variação do erro
Vantagem	Reduz o erro	Elimina <i>offset</i>	Aumenta a velocidade da resposta
Desvantagem	<i>Offset</i> (erro residual)	<i>Overshoot</i> e oscilação	Sensível a ruído
Para aumentar seu efeito	$+K_p$	$-T_i$ ou $+K_i$	$+T_d$, K_d
Objetivo	Reduzir o erro	Eliminar <i>offset</i>	Antecipar
Fase	Em fase	Atraso	Avanço
Frequência	Média	Baixa	Alta
Atua em	Erros	Erros lentos	Erros rápidos

Fonte: Top control (2005) apud Neves Jr (2010, p. 40)

2.12 Rastreamentos da Máxima Potência de Pico (MPPT)

Os parâmetros fornecidos pelos painéis solares não são constantes, devido à irradiação solar inconstante e às variações climáticas. Desta forma, é necessária a aplicação de uma técnica para rastrear o ponto de potência máxima fornecida pelos painéis solares. Conforme Neves Jr. (2010, p. 28), “basicamente, a arquitetura PPT incorpora um rastreador de máxima potência (MPPT) entre os painéis fotovoltaicos e a carga (incluindo a bateria), alterando dinamicamente os valores de tensão e corrente em sua saída”.

Sendo assim, a vantagem de se utilizar a técnica de MPPT é que ela rastreia a potência máxima produzida pelo painel fotovoltaico e, assim, o carregamento da bateria será mais rápido, aproveitando o máximo que o painel pode fornecer. Vale ressaltar que, dentre as nove técnicas de MPPT (Razão Cíclica Fixa; Tensão Constante; Perturbe e Observe; Perturbe e Observe Modificado; Condutância Incremental; Condutância Incremental Modificada; Método Beta; Oscilação do Sistema e Correlação de Ripple), neste projeto, abordar-se-á somente a Perturbe e Observe (P&O) devido eficiência e à combinação da simplicidade do método, pois depende somente de duas variáveis, tensão e corrente do painel fotovoltaico.

A figura 32 mostra graficamente a eficiência energética de cada método de MPPT:

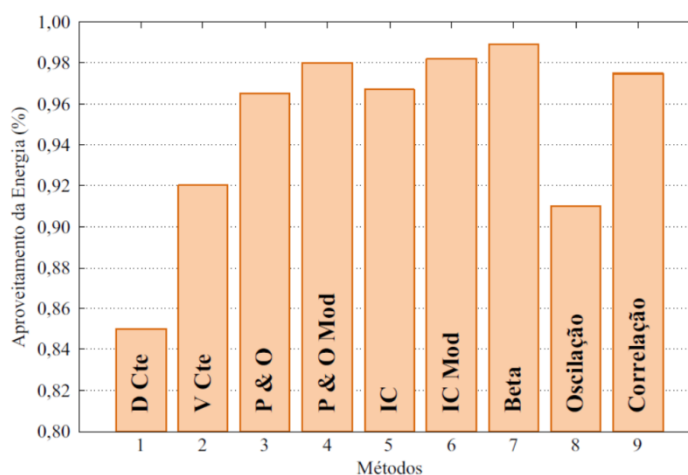


Figura 32: Eficiência dos métodos de MPPT
Fonte: Spaduto e Freitas (2013).

2.13 O método Perturbe e Observe

Conforme Neves Jr. (2010, p. 28), o método Perturbe e Observe introduz “uma perturbação no sistema através do regulador para observar seus efeitos no ponto de operação do painel fotovoltaico”. Logo, se o ponto de operação do painel fotovoltaico estiver à

esquerda da máxima potência rastreada, uma perturbação na tensão, através do rastreador, provocará uma variação no mesmo sentido da potência de saída do painel. Por outro lado, se o ponto de operação estiver à direita, a variação da potência será inversa à variação da tensão. Assim sendo, o rastreamento ponto de máxima potência continuará até que oscile em torno dele mesmo. A figura 31 ilustra o fluxograma do método.

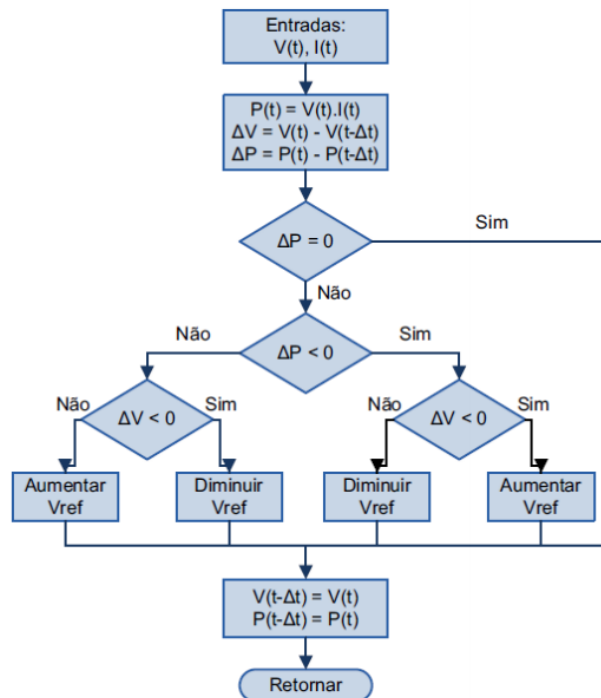


Figura 33: Fluxograma do Método P&O
Fonte: Neves Jr. (2010).

No fluxograma, demonstrado na figura 33, a perturbação da potência foi feita através da variação de tensão, neste trabalho a perturbação é feita através da variação de corrente.

2.14 O Arduino

Para McRoberts (2011, p. 22), o Arduino é um pequeno computador que se pode programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. Em geral, é denominado de plataforma de computação física ou embarcada, ou seja, trata-se de um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de *hardware* e *software*. Na figura 34 ilustra-se o Arduino Uno.

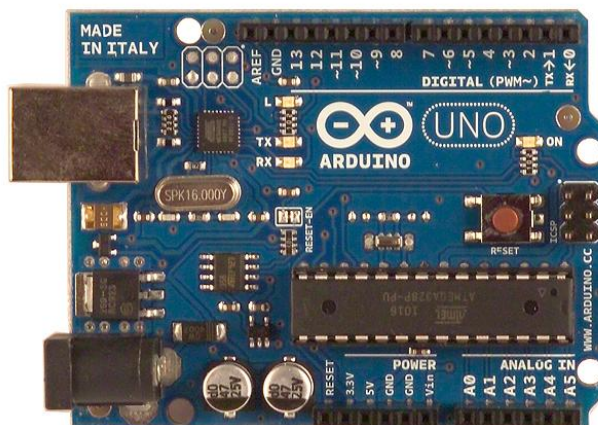


Figura 34: Arduino UNO
Fonte: Techtudo (2015).

O microcontrolador Arduino, utilizado no trabalho, possui uma única placa, um conjunto de *softwares* para programá-lo e um projeto simples de *hardware* livre. Sendo que está contido no *hardware* um processador Atmel AVR com suporte de entrada e saída, um cristal ou oscilador e um regulador linear de 5 volts. Ademais, a linguagem de programação é baseada na linguagem C e, para programar o Arduino, utiliza-se a IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) do Arduino, que é um *software* livre por meio do qual se escreve o código, utilizando a linguagem especificada, e, depois de programada, faz-se o *upload* para a placa.

A placa do Arduino UNO possui 14 pinos que operam com 5Volts e podem ser usados como entrada e saídas digitais. Para a interface analógico possui 6 entradas com resolução de 10 *bits* cada, ou seja, quando a entrada estiver em 5 Volts o valor da conversão será 1023 (10 *bits*).

Alguns pinos do Arduino Uno possuem funções especiais que são descritas a seguir: Os pinos 3, 5, 6, 9, 10 e 11 podem ser usados como saídas do PWM (*Pulse Width Modulation* ou Modulação por Largura de Pulso) que possuem 8 *bits* e é habilitada através da função *analogWrite()*. A comunicação serial é feita através dos pinos 0 e 1, Rx e Tx, respectivamente.

O componente principal do Arduino é o microcontrolador ATMEL ATMEGA328, cuja as características são: dispositivo de 8 bits da família AVR com arquitetura RISC avançada e com encapsulamento DIP28, 32 KB de Flash (mas 512 Bytes são utilizados para o *bootloader*), 2 KB de RAM e 1 KB de EEPROM. Pode operar a até 20 MHz, porém na placa Arduino UNO opera em 16 MHz, valor do cristal externo que está conectado aos pinos 9 e 10

do microcontrolador. Possui 28 pinos, sendo que 23 desses podem ser utilizados como I/O . A figura 35 exibe a pinagem do ATMEL ATMEGA328 e as funções especiais atribuídas em cada pino.

(PCINT14/RESET) PC6	1	28	PC5 (ADC5/SCL/PCINT13)
(PCINT16/RXD) PD0	2	27	PC4 (ADC4/SDA/PCINT12)
(PCINT17/TXD) PD1	3	26	PC3 (ADC3/PCINT11)
(PCINT18/INT0) PD2	4	25	PC2 (ADC2/PCINT10)
(PCINT19/OC2B/INT1) PD3	5	24	PC1 (ADC1/PCINT9)
(PCINT20/XCK/T0) PD4	6	23	PC0 (ADC0/PCINT8)
VCC	7	22	GND
GND	8	21	AREF
(PCINT6/XTAL1/TOSC1) PB6	9	20	AVCC
(PCINT7/XTAL2/TOSC2) PB7	10	19	PB5 (SCK/PCINT5)
(PCINT21/OC0B/T1) PD5	11	18	PB4 (MISO/PCINT4)
(PCINT22/OC0A/AIN0) PD6	12	17	PB3 (MOSI/OC2A/PCINT3)
(PCINT23/AIN1) PD7	13	16	PB2 (SS/OC1B/PCINT2)
(PCINT0/CLKO/ICP1) PB0	14	15	PB1 (OC1A/PCINT1)

Figura 35: Pinagem ATmega328 usado no Arduino UNO
Fonte: datasheet ATmega (2016).

Outra função importante do microcontrolador é a função *Timer*, que é um contador, funcionando como um relógio, que é incrementado a cada intervalo de tempo configurado e possui algumas aplicações, como por exemplo, contar tempo e medir a duração de certos eventos.

O ATmega328 possui 3 *Timers*: *Timer1* que é um contador de 16 *bits* (conta de 0 a 65535) e *Timer0* e *Timer2* que são contadores de 8 *bits* (contam de 0 a 255). Neste projeto o contador utilizado foi o *Timer0* por ter uma contagem de tempo maior e assim é possível obter uma frequência mais rápida de chaveamento no controlador de carga.

O *Timer1* está disponível apenas no pino 9, como ilustra a figura 35, que tem a função PCINT1, OC1A e o PWM.

3 METODOLOGIA

Diante dos objetivos deste projeto, a metodologia utilizada na pesquisa em questão é constituída de alguns passos necessários ao trabalho acadêmico-científico, que são: escolha do tema, pesquisa bibliográfica, comparação entre conversores aplicados no melhoramento de aproveitamento de energia, planejamento e montagem do conversor, realização dos testes e divulgação dos resultados.

No que concerne ao primeiro passo, a escolha do tema, este foi realizado com base no interesse em desenvolver um controlador de carga para a bateria de um sistema fotovoltaico. Esse interesse se deve à necessidade atual de propor soluções alternativas para a produção de energia e à redução de custos com manutenção e troca de baterias.

Já no que se refere ao segundo passo, pesquisa bibliográfica, esse consistiu em estudar os projetos, pesquisas, artigos e livros que contenham informações sobre os tópicos abordados neste projeto, de modo a melhor compreender o que já foi empreendido nessa linha de pesquisa.

O estudo e dimensionamento do sistema proposto neste projeto teve como base o painel fotovoltaico ilustrado na figura 36, especificado na figura 37 e os dados utilizados que foram utilizados estão descritos na tabela 4.



Figura 36: Painel fotovoltaico Kyocera 80W Policristalino

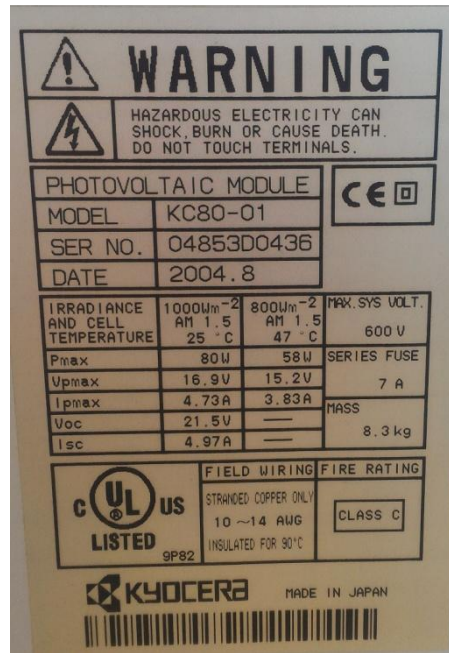


Figura 37: Especificações técnicas do painel fotovoltaico Kyocera

Tabela 4: Especificações Técnicas do painel fotovoltaico com irradiação máxima

Especificações Técnicas do Painel fotovoltaico	
Irradiância e temperatura da célula	10000Wm ² e 25°C
P _{máx}	80W
V _{pmax}	16.9V
I _{pmax}	4,73 A
V _{oc}	21,5V
I _{sc}	4,97 A

A bateria utilizada para os testes, figura 38, é do fabricante Multitoc com tensão de entrada de 12 Volts e corrente máxima de 7 Ampères.



Figura 38: Bateria Multitoc

3.1 O sistema de controle

Para alcançar o objetivo principal deste trabalho, ou seja, desenvolver um controlador de carga de bateria, chegou-se ao raciocínio esboçado no diagrama representativo da figura 39, onde V_p e I_p são variáveis que representam, respectivamente, a tensão e a corrente do painel solar, I_{ref} é a corrente a ser controlada e V_{bat} e I_{bat} representam, na sequência, tensão e corrente da bateria.

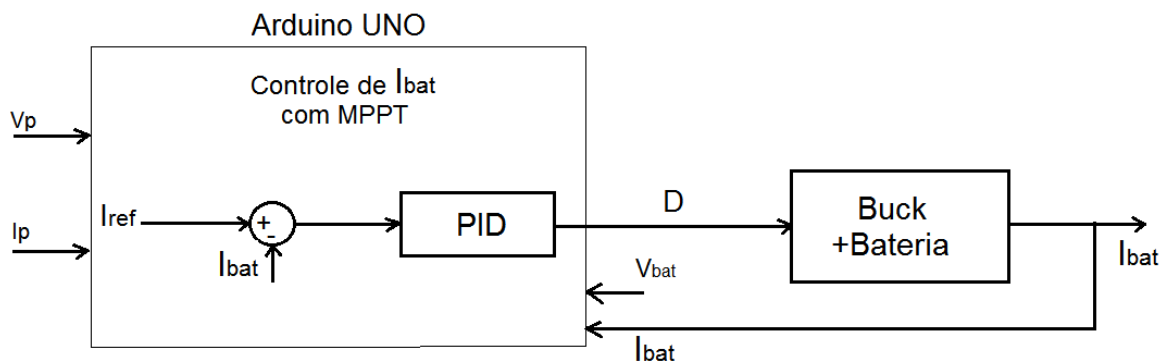


Figura 39: Diagrama representativo do sistema

O microprocessador Arduino UNO recebe as variáveis de tensão e corrente do painel fotovoltaico através de entradas analógicas, por meio do algoritmo, faz o controle PID e calcula e rastreia o ponto de máxima potência. Após este processo, é enviado para a saída um sinal de PWM variando o ciclo de trabalho D para o conversor *Buck*.

3.2 Escolha, dimensionamento e montagem do conversor *Buck*

A comparação entre conversores aplicados no melhoramento de aproveitamento de energia, foi realizada a partir da análise bibliográfica dos melhores controles utilizados a fim de se obter o melhor ponto de potência máxima. Escolheu-se, portanto, o conversor Buck que é um abaixador de tensão de saída para proteger a bateria contra sobrecarga, ou seja, quando o painel fotovoltaico oferecer uma tensão superior à tensão de entrada da bateria, o conversor atua abaixando a tensão para evitar que essa tensão chegue na bateria. Portanto,

$$\text{Conversor Buck} \rightarrow V_{saída} < V_{entrada}$$

Sendo assim, segue o dimensionamento dos valores mínimos dos componentes do conversor Buck com frequência de 10kHz:

- Corrente de carga nominal, utilizando se a equação 8:

$$i_n = \frac{80W}{16,9V} = 4,73A$$

- Razões cíclicas máxima e mínima, utilizando-se a equação 9:

$$D_{m\acute{a}x} = \frac{12}{12} = 1 \quad D_{m\acute{i}n} = \frac{12}{16,9} = 0,71$$

- Valor mínimo de indutância, utilizando-se a equação 10:

$$L = \frac{(16,9 - 12) \times 1}{0,40 \times 4,73 \times 10 \times 10^3} = 259\mu H$$

- Valor mínimo de capacitância, utilizando-se a equação 11:

$$C = \frac{4,73 \times (1 - 0,71)}{12 \times 10 \times 10^3} = 114\mu F$$

A partir desses cálculos fez-se a simulação ilustrada na figura 40 e adicionou-se um capacitor de 1000 μF para que, quando o MOSFET é chaveado, a corrente injetada consiga passar pelo indutor.

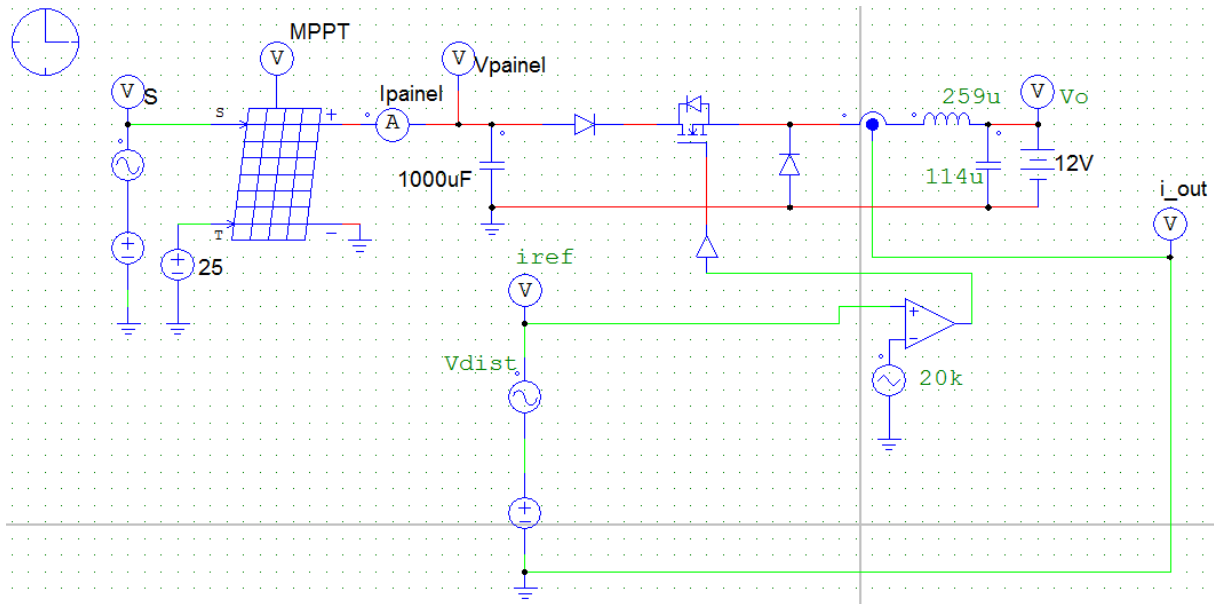


Figura 40: Simulação do conversor Buck no software PSIM

No gráfico da simulação do conversor *Buck*, figura 41, observou-se que o conversor consegue modular a corrente no indutor, de acordo com a variação do *duty cycle*.

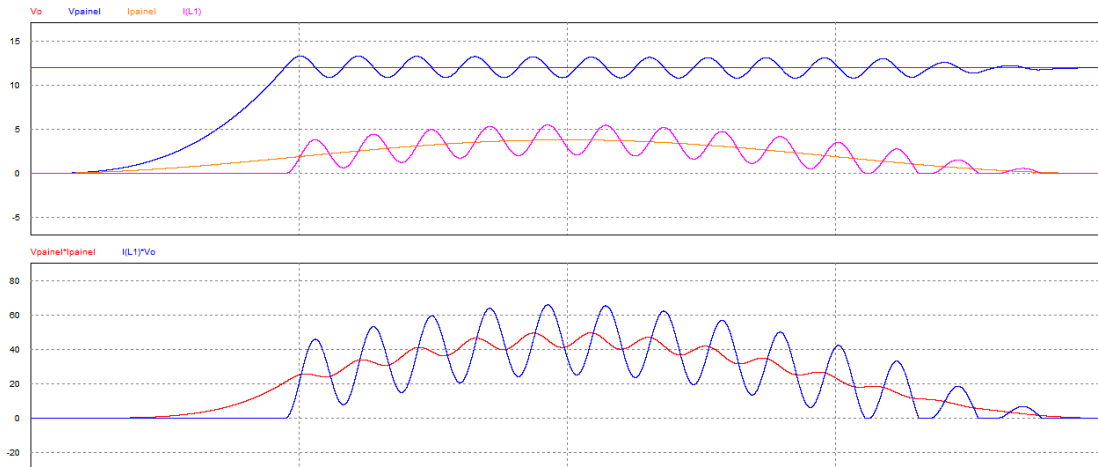


Figura 41: Gráfico gerado na simulação do conversor Buck no software PSIM

O indutor utilizado no projeto possui $400 \mu\text{H}$, pois já se encontrava fabricado na instituição.

O painel fotovoltaico fornece uma tensão que varia de 0 a $21,5 \text{ Volts}$, que será limitada no microcontrolador para, no máximo, 14 Volts para a entrada da bateria. Porém, como a entrada analógica no microcontrolador é limitada a 5 Volts é necessário utilizar um divisor de tensão para obter a variação de 0 a 5 Volts . Segue a equação deste divisor.

$$V_{saída} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{saída} \quad (23)$$

Primeiramente o cálculo foi feito para limitar a tensão de saída do painel fotovoltaico de 0 a 15 Volts para 0 a 5 Volts . Mas, visto que a tensão de circuito aberto do painel alcança $21,5 \text{ Volts}$, também foi feito o cálculo para a limitar a tensão de 0 a 25 Volts para 0 a 5 Volts .

Segue o cálculo fixando $R_1 = 5k\Omega$.

$$5V = \frac{R_2}{5k\Omega + R_2} \times 15$$

$$R_2 = 10k\Omega$$

$$5V = \frac{R_2}{5k\Omega + R_2} \times 25$$

$$R_2 = 20k\Omega$$

Portando, utilizou-se um resistor $R_1 = 5k\Omega$ de dois Resistores de $10k\Omega$ em série para representar R_2 .

Para a fabricação da placa, simulou-se o circuito no software Proteus, como mostra a figura 42, e transferiu-se os componentes para o software ARES ilustrado na figura 43.

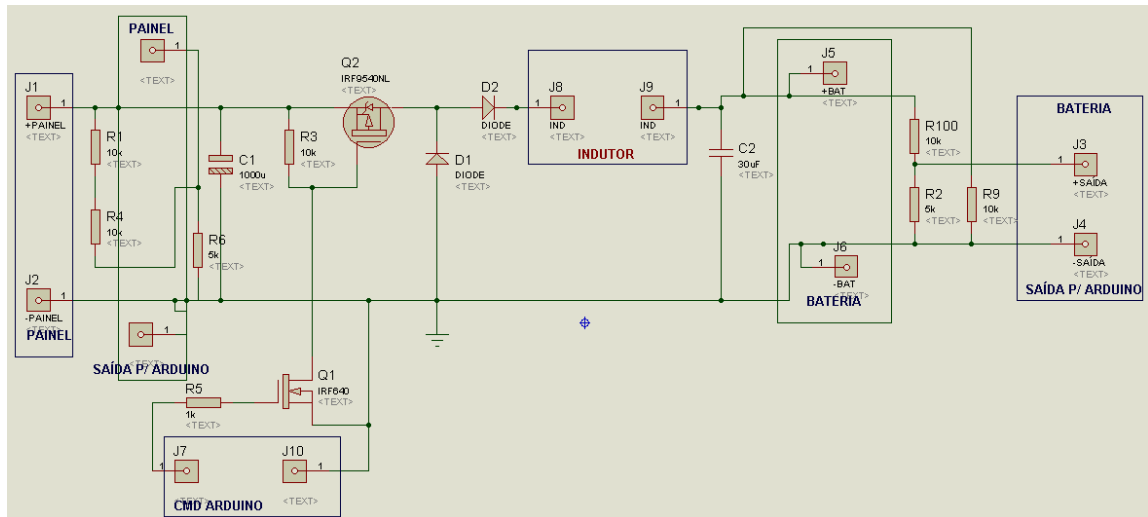


Figura 42: Simulação da placa do conversor Buck no ISIS - Proteus

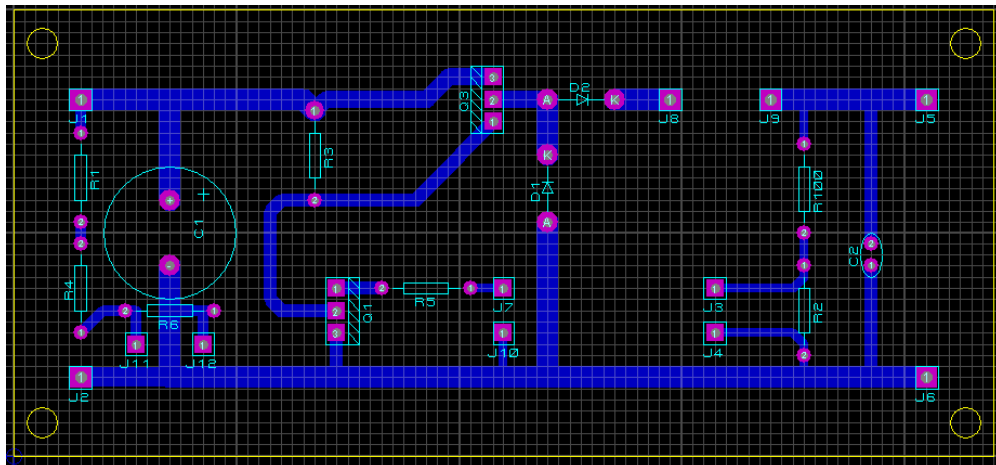


Figura 43: Desenho do ARES - Proteus para circuito impresso

Os componentes utilizados na fabricação da placa são:

- 3 resistores de 10k Ω ;
- 2 resistores de 5k Ω ;
- 1 resistor de 1k Ω ;
- 2 diodos rápidos, pois é o mais recomendável visto que a frequência de chaveamento é alta.
- 1 MOSFET tipo P;
- 1 MOSFET tipo N;
- 1 capacitor de 1000 μ F;
- 1 capacitor de 100 μ F
- 1 dissipador de calor;

Após o desenho do circuito impresso e a seleção dos componentes foi confeccionada a placa eletrônica do conversor *Buck*.

A placa do circuito, fornecida em formato PDF do ARES, foi impressa em uma impressora a *laser*, no papel fotográfico a placa de circuito impresso, ilustrada na figura 44.

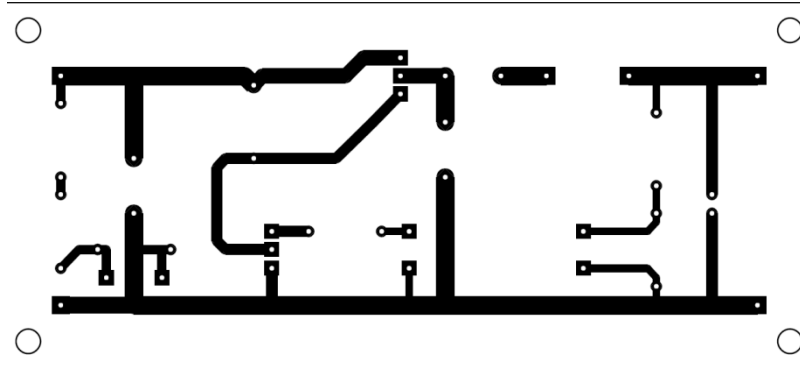


Figura 44: Circuito impresso do conversor Buck

Para transferir a tinta do papel impresso para a placa de cobre, utilizou-se uma prensa térmica e depois a placa passou pelos processos de corrosão do cobre, furação e soldagem dos componentes.

Após a fabricação da placa foram realizados testes e constatou-se que, para diminuir ruídos na corrente de saída, foi necessário adicionar dois resistores ($0,33\Omega$ e $0,47\Omega$) em paralelo resultando em uma resistência equivalente de $0,19\Omega$ na saída da tensão do capacitor para a bateria e um resistor de $10k\Omega$ no divisor de tensão da bateria para o arduino.

A placa do conversor Buck está demonstrada na figura 45:

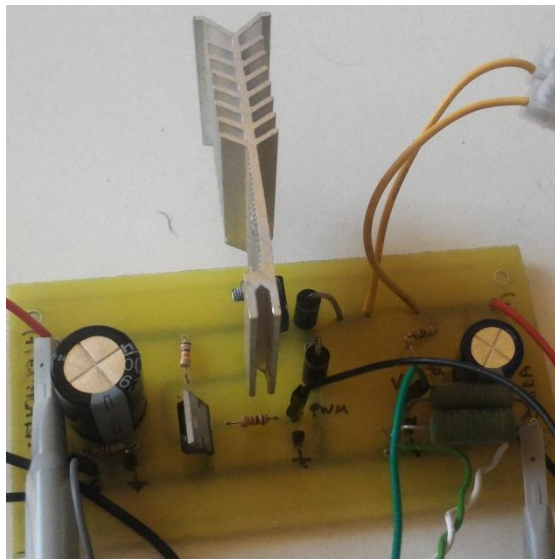


Figura 45: Placa do conversor Buck

O indutor utilizado de $400\mu H$, ilustrado na figura 46, foi anexado na placa após a fabricação desta.



Figura 46: Indutor utilizado de $400\mu\text{H}$

Para aquisição do valor da corrente do painel fotovoltaico utilizou-se o sensor de efeito hall para a medição de até 5 Ampères de corrente.



Figura 47: sensor de efeito hall
Fonte: USINAINFO (2016).

Após testes realizados com a placa e o sensor de efeito hall, figura 47, constatou-se que a leitura de corrente do sensor varia de -5 Ampères até $+5\text{ Ampères}$ e é enviada para o Arduino com sinal de tensão de 0 a 5 Volts, ou seja, quando a corrente for -5 Ampères o sinal de tensão enviado para o microcontrolador será 0, quando a corrente medida for 0, o sensor envia 2,5 Volts e quando a corrente for 5 Ampères o sensor envia 5 Volts na saída. Porém a corrente medida é somente positiva, portanto restou somente a variação de tensão de 2,5 Volts até 5 Volts para a leitura dos 5 Ampères.

O microcontrolador converte o sinal recebido do sensor de hall na entrada analógica (A3) para um número de 10 bits (0 a 1023), porém como a corrente recebida é positiva o valor convertido pelo Arduino varia somente 512 bits.

3.3 O Controle PID

O controle PID, neste projeto, foi realizado pelo método de Ziegler-Nichols, aumentando o ganho proporcional até o ganho crítico (K_p), considerando apenas o controle

proporcional, e ajustando os demais parâmetros em seguida, tendo como base o circuito de simulação do PSIM ilustrado na figura 48.

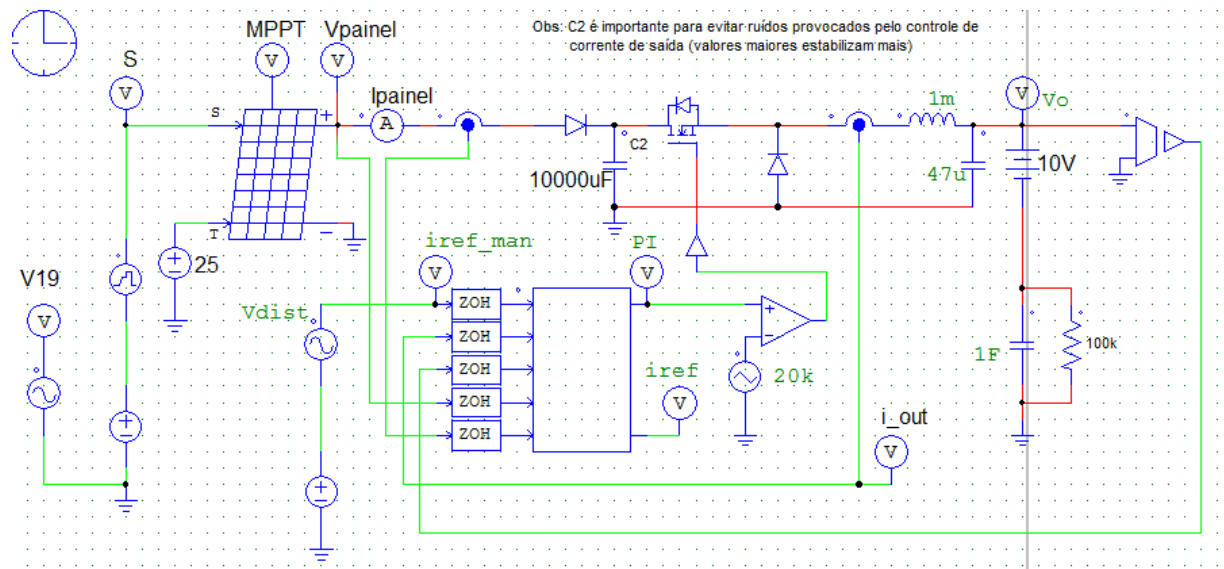


Figura 48: Simulação PSIM

Para determinar os parâmetros do controlador, pelo método do período crítico de Ziegler-Nichols, o sistema foi colocado em malha fechada com apenas o controlador proporcional.

Para evitar interferências do painel solar, foi colocada uma fonte de tensão constante na entrada do conversor Buck e, da mesma forma, a bateria foi substituída por uma carga resistiva.

Os valores do ganho K_p foram incrementados até que o sistema entrasse em oscilação constante, como mostra a Figura 49. Os valores encontrados para o ganho crítico (K_c) e para o período crítico (T_c), para os quais o sistema entrou em oscilação foram:

$$K_c = 34.0 \quad T_c = 5.0682261e-004 \approx 0.5e^{-3}$$

Com os valores de K_c e T_c foram calculados os parâmetros iniciais para o controlador PID, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros para a sintonia do PID

	K_p	T_i	K_i	T_d
P	$0,5K_c = 17$	-	-	-
PI	$0,45K_c = 15,3$	$T_c/1,2 = 0,42e^{-3}$	2400	-
PID	$0,6K_c = 20,4$	$T_c/2 = 0,25e^{-3}$	4000	$T_c/8 = 0,0000625$

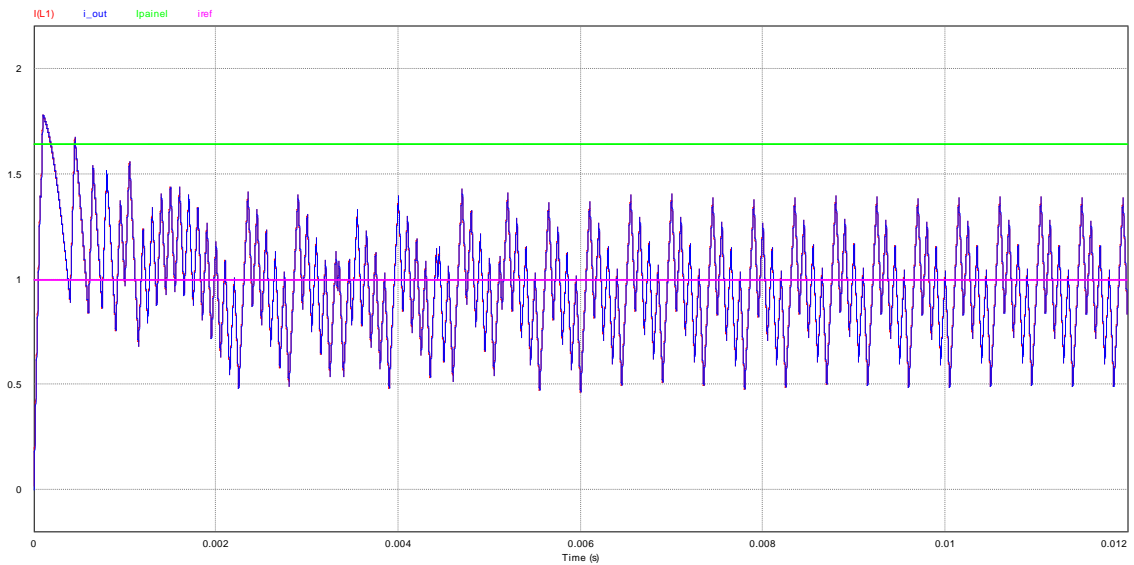


Figura 49: Oscilação do sistema com amplitude constante

Os valores finais do controlador PID foram determinados por meio de testes, chegando aos seguintes valores:

$$K_p = 10,0$$

$$K_i = 0,25$$

$$K_d = 0,0001$$

3.4 O Método Perturbe e Observe do MPPT

Para utilizar esse método, partiu-se do princípio de que a corrente controlada é a variável a ser perturbada e a tensão é constante. Portanto, o fluxograma desenvolvido foi o que segue na figura 50.

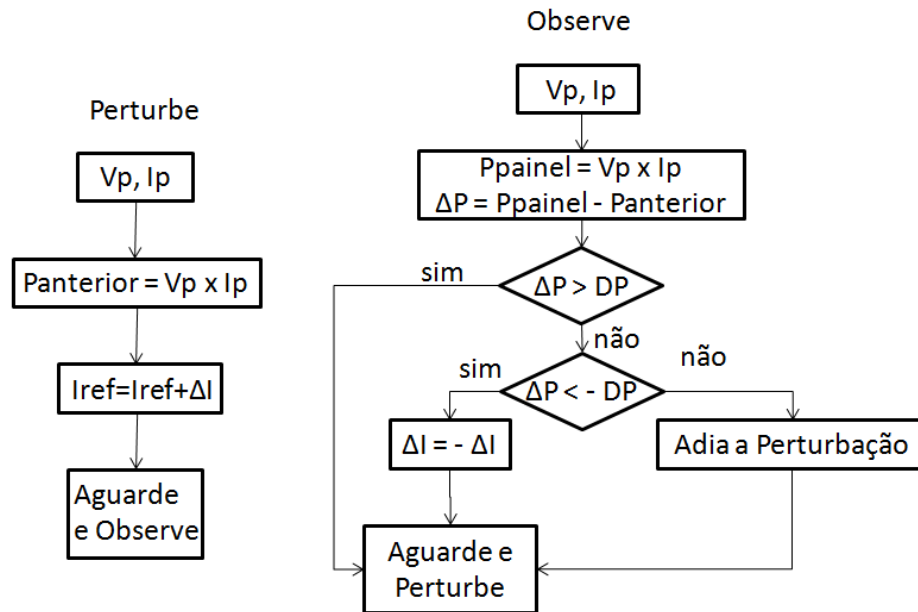


Figura 50: Fluxograma do método P&O

Onde V_p , I_p , e P_p são os valores de tensão, corrente e potência do painel, respectivamente. I_{ref} é a variável de corrente que perturba o sistema e a variação de potência que é observada deve ser maior que 5% do valor da potência máxima do painel para que seja tomada uma decisão sobre nova perturbação, portanto superior a 0,4 *Watts*.

Após obter o fluxograma, foi desenvolvido a programação em C para o Arduino com a técnica perturbe e observe.

3.5 A programação do Arduino

Com o fluxograma do método Perturbe o Observe e com os primeiros parâmetros de controle PID, foi desenvolvida a programação do microcontrolador. Utilizamos o *Software* ISIS-Proteus para simular o painel solar e o circuito do conversor, a imagem ilustrativa da simulação segue na figura 51.

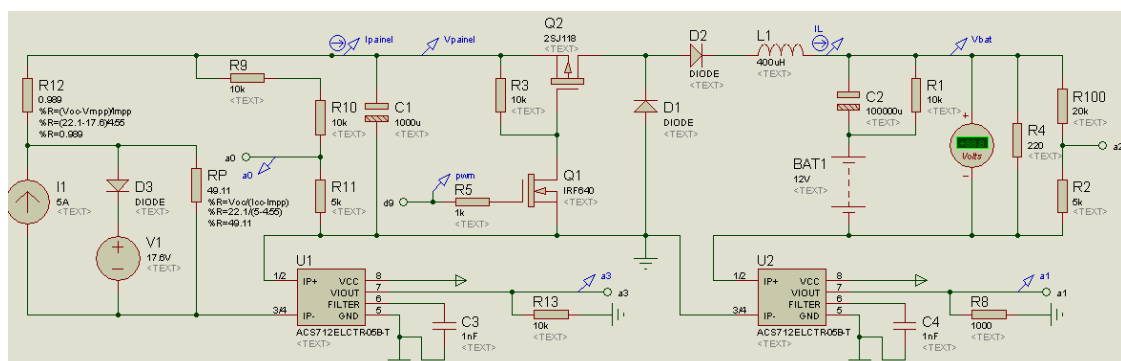


Figura 51: Circuito para completa simulação do sistema.

O fluxograma da figura 52 ilustra o método P&O e as limitações de tensão e corrente para a proteção de sobrecarga da bateria que foram programados no microcontrolador, onde tensão e corrente do painel e da bateria são as entradas do sistema.

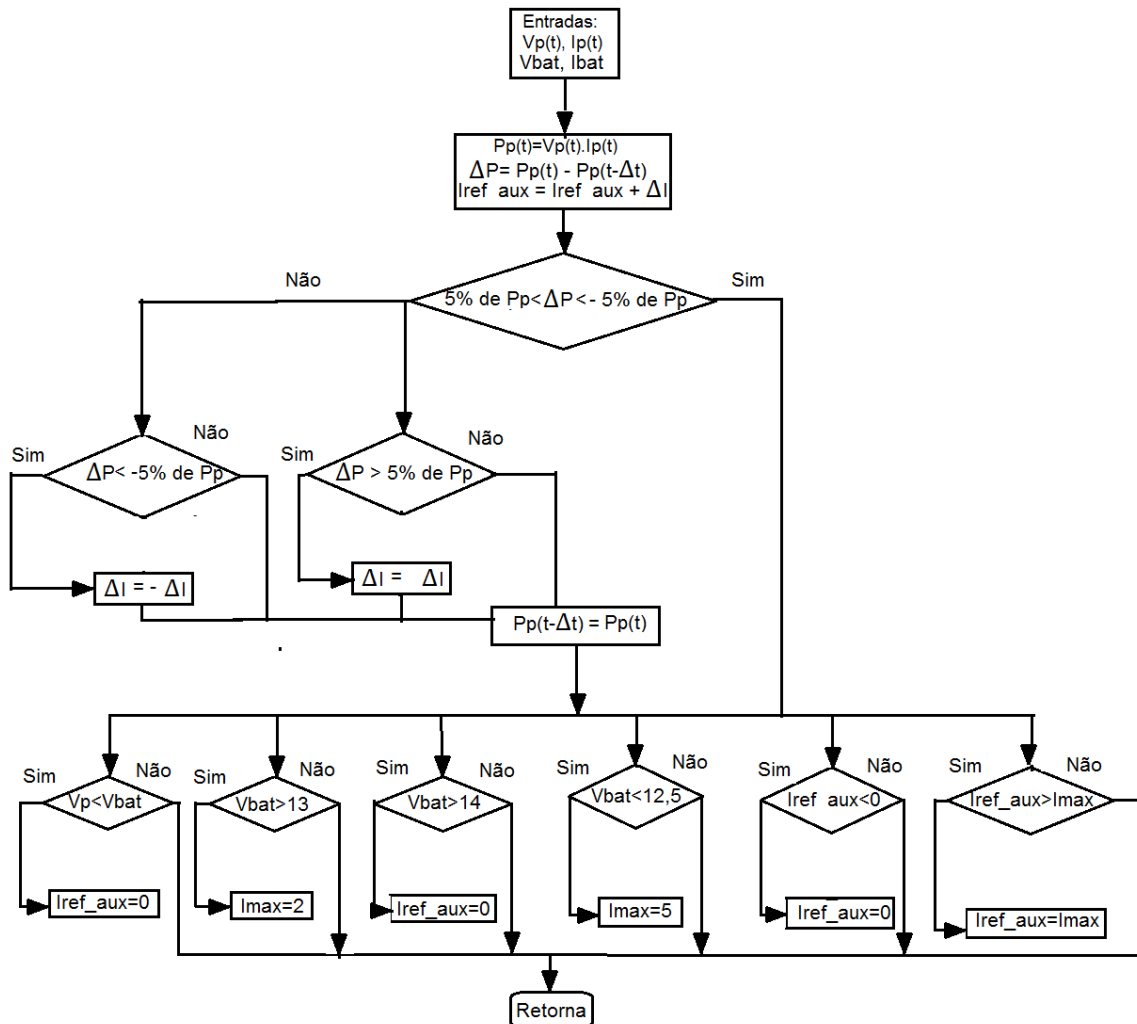


Figura 52: Fluxograma método P&O e proteção da bateria

Para simular o microcontrolador Arduino UNO, figura 53, adicionou-se a biblioteca BOLGEMBARCAD.LIB no Proteus.

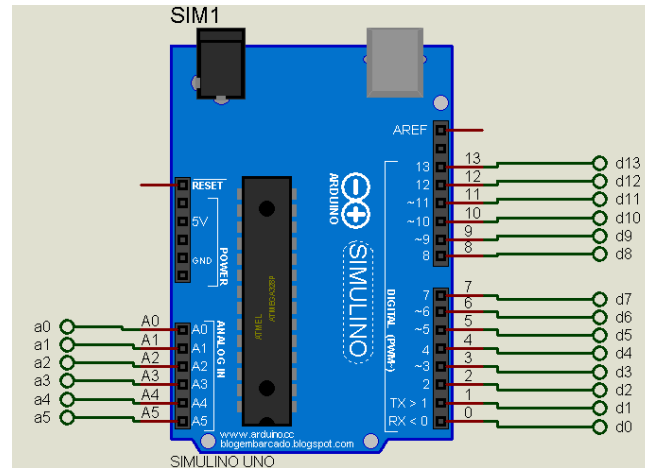


Figura 53: Arduino UNO simulado do ISIS – Proteus

O painel solar foi simulado de acordo com o modelo elétrico citado na revisão bibliográfica e os dados do painel solar, segue o dimensionamento:

- Resistência em série, calculada através da equação 1:

$$R_S = \frac{21,5 - 16,9}{4,37} = 1,05\Omega$$

- Resistência em Paralelo, calculada através da equação 2:

$$R_P = \frac{21,5}{4,97 - 4,73} = 89,6\Omega$$

A programação, feita na IDE (Ambiente Integral de Desenvolvimento) do Arduino contempla os seguintes passos:

- Declaração das variáveis;
- Configuração da interrupção do *Timer 1*;

1º - Operação em Phase and Frequency correct PWM, figura 54;

A escolha desta operação foi feita, pois a leitura da corrente será feita no topo da interrupção (Interrupt on TOP), evitando assim os ruídos na corrente causados pelo chaveamento do MOSFET.

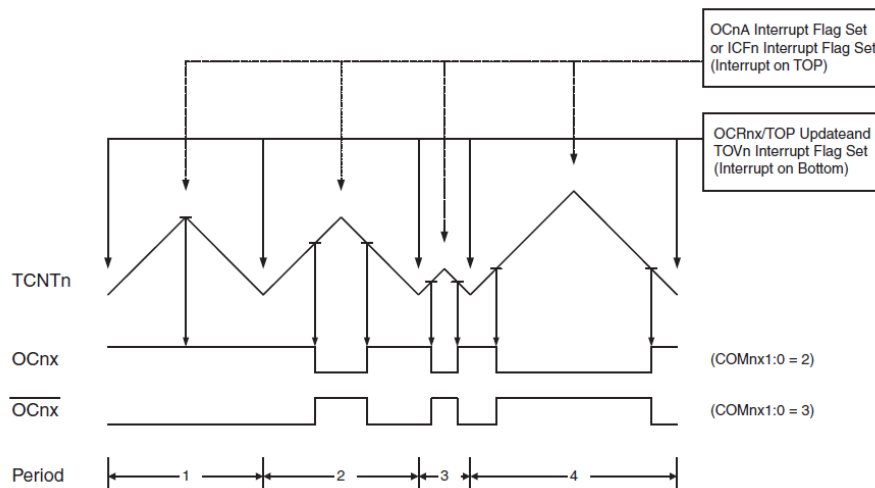


Figura 54: Phase and Frequency correct PWM.
Fonte: datasheet ATmega328

E, além disso, o topo (ou TOP) pode ser configurado. Sendo assim, a frequência do PWM é melhor controlada. A equação que define a frequência de oscilação do PWM é:

$$f_{O_{PWM}} = \frac{f_{clk_{I/O}}}{2 \times N \times TOP} \quad (24)$$

Onde, $f_{clk_{I/O}}$ é a frequência do cristal do arduino, ou seja 16MHZ e o N é o prescaler (1, 8, 64, 256, ou 1024).

Neste projeto, definiu-se o *prescaler*(dispositivo que reduz uma frequência por um fator predeterminado) igual a 1, o valor do TOP igual a 1000 e fez-se os testes com frequência de 8kHz, 10kHz e 20kHz.

- Configurou-se os pinos de saída, observando que a saída do controle de chaveamento por PWM está no Pino 9, pois é o pino com a função do *Timer 1*.
- As entradas analógicas foram configuradas para receberem os valores de Tensão e Corrente do painel fotovoltaico nos pinos A0 e A3, respectivamente, e Tensão e Corrente da bateria nos pinos A2 e A1, na sequência. E depois foi feita a conversão das variáveis recebidas nas entradas analógicas em 10 *bits*.
- O próximo passo da programação é o método MPPT que foi feita tal como descrito no fluxograma da figura 49.
- Para a proteção contra subtensão do painel solar, ou seja, quando a tensão da bateria for maior do que a tensão do painel solar fotovoltaico, a corrente que está sendo controlada (I_{ref_aux}) vai para 0, pois não há necessidade de chaveamento nesta situação.

- Quando a tensão da bateria alcança 13*Volts*, ou seja, cerca de 92% de sua carga máxima, a corrente para o carregamento diminui para 2 *Ampères* e quando a tensão está abaixo de 12,5 *Volts* a corrente para o carregamento aumenta para 5 *Ampères*.
- A proteção contra sobretensão na bateria, ou seja, quando a tensão da bateria estiver acima de 14 *Volts* (aproximadamente 100% carregada), é feita zerando a corrente de controle ($I_{ref_aux} = 0$).
- Para garantir a limitação da corrente de carga da bateria e corrente de referência negativa, a corrente de controle (I_{ref_aux}) é limitada entre 0, caso for negativa e 5 *Ampères*.
- E, por último, é feito o controle da corrente de carga da bateria através do PID, onde o erro é a corrente de controle (I_{ref_aux}) menos a corrente controlada (corrente da bateria I_{bat}).

A programação que foi descrita anteriormente pode ser observada no apêndice 1 deste projeto.

Para calibrar os valores lidos nas entradas analógicas do Arduino UNO, foi necessário utilizar uma programação auxiliar para receber os valores de tensão e de corrente do painel fotovoltaico e da bateria, convertê-los de 0 a 5 *Volts* para 0 a 1023 e enviá-los pela serial utilizando os pinos RX e TX do microcontrolador. Com auxílio de uma fonte de tensão variável e de um osciloscópio foi possível medir as tensões, nos divisores resistivos, de saída do painel fotovoltaico e de entrada da bateria e verificar se os dados recebidos pelo Arduino UNO foram convertidos corretamente.

As variáveis de tensão e corrente do painel e da bateria, que foram convertidas em 10 *bits*, são exibidas na serial nos respectivos valores reais, e para que isso ocorra, chegou-se nas seguintes equações de conversão.

Conversão da tensão do painel fotovoltaico e da bateria de 10 *bits* para 0 a 25 *Volts*:

$$V_p = \frac{V_{painel} * 25}{1023} \quad (25)$$

$$V_p = V_{painel} \times 0.0244379276637341$$

$$V_{bat} = \frac{V_{bateria} * 25}{1023} \quad (26)$$

$$V_{bat} = V_{bateria} \times 0.0244379276637341$$

Conversão da corrente do painel fotovoltaico e da bateria de 10 *bits* para 0 a 5 *Ampères*:

$$I_p = \frac{(I_{painel} - 512) * 5}{511} \quad (27)$$

$$I_p = (I_{\text{painel}} - 512) \times 0.0097847358121331$$

$$I_{\text{bat}} = \frac{(I_{\text{bateria}} - 512) * 5}{511} \quad (28)$$

$$I_{\text{bat}} = (I_{\text{bateria}} - 512) \times 0.0097847358121331$$

Os dados de tensões medidas e os dados convertidos podem ser verificados na tabela 6.

Tabela 6: Tensão medida no conversor e Tensão convertida no Arduino

Tensão da fonte (V)	Tensão do painel medida (V)	Tensão da bateria medida (V)	Tensão do painel no Arduino (V)	Tensão da bateria no Arduino (V)
0	0	0	0	0
5	0,990	1,011	5,06	5,13
10	2,011	2,046	10,17	10,24
12	2,413	2,453	12,24	12,32
14	2,820	2,870	14,20	14,35
15	3,036	3,081	15,25	15,32
20	4,041	4,081	20,33	20,48
25	5,066	5,111	25	25

Os dados de correntes medidas e os dados convertidos podem ser verificados na tabela 7:

Tabela 7: Corrente medida no conversor e Corrente convertida no Arduino

Corrente da fonte (A)	Corrente do painel medida (A)	Corrente da bateria medida *5 (A)	Corrente do painel no Arduino (A)	Corrente da bateria no Arduino (A)
0	2,52	0	0	0
0,5	2,633	0,455	0,49	0,45
1	2,749	1,055	0,95	0,94
1,5	2,850	1,610	1,42	1,44
2	2,965	2,185	1,88	1,96
2,5	3,061	2,815	2,37	2,46
3	3,166	3,350	2,81	3
0	2,52	0	0	0

Após as simulações, elaboração do método perturbe e observe, controle PID, programação do Arduino UNO e calibração das variáveis, realizamos testes e obtivemos os resultados que serão demonstrados e discutidos a seguir.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Simulações

Seguindo todos os passos da metodologia, foram realizados os testes que seguem.

Nos gráficos da figura 55 foi simulado um sistema, tal como na figura 40, com frequência de chaveamento do MOSFET de 20kHz, ou seja, um pulso a cada 50 milisegundos.

O método P&O perturba a corrente de referência positivamente até que o painel consiga alcançar o ponto de máxima potência e então percebe-se que a corrente de saída, que circula pelo indutor, acompanha a corrente de referência, manipulada pelo MPPT. O sistema se mantém estável, portanto, os parâmetros do controle PID estão sintonizados corretamente.

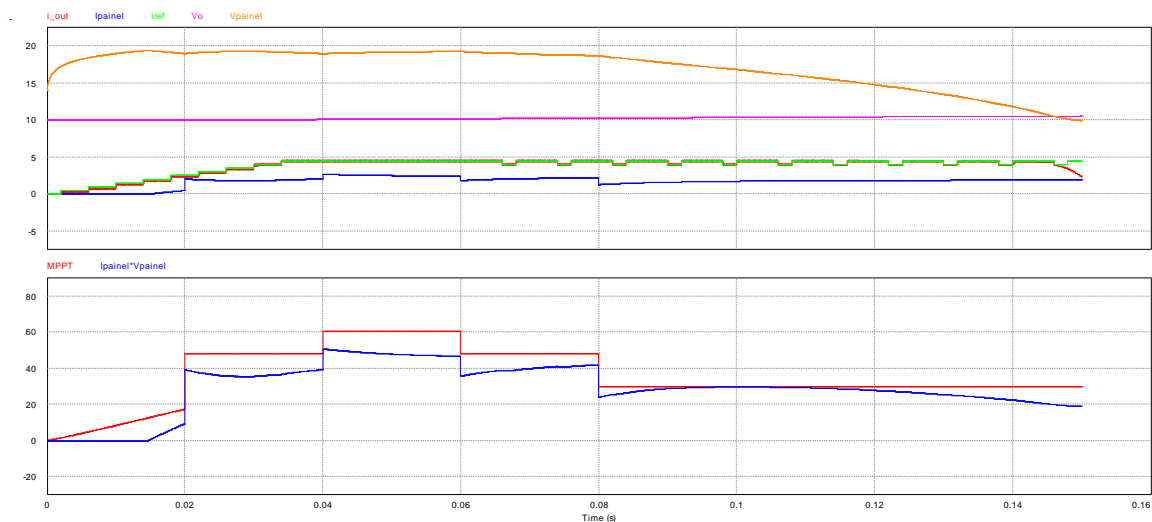


Figura 55: Simulação PSIM do controlador de carga com frequência de 20kHz

Já na figura 56 é apresentada a simulação feita com o chaveamento do MOSFET na frequência de 8kHz, frequência esta configurada para o Arduino UNO devido às limitações do microcontrolador. Ao final da simulação observa-se uma oscilação, mas esta não é devido a instabilidade do controle e sim devido à troca de energia entre o indutor e o capacitor de saída.

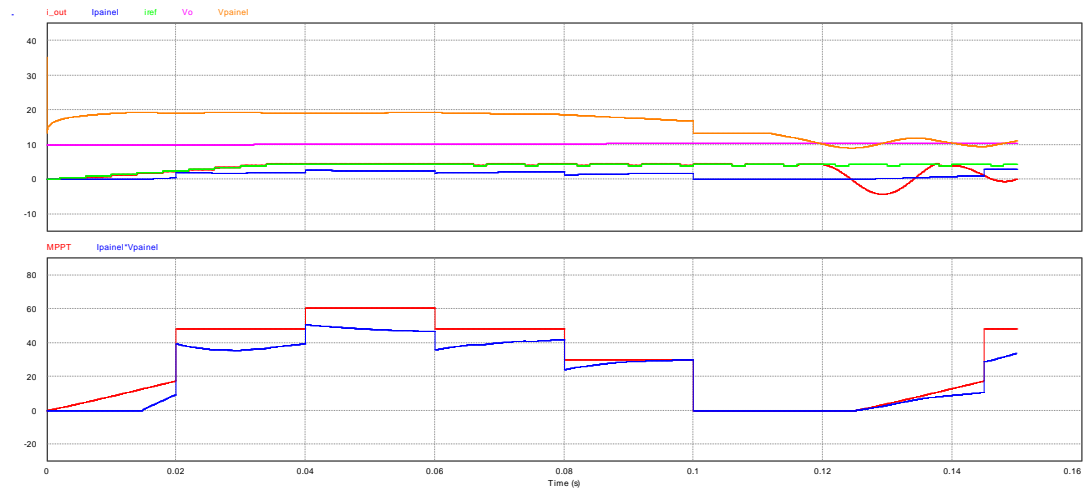


Figura 56 - Simulação PSIM do controlador de carga com frequência de 8kHz

Para a programação do microcontrolador Arduino UNO, simulou-se o circuito no software ISIS-Proteus, tal como na figura 50. A grande diferença da simulação feita do Proteus com a do PSIM é que o Proteus simula o comportamento mais próximo ao real programado na IDE do Arduino, pois contém as interrupções necessárias para o Método P&O e para o PWM.

A figura 57 ilustra a simulação feita no ISIS – Proteus com frequência de 8kHz. As interrupções do método P&O são feitas em intervalo escolhido para que a corrente se estabilize antes da medição da potência, ou seja, o sistema é perturbado e depois que se estabiliza é observado.

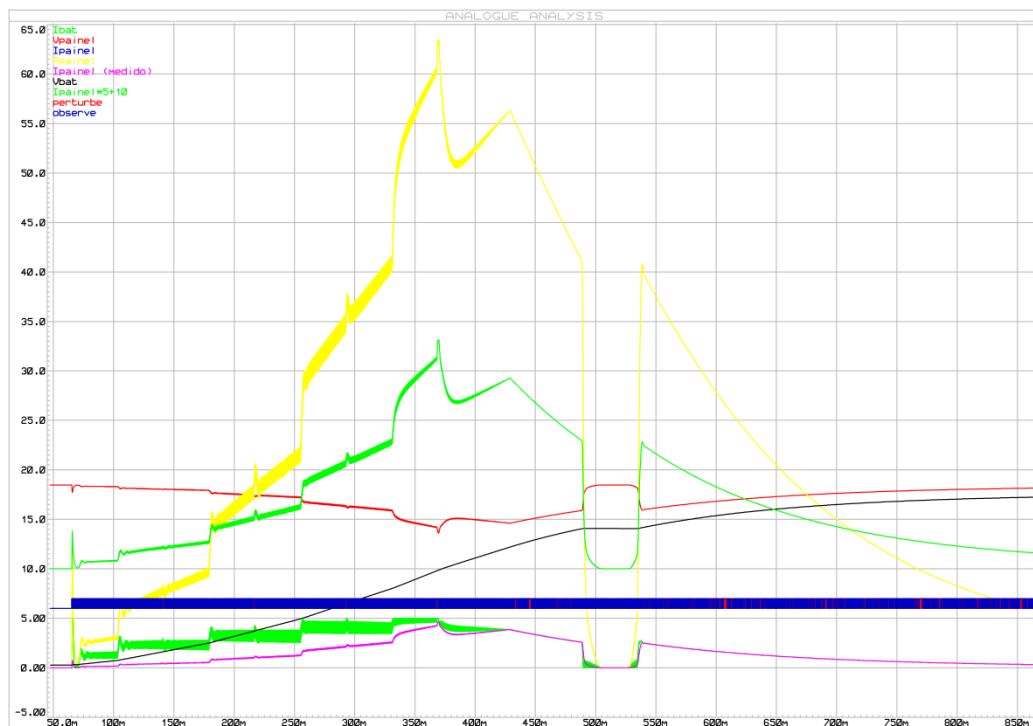


Figura 57: Simulação 1 do conversor no ISIS-Proteus

Na figura 58, nota-se que, quando o sistema é perturbado, ocorre algumas oscilações na corrente controlada, sendo assim, explica-se o fato de perturbar a corrente e esperar o sistema se estabilizar para observar, evitando leituras incorretas da variação da potência.

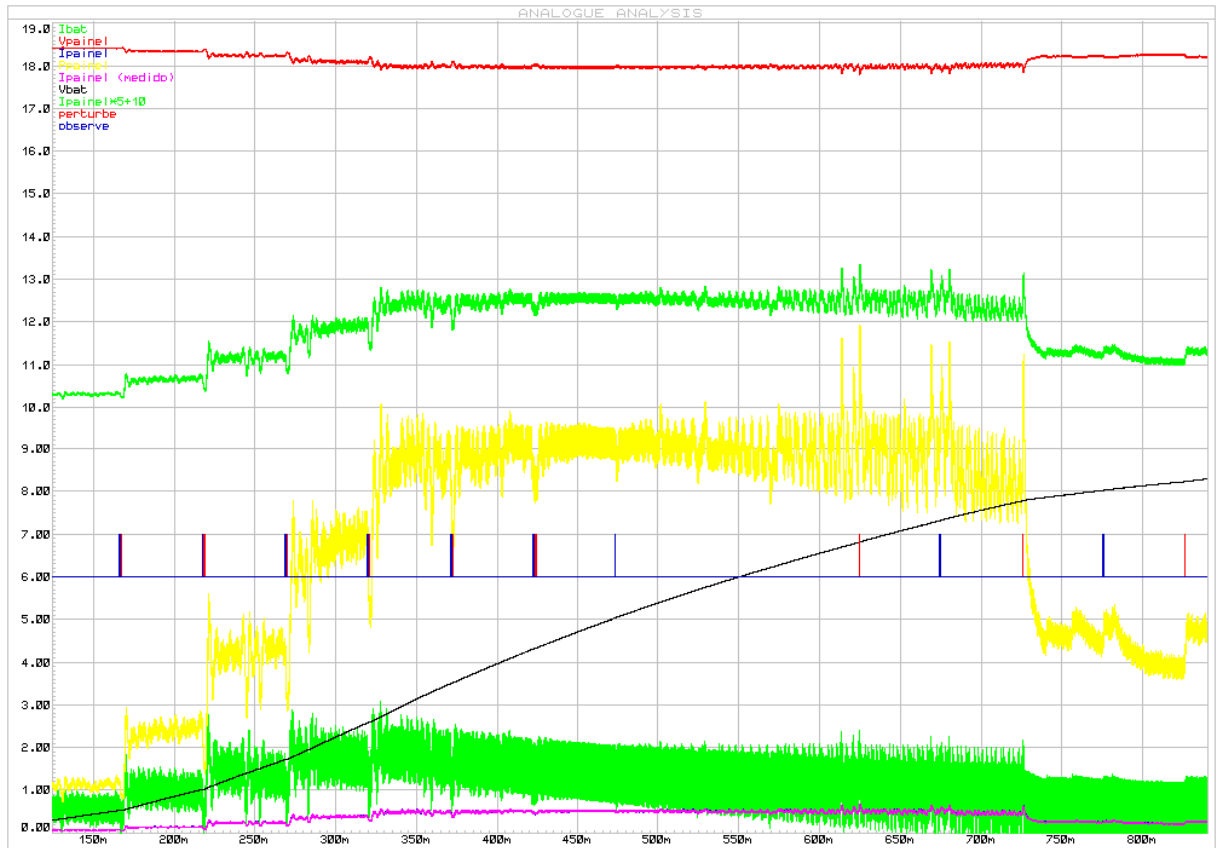


Figura 58: Simulação 2 do conversor no ISIS-Proteus

Visto que, com o sistema observando o tempo todo e perturbando a corrente, percebeu-se que não há necessidade de nova perturbação quando a variação de potência não é significativa, ou seja, com uma variação abaixo de 5%. Então adicionou-se a condição para perturbar somente se a variação de potência for maior do que 5% e um contador para garantir que o sistema observa, espera 25 milissegundos, perturba e espera mais 50 milissegundos a resposta da perturbação para evitar perturbações desnecessárias. Este resultado está ilustrado na figura 59. E o tempo de perturbe e observe pode ser observado na figura 60 e 61, respectivamente.

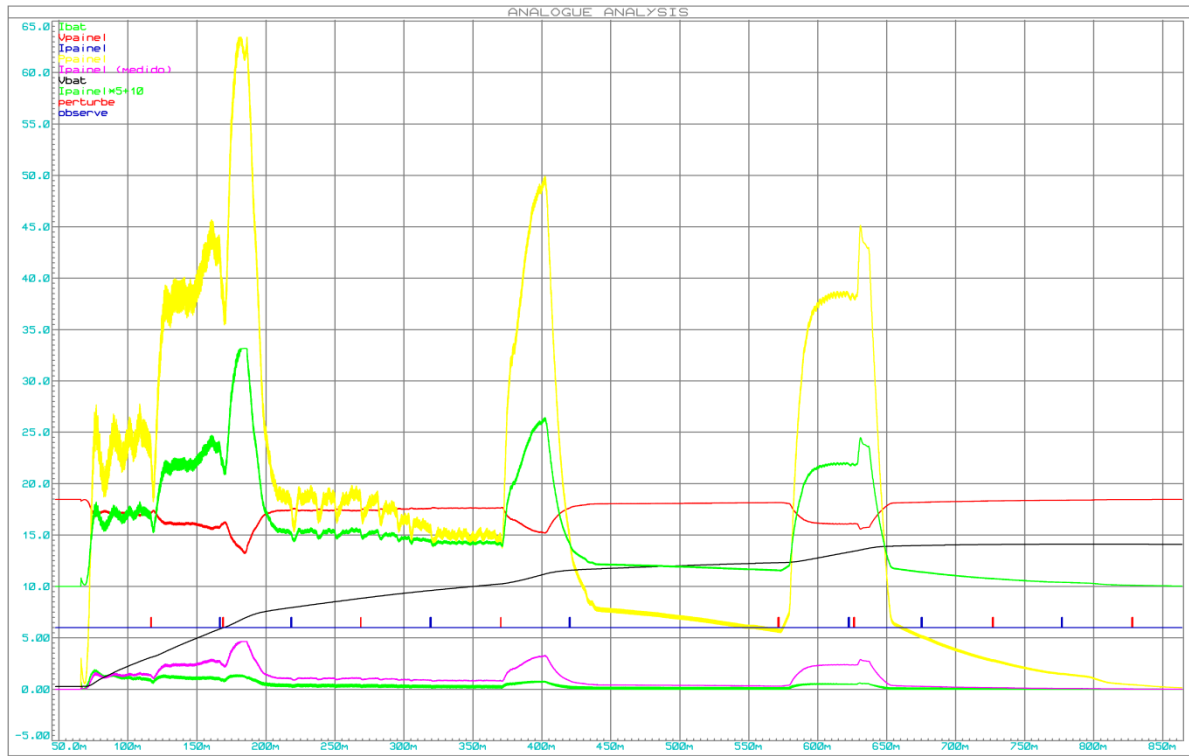


Figura 59: Simulação 3 do conversor no ISIS-Proteus

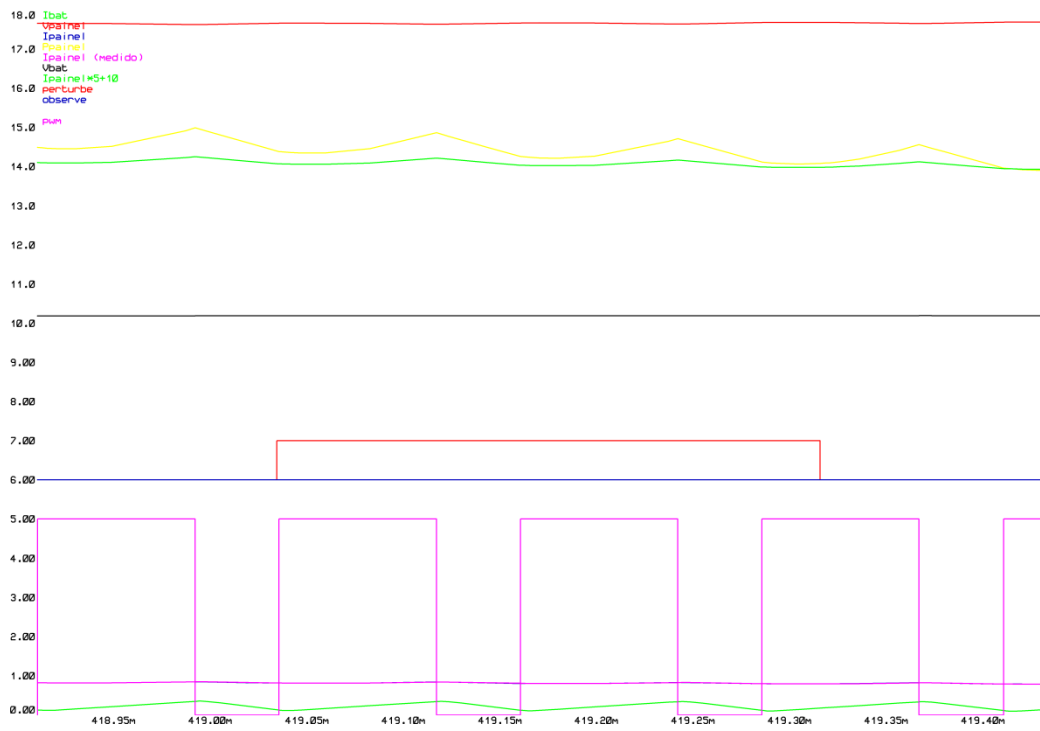


Figura 60: Zoom da Simulação 3 (perturbe) do conversor no ISIS-Proteus

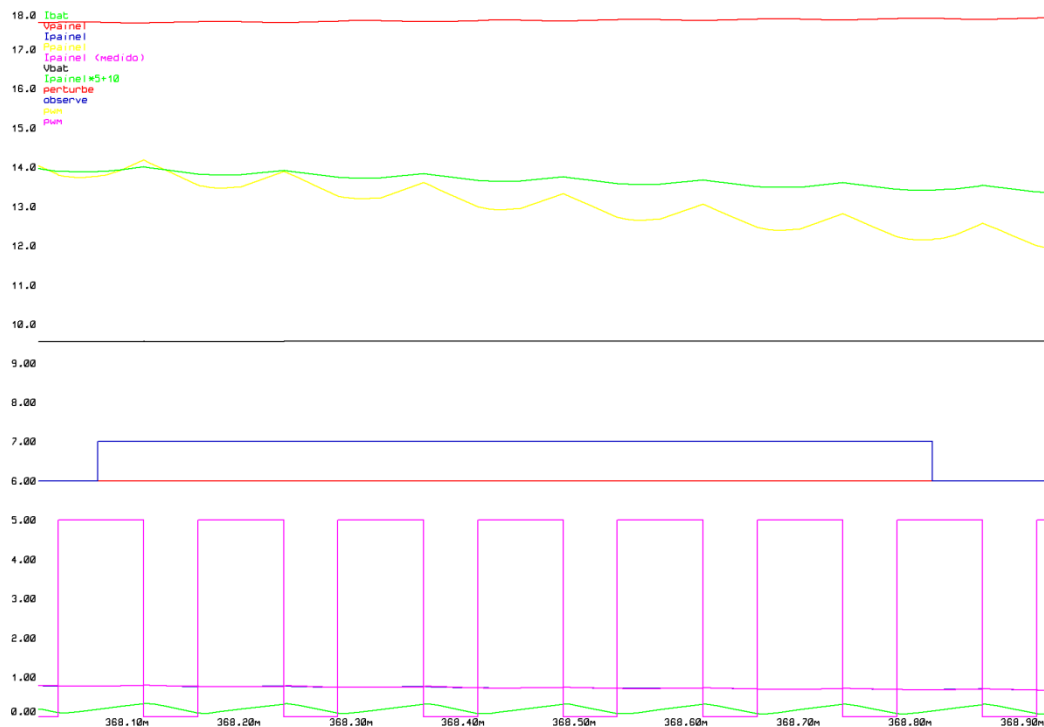


Figura 61: Zoom da Simulação 3 (observe) do conversor no ISIS-Proteus

4.2 Testes práticos

O resultado das formas de onda obtidas do teste do sistema real com o painel de 80W conectado ao conversor *Buck* e este na bateria está representado a seguir.

Com o osciloscópio conectado obtêm-se: a tensão média, representada pela curva amarela; a tensão da bateria, representada pela cor azul; a corrente de saída, representada pela cor verde; o PWM, representado pela cor rosa escuro; e a potência de saída do painel está representada pela cor rosa claro.

Na figura 62, observa-se que a tensão do painel está em 17 *Volts*, enquanto a tensão da bateria está em 13,04 *Volts*. Quando a tensão média do painel cai, varia-se a largura de pulso do PWM para que a corrente de referência alcance novamente o ponto de máxima potência.



Figura 62: Teste 1- controlador de carga

Legenda:

- █ Tensão média do painel
- █ Corrente do painel
- █ Corrente de referência
- █ Potência da bateria
- █ PWM

Como observado na figura 63, a corrente é incrementada enquanto a potência continua aumentando. Quando a tensão ultrapassa os 12,5V a corrente é reduzida, de forma a limitar a corrente de carga da bateria.



Figura 63: Teste 2 do controlador de carga

Legenda:

- █ Tensão média do painel
- █ Corrente do painel
- █ Corrente de referência
- █ Potência da bateria
- █ PWM

No teste 3, figura 64, observa-se que quando a corrente é perturbada no sentido de diminuir a corrente de referência, a mesma cai para zero e depois é perturbada três vezes no sentido positivo até alcançar o ponto de máxima potência novamente.

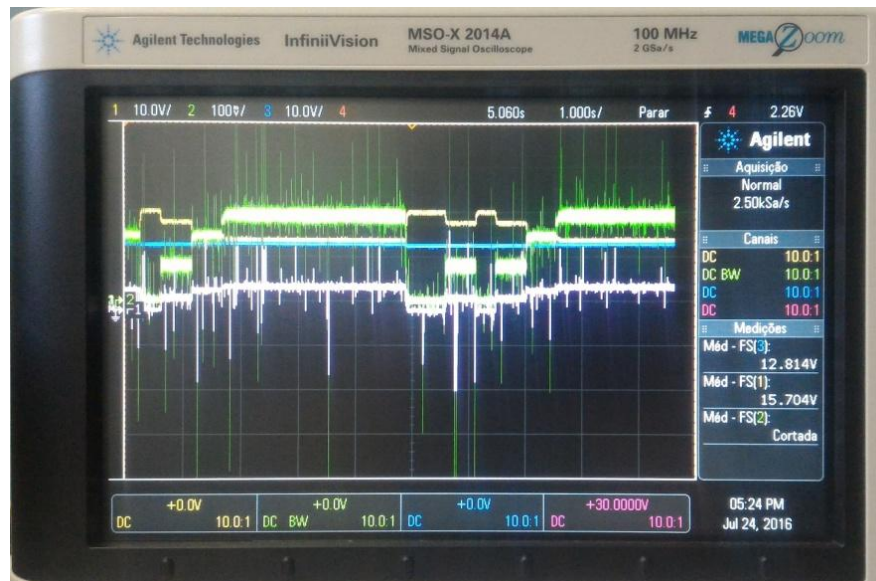


Figura 64: Teste 3 do controlador de carga

A tensão do painel cai para 15,3 *Volts* e depois para 15,17 *Volts* em consequência do sombreamento e a potência de saída, no teste 4, não sofre grandes alterações, portanto a interrupção ocorre, mas não muda-se a corrente de referência. Nesse estado o ponto de Máxima Potência já foi encontrado e é só manter a mesma potência fornecida anteriormente até que acontece variação na tensão fornecida pelo painel fotovoltaico. Este comportamento é ilustrado na figura 65 e 66.



Figura 65: Teste 4 do controlador de carga

Legenda:

- █ Tensão média do painel
- █ Corrente do painel
- █ Corrente de referência
- █ Potência da bateria
- █ PWM

Legenda:

- █ Tensão média do painel
- █ Corrente do painel
- █ Corrente de referência
- █ Potência da bateria
- █ PWM



Legenda:

- Tensão média do painel
- Corrente do painel
- Corrente de referência
- Potência da bateria
- PWM

Figura 66: Teste 5 do controlador de carga

Na figura 67 observa-se que a corrente de referência zera quando a tensão oferecida pelo painel fica menor do que a tensão da bateria.

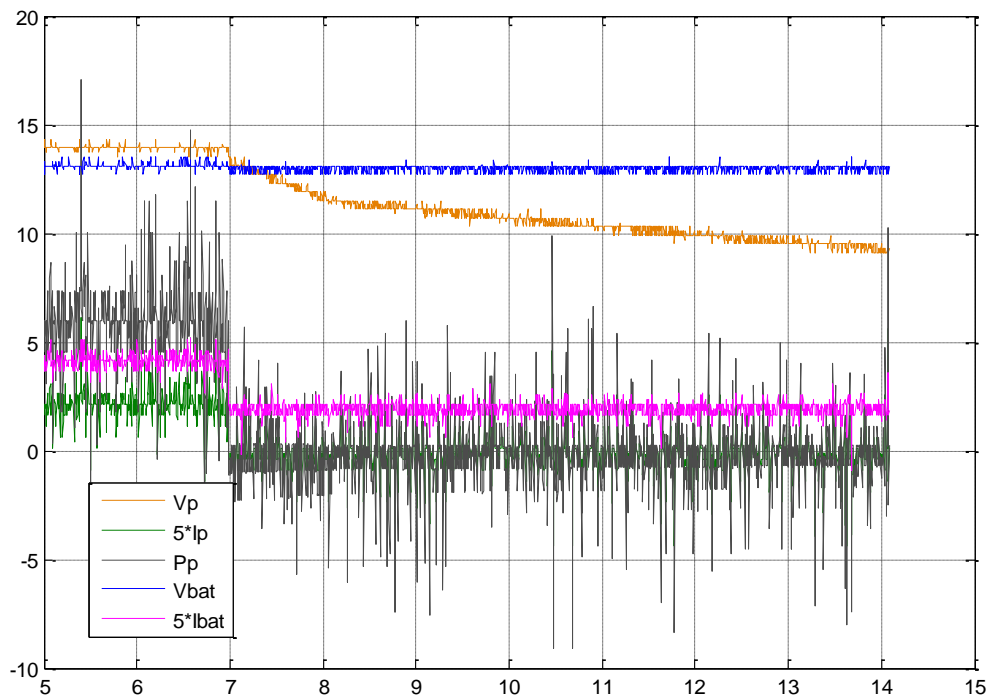


Figura 67: Teste 6 - Gráfico plotado no MATLAB

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho de conclusão de curso propôs desenvolver um controlador de carga da bateria de um sistema fotovoltaico utilizando a técnica de MPPT, Perturbe e Observe, para rastrear a máxima potência oferecida pelos painéis e garantir a proteção contra sobrecarga ampliando a vida útil da bateria.

Para atingir os objetivos propostos, foi projetado e fabricado um conversor *Buck* para o controle da corrente e, para tal controle, utilizou-se o microcontrolador Arduino UNO para monitorar a tensão e a corrente do painel e da bateria e então controlar a frequência de chaveamento do conversor *Buck*.

O objetivo proposto foi alcançado com controlador de carga desenvolvido controlando a carga da bateria e, com o método Perturbe e Observe, o sistema extraiu a máxima potência oferecida dos painéis fotovoltaicos.

O algoritmo aplicado ao controlador garantiu o monitoramento da tensão e da corrente da bateria, alcançando o objetivo do controle da carga da bateria, evitando sobrecarga na bateria. O microcontrolador escolhido, apesar de ter atendido ao objetivo do trabalho, tem limitações de velocidade de processamento. Portanto, para pesquisas futuras, o uso de um microcontrolador que tenha maior velocidade de processamento é indicado.

Outras melhorias podem ser propostas para trabalhos futuros, tais como: proteção contra inversão de polaridade da bateria e do painel; controle de conexão de cargas à bateria; informação dos valores das variáveis.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL – **Energia solar 3**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar%283%29.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL – **Energia solar**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/3_3_2.htm>. Acesso em: 19 dez. 2014.

BLOG-ENERGIA – **Funcionamento da energia eolica**. Disponível em: <<http://blog-energia.com/funcionamento-da-energia-eolica.htm>>. Acesso em: 21 jul. 2016.

CRESESB – **Tutorial de energia solar**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2014.

DIAS F. S. B. **Estudo de caso: simulação completa de sistema fotovoltaicos residencial para injeção na rede em Sobral-CE**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfxBoAK/simulacao-completa-sistema-fotovoltaicos-residencial-injecao-na-rede-sobral-ce-felipe-sousa-barros-dias>>. Acesso em: 28 out. 2015.

ELMANO, C. **CONVERTOR BOOST**. Disponível em: <<http://www.ec.ufc.br/professores/elmano/disciplinas/sistelet/Aula09.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2015.

ELMANO, C. **CONVERTOR BUCK**. Disponível em: <<http://www.ec.ufc.br/professores/elmano/disciplinas/sistelet/Aula08.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2015.

ELMANO, C. **CONVERTOR BUCK-BOOST**. Disponível em: <<http://www.ec.ufc.br/professores/elmano/disciplinas/sistelet/Aula10.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2015.

ELMANO, C. **CONVERSORES CC-CC – AULA 1**. Disponível em: <<http://www.ec.ufc.br/professores/elmano/disciplinas/sistelet/Aula07.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2015.

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos**. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede/tde_arquivos/7/TDE-2007-10-02T165649Z-878/Publico/JOHNINSONIMHOFF.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2014.

MCROBERTS, M. **Arduino Básico**. 1ªed. São Paulo: Novatec, 2011. Disponível em: <<https://novatec.com.br/livros/arduino/capitulo9788575222744.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2014.

MINHA CASA SOLAR- **Bateria estacionária FREEDOM DF-4001**. Disponível em: <<http://minhacasasolar.lojavirtualfc.com.br/prod,IDLoja,14743,IDProduto,2790359,bateria-estacionaria-freedom-estacionaria-bateria-estacionaria-freedom-df4001-220ah-240ah>>. Acesso em: 20 dez. 2014.

NEVES JR, C. R. **Desenvolvimento de um controlador de recarga de bateria para aplicações em satélites.** Disponível em: <<http://www.em.ufop.br/cecau/monografias/2010/Carlos%20Roberto%20Neves%20Jr.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2014.

PALZ, W. **Energia Solar e fontes alternativas.** 1ªed. Curitiba-PR: Hemus, 2002. 357 p.

POMILIO J. A. **ELETRÔNICA DE POTÊNCIA.** Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/>>. Acesso em: 31 out. 2015.

PROFESSORES – **Controle de processos.** Disponível em: <http://www.professores.uff.br/controldeprocessos-eq/images/stories/Control_Aula08_-Controle-FB_1sem2013.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2016.

RODRIGUES S. L. **Capítulo 04 Capacitores e Indutores.** Disponível em: <http://www.feng.pucrs.br/~virgilio/Circuitos_Eletricos_I/Capitulo4_ckt1.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2015.

SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital.** Disponível em: <<http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/farias/materiais/316M.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2014.

SISTEMA FURNAS DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemaFurnas/usina_hidr_funciona.asp>. Acesso em: 22 dez. 2014.

SOLENERG - ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Manual Técnico Bateria Estacionária Freedom.** Disponível em: <<http://www.solenerg.com.br/files/ManualTecnicoFreedom.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2014.

SPADUTO, R. R.; FREITAS, L. C. G. Estudo de técnicas de MPPT em sistemas fotovoltaicos. In: **XI CEEL - XI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, 2013, Uberlândia.** XI CEEL - XI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, 2013. Disponível em: <http://www.ceel.eletrica.ufu.br/artigos2013/ceel2013_060.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2014.

T8MENERGIASOLAR – **Sistemas conectados a rede gre-tie.** Disponível em: <<http://t8menergiasolar.com.br/sistemas-conectados-a-rede-grid-tie/>>. Acesso em: 22 jul. 2016.

TECNOLOGIAS DE MICRO-GERAÇÃO E SISTEMAS PERIFÉRICOS. Disponível em: <<http://www.troquedeenergia.com/Produtos/LogosDocumentos/SolarFotovoltaico.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2014.

TEIXEIRA W.; VIAJANTE G.P.; MARRA E.G. **Projeto, simulação e implementação de um conversor cc-cc não isolado boost, uma experimentação metodológica.** Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2008/artigos/2342.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2015.

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA. **Breve história da energia solar.** Disponível em: <<http://web.ist.utl.pt/palmira/solar.html>>. Acesso em: 20 dez. 2014.

APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO CONTROLADOR DE CARGA DO ARDUINO

```

#define dPWM 20
// Variação de potência de 2% da potência nominal do painel (80W):
// DP = 5% de Pmax = 0.05*80W = 0.4 W
#define DP 0.4
// Define limites de corrente:
// IMaior = corrente para modo de carga com maior corrente
// IMenor = corrente de carga com bateria quase carregada
#define IMaior 5.0
#define IMenor 2.0
// Define tensão máxima da bateria:
#define VbMAX 14.0
int N;
int N_2;
int perturbe = 0, observe = 0; // Flags para iniciar os processos do MPPT
float Vpainel, Vp; // Tensão do painel solar
float Vanterior;
float Ipainel, Ip, Ip_ant; // Corrente do painel solar
float Ppainel, Panterior; // Potência do painel solar
float deltaV;
float deltaI;
float deltaP;
float Vbat; // Tensão da bateria
float Ibat, Ibat_ant; // Corrente da bateria
float Imax = IMaior; // inicia no modo de carga com maior corrente
volatile long MPPT_cont = 0; // Contador auxiliar para o MPPT
volatile float Iref; // Corrente de referência da bateria
float Iref_aux; // Corrente de referência auxiliar da bateria
// Parâmetros do PID para controle da corrente de carga:
float Kp = 10.0;
float Ki = 2.5; // 8000.0 * (1/8000.0)/2.0; // Ta = 1/8kHz
float Kd = 0.0001;
float P, I = 0, D, PID, erro, erro_a = 0;

// Função para configurar a interrupção do Timer_1 para o controle PID
void configura_interrupcao()

```

```

{
// Reseta os registradores de comparação e o contador do Timer_1
TCCR1A = 0;
TCCR1B = 0;
TCNT1 = 0;
// Zera os flags de interrupção do Timer_1
TIMSK1 &= ~(1 << ICIE1) | (1 << OCIE1B) | (1 << OCIE1A) | (1 << TOIE1));
/*
Clock Select Bit Description
. CS12 CS11 CS10 Description
. 0 0 0 No clock source (Timer/Counter stopped).
>> 0 0 1 clkI/O/1 (No prescaling)
. 0 1 0 clkI/O/8 (From prescaler)
. 0 1 1 clkI/O/64 (From prescaler)
. 1 0 0 clkI/O/256 (From prescaler)
. 1 0 1 clkI/O/1024 (From prescaler)
. 1 1 0 External clock source on T1 pin. Clock on falling edge.
. 1 1 1 External clock source on T1 pin. Clock on rising edge.
*/
// Configura operação em phase and frequency correct PWM,
// utilizando registradores: OCR1A para comparação do duty cycle
// ICR1 para o TOP
// Obs: OCR1A não pode ser maior que ICR1
// Atualiza o período para a escala apropriada
// e configura a interrupção com aquele período
/*
f_timer = fclk / N
N = prescaler
1, 8, 64, 256, 1024
f_pwm = fclk / (2*N*TOP) ; // TOP = ICR1
TOP = ICR1 = fclk / (2*N*f_pwm)
. = 16M / (2*1*8k)
. = 1000
*/
ICR1 = 1000; // Define um valor fixo para o TOP
OCR1A = ICR1 / 2; // Duty cycle = 50%
// vPWM = ICR1 / 2; // não utilizado no controle por corrente

```

```

// deltavPWM = ICR1 / 20; // não utilizado no controle por corrente
N = 200; // N = intervalo_MPPT * f_pwm = 25ms * 8kHz
N_2 = 2 * N; // obs: N é usado parra esperar a resposta do sistema à perturbação
/*

  Compare Output Mode, Phase Correct and Phase and Frequency Correct PWM
  COM1A1/COM1B1 COM1A0/COM1B0 Description
  . 0      0    Normal port operation, OC1A/OC1B disconnected.
  . 0      1    WGM13:0 = 9 or 11: Toggle OC1A on Compare
  Match, OC1B disconnected (normal port operation).
  For all other WGM1 settings, normal port operation,
  OC1A/OC1B disconnected.
  >> 1      0    Clear OC1A/OC1B on Compare Match when upcounting.
  Set OC1A/OC1B on Compare Match when downcounting.
  . 1      1    Set OC1A/OC1B on Compare Match when upcounting.
  Clear OC1A/OC1B on Compare Match when downcounting.
  bit7 bit6 bit5 bit4 (TCCR1A)
  COM1A1 COM1A0 COM1B1 COM1B0
  . 1 0 1 0 = 0xA

  Clock Select Bit Description
  bit2 bit1 bit0 (TCCR1B)
  CS12 CS11 CS10 Description
  . 0 0 0 No clock source (Timer/Counter stopped).
  >> 0 0 1 clkI/O/1 (No prescaling)
  . 0 1 0 clkI/O/8 (From prescaler)
  . 0 1 1 clkI/O/64 (From prescaler)
  . 1 0 0 clkI/O/256 (From prescaler)
  . 1 0 1 clkI/O/1024 (From prescaler)
  . 1 1 0 External clock source on T1 pin. Clock on falling edge.
  . 1 1 1 External clock source on T1 pin. Clock on rising edge.
  */

// TCCR1A
// bit7 bit6 bit5 bit4 bit3 bit2 bit1 bit0
// COM1A1 COM1A0 COM1B1 COM1B0 reserv reserv WGM11 WGM10
// 1 1 1 1 0 0 0 0 ==> phase e frequency correct
// 1 1 1 1 0 0 1 1 ==> phase correct (TOP=1023=0x03FF)

```

```

TCCR1A = 0xA0;

// TCCR1B
// bit7 bit6 bit5 bit4 bit3 bit2 bit1 bit0
// ICNC1 ICES1 reserv WGM13 WGM12 CS12 CS11 CS10
// 0 0 0 1 0 0 0 1 ==> phase e frequency correct
// 0 0 0 0 0 0 0 1 ==> phase correct (TOP=1023=0x03FF)
TCCR1B = 0x11;

// TIMSK1 – Timer/Counter1 Interrupt Mask Register
// bit7 bit6 bit5 bit4 bit3 bit2 bit1 bit0
// reserv reserv ICE1 reserv reserv OCIE1B OCIE1A TOIE1

// TIMSK1 Seta qual tipo de interrupção vai ser aceita:
// TIMSK1 |= (1 << OCIE1A); // por comparação com o registrador A
// TIMSK1 |= (1 << OCIE1B); // por comparação com o registrador B
// TIMSK1 |= (1 << TOIE1); // enable timer overflow interrupt
TIMSK1 |= (1 << ICIE1); // enable timer capture interrupt

// Habilita a execução de interrupções
interrupts();
}

// Configuração do Arduino
void setup()
{
// Pinos de saída: digital e PWM
pinMode(9, OUTPUT); //saída PWM pino 9 do UNO
pinMode(10, OUTPUT); //saída PWM pino 10 do UNO
pinMode(11, OUTPUT); //saída digital pino 11 do UNO
pinMode(12, OUTPUT); //saída digital pino 12 do UNO

// Efetua medidas de tensão e corrente do painel:
Vpaine1 = analogRead(A0); // ler tensão do painel (0 a 5V)
Vp = Vpaine1 * 0.0244379276637341; // map(Vpaine1, 0, 1023, 0, 25);
Ipaine1 = analogRead(A3); // ler corrente do painel (cada 0,2V = 1A)
// Comentar a linha abaixo quando for fazer simulação com o proteus

```

```

//Ip = (Ipainel - 512) * 2.669 * 0.0097847358121331; //i=(N-512)*5.0/511; obs: 2.669 referente a
calibração e ajuste de escala no circuito real
Ip = (Ipainel - 512) * 0.0097847358121331; //i=(N-512)*5.0/511; // ##### para o caso de simulação
#####

Ibat = analogRead(A1);          // ler corrente da bateria
// Comentar a linha abaixo quando for fazer simulação com o proteus
//Ibat = (Ibat - 512) * 2.669 * 0.0097847358121331; //i=(N-512)*5.0/511; obs: 2.669 referente a
calibração e ajuste de escala no circuito real
Ibat = (Ibat - 512) * 0.0097847358121331; //i=(N-512)*5.0/511; // ##### para o caso de simulação
#####

Vbat = analogRead(A2);          // ler tensão da bateria
Vbat = Vbat * 0.0244379276637341; // map(Vbat, 0, 1023, 0, 25);

Panterior = Vp * Ip; // Calcula a potência inicial do painel solar
Vanterior = Vp; // Valor inicial da tensão do painel solar
Iref_aux = 0; // Corrente inicial para o carregador
// Iref_ant = Iref_aux;
Iref = Iref_aux;
deltaI = Imax / 5.0; // Incremento da corrente da bateria (para perturbação do MPPT)

// Configura e ativa a interrupção do Timer1
configura_interrupcao();
}

void loop()
{
  if (perturbe)
  {
    perturbe = 0; // Zera flag do MPPT
    // Efetua medidas de tensão e corrente do painel fora da interrupção (podem conter ruídos de
chaveamento):
    noInterrupts();
    Vpainel = analogRead(A0); // ler tensão do painel (0 a 5V)
    Ipainel = analogRead(A3); // ler corrente do painel (cada 0,2V = 1A)
    interrupts();
    digitalWrite(11, HIGH); // auxiliar para medir o tempo de execução
    Vp = Vpainel * 0.0244379276637341; //map(Vpainel, 0, 1023, 0, 25);
  }
}

```

```

// Comentar a linha abaixo quando for fazer simulação com o proteus
//Ip = (Ipainel - 512) * 2.669 * 0.0097847358121331; //i=(N-512)*5.0/511; obs: 2.669 referente a
calibração e ajuste de escala no circuito real
Ip = (Ipainel - 512) * 0.0097847358121331; //i=(N-512)*5.0/511; // ##### para o caso de
simulação #####
Panterior = Vp * Ip; // valor anterior da potência do painel
// Iref_ant = Iref_aux; // valor anterior da corrente de referência
Iref_aux = Iref_aux + deltaI; // PERTURBAÇÃO
digitalWrite(11, LOW); // auxiliar para medir o tempo de execução
} // FIM perturbe

if (observe)
{
observe = 0; // Zera flag do MPPT

digitalWrite(12, HIGH); // auxiliar para medir o tempo de execução
noInterrupts(); // Para alterar variável da interrupção
MPPT_cont = 0; // Prepara para nova perturbação
// Medidas de tensão e corrente do painel fora da interrupção (podem conter ruídos de
chaveamento):
Vpainel = analogRead(A0); // ler tensão do painel (0 a 5V)
Ipainel = analogRead(A3); // ler corrente do painel (cada 0,2V = 1A)
interrupts();

Vp = Vpainel * 0.0244379276637341; // map(Vpainel, 0, 1023, 0, 25);
// Comentar a linha abaixo quando for fazer simulação com o proteus
//Ip = (Ipainel - 512) * 2.669 * 0.0097847358121331; //i=(N-512)*5.0/511; obs: 2.669 referente a
calibração e ajuste de escala no circuito real
Ip = (Ipainel - 512) * 0.0097847358121331; //i=(N-512)*5.0/511; // ##### para o caso de
simulação #####
// Calcula potência atual do painel solar:
Ppainel = Vp * Ip;
deltaP = Ppainel - Panterior;
digitalWrite(12, LOW); // auxiliar para medir o tempo de execução

// verifica variação de potência maior que 2% da potência nominal do painel (80W): DP =
0.2*Pmax = 0.2*80 = 1.6 W

```



```

    if (deltaP > DP)          // Perturbação causou aumento da potência ==> manter a perturbação e
perturbar novamente
    {
        noInterrupts();
        MPPT_cont = N - 1; // garante que a perturbação seja feita no próximo loop (o flag perturbe será
ativado na próxima interrupção)
        interrupts();
        //deltaI = deltaI;    // mantém o sentido da perturbação, pois a potência aumentou
    }
    if (deltaP < -DP)        // Perturbação causou redução da potência ==> retirar a perturbação e inverter
o sentido da próxima perturbação
    {
        // Iref_aux = Iref_ant; // Retorna ao valor anterior da referência de corrente
        deltaI = -deltaI;    // Inverte o sentido da próxima perturbação
    }

    if (abs(deltaP) < DP)   // Se o aumento da potência for pequeno ==> manter a perturbação e NÃO
perturbar novamente por um período maior de tempo
    {
        noInterrupts();
        MPPT_cont = -N_2; // Faz com que a nova perturbação seja adiada
        interrupts();
    }
} // FIM observe

// noInterrupts(); // OBS: impedir a interrupção aqui, atrasa o processamento e causa instabilidade
no controle de corrente
Vbat = analogRead(A2);      // ler a tensão da bateria, para interromper a carga quando a carga
estiver completa
Vbat = Vbat * 0.0244379276637341; // map(Vbat, 0, 1023, 0, 25);
// interrupts();

// Proteção de subtensão no painel solar (Vp < Vbat):
if (Vp < Vbat)
    Iref_aux = 0;
//Altera o padrão de carregamento da bateria de acordo com a tensão da bateria
if (Vbat > 13.0)

```

```

    Imax = IMenor;
if (Vbat < 12.5)
    Imax = IMaior;
// Limita o valor máximo de tensão na bateria (necessário a cada loop)
if (Vbat > VbMAX)
    Iref_aux = 0; // TESTE // Zera a referência de corrente

// Limitação da corrente de carga (Ibat < Imax):
if (Iref_aux > Imax)
    Iref_aux = Imax;
if (Iref_aux < 0)
    Iref_aux = 0;
noInterrupts();
Iref = Iref_aux; // Altera o duty cycle
interrupts();
// digitalWrite(12, LOW);
}

// A função de interrupção do Timer_1 (a cada Tpwm)
//ISR(TIMER1_COMPA_vect)
//ISR(TIMER1_COMPB_vect)
//ISR(TIMER1_OVF_vect)
ISR(TIMER1_CAPT_vect) // interrupção ao atingir o TOP da contagem do Timer (no meio do
pulso pwm)
{
    // Leitura das entradas analógicas:
    Ibat = analogRead(A1); // para evitar ruído a leitura é feita no meio do pulso pwm
    // Comentar a linha abaixo quando for fazer simulação com o proteus
    //Ibat = (Ibat - 512) * 2.669 * 0.0097847358121331; //i=(N-512)*5.0/511; obs: 2.669 referente a
calibração e ajuste de escala no circuito real
    Ibat = (Ibat - 512) * 0.0097847358121331; //i=(N-512)*5.0/511; // ##### para o caso de simulação
#####
    /*
    Vbat = analogRead(A2);
    Vpainel = analogRead(A0); // ler tensão do painel (0 a 5V)
    Ipainel = analogRead(A3); // ler corrente do painel (cada 0,2V = 1A)
    Vbat = Vbat * 0.0244379276637341; // map(Vbat, 0, 1023, 0, 25);

```

```

Vp = Vpaine1 * 0.0244379276637341; //map(Vpaine1, 0, 1023, 0, 25);
// Comentar a linha abaixo quando for fazer simulação com o proteus
//Ip = (Ipaine1 - 512) * 2.669 * 0.0097847358121331; //i=(N-512)*5.0/511; obs: 2.669 referente a
calibração e ajuste de escala no circuito real
Ip = (Ipaine1 - 512) * 0.0097847358121331; //i=(N-512)*5.0/511; // ##### para o caso de simulação
#####
*/

MPPT_cont++; // incrementa contador de tempo para o MPPT
if (MPPT_cont == N) // tempo = N/f_pwm = 100/8k = 12.5ms
    perturbe = 1; // Seta flag para iniciar a perturbação para encontrar o MPPT
if (MPPT_cont == N_2) // tempo = N/f_pwm = 200/8k = 25.0ms
    observe = 1; // Seta flag para iniciar a perturbação para encontrar o MPPT

// Controle da corrente de carga da bateria:
erro = Iref - Ibat;
P = Kp * erro;
I = Ki * (erro + erro_a) + I;
D = Kd * (erro);
if (I > ICR1)
    I = ICR1;
if (I < 0)
    I = 0;
PID = P + I + D;
if (PID > ICR1)
    PID = ICR1 - 10;
if (PID < 0)
    PID = 0;
erro_a = erro;
OCR1A = PID;
}

```

APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO DE ENVIO DE DADOS PELA SERIAL DO ARDUINO UNO

```

float Vpainel;
float Ipainel;
float Vp;
float Ip;
float Ibat;
float Vbat;
void setup() {
  Serial.begin(19200); // baud rate -> (300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 31250,
  38400)
}
void loop() {
  Vpainel = analogRead(A0); // ler tensão do painel (0 a 5V)
  Vp = Vpainel * 0.0244379276637341; // map(Vpainel, 0, 1023, 0, 25);
  delay(10);
  Ipainel = analogRead(A3) - 512; // ler corrente do painel
  Ip = (Ipainel) * 2.669 * 0.0097847358121331; // i=(N-512)*5.0/511; obs: 2.669 referente a calibração
e ajuste de escala
  delay(10);
  Ibat = analogRead(A1); // ler corrente da bateria (cada 0,2V = 1A)
  Ibat = Ibat * 0.0263937009004581; // 0.0248100788464306; // I=N*5/1023/0.197 // ##### para o
caso de pré-amplificador e ajuste de sinal #####
  delay(10);
  Vbat = analogRead(A2); // ler tensão da bateria
  Vbat = Vbat * 0.0244379276637341; // map(Vbat, 0, 1023, 0, 25);
  Serial.print('<');
  Serial.print("V=");
  Serial.print(Vp);
  Serial.print(',');
  Serial.print("I=");
  Serial.print(Ip);
  Serial.print(',');
  Serial.print("Vbat=");
  Serial.print(Vbat);

```

```
Serial.print(',');  
Serial.print("Ibat=");  
Serial.print(Ibat);  
Serial.print('>');  
Serial.print("\r\n");  
delay(500);  
}
```