

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

LUCAS MARTINEZ DA CRUZ

**DESENVOLVIMENTO DE UM CARREGADOR DE BATERIA
CHUMBO-ÁCIDO SELADA 12 V – 5 Ah MICROCONTROLADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2018

LUCAS MARTINEZ DA CRUZ

**DESENVOLVIMENTO DE UM CARREGADOR DE BATERIA
CHUMBO-ÁCIDO SELADA 12 V – 5 Ah MICROCONTROLADO**

Projeto de pesquisa apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC2) do curso de Engenharia Eletrônica, do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) do Campus Campo Mourão, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Gilson Junior Schiavon.

CAMPO MOURÃO

2018

TERMO DE APROVAÇÃO
DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO INTITULADO

DESENVOLVIMENTO DE UM CARREGADOR DE BATERIA CHUMBO-ÁCIDO SELADA 12 V – 5 Ah MICROCONTROLADO

por

LUCAS MARTINEZ DA CRUZ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 07 de Março de 2018 ao Curso Superior de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____ (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Prof. Fabio Pereira de Lima

(UTFPR)

Prof. Dr. Jakson Paulo Bonaldo

(UTFPR)

Prof. Dr. Gilson Junior Schiavon

(UTFPR)

Orientador

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso

RESUMO

CRUZ, LUCAS M. **DESENVOLVIMENTO DE UM CARREGADOR DE BATERIA CHUMBO-ÁCIDO SELADA 12 V – 5 Ah MICROCONTROLADO**. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2018.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um carregador de bateria chumbo ácido selada de 12 V com capacidade de 5 Ah, que realize o carregamento de forma eficiente, evitando danos durante o processo, conseqüentemente aumentando a vida útil da bateria. O carregamento da bateria é feito por uma fonte chaveada, que consiste em um Retificador em conjunto com um conversor CC-CC abaixador (Buck), ligados a rede elétrica 127/220 V, com uma tensão de saída de 13,5 V e corrente máxima de 2 A durante o processo de carga. O carregador opera em malha fechada, o controle digital do sistema é composto por um microcontrolador PIC16F877A e sensores de tensão e corrente, que realizam a leitura do sinal na saída do conversor. Com os resultados práticos obtidos com a montagem dos circuitos eletrônicos do projeto, foi possível fazer um gráfico da reta de carga e descarga da bateria, comprovando que as especificações do método de carregamento foram atendidas e a bateria foi carregada corretamente.

Palavras – chave: Carregador de bateria chumbo-ácido, conversor Buck, Fonte chaveada, Controle digital.

ABSTRACT

CRUZ, LUCAS M. **DEVELOPMENT OF A 12 V – 5 Ah SEALED LEAD BATTERY CHARGER MICROCONTROLLED.** Final Paper Electronics Engineering Bachelor Degree, Federal Technological University of Paraná. Campo Mourão, 2018.

This work has the objective of develop a 12-volt sealed acid lead battery charger with a capacity of 5 Ah, which will charge efficiently, avoiding damages during the process, consequently increasing the battery life. The battery is charged by a switched-mode power supply, consisting of a rectifier in conjunction with a DC-DC converter (Buck), connected to the 127/220 V, with an output voltage of 13.5 V and current maximum of 2 A during the charging process. The charger works in closed loop, the digital control of the system consists of a PIC16F877A microcontroller and voltage and current sensors, which read the signal at the output of the converter. With the practical results obtained with the assembly of the electronic circuits of the project, it was possible to make a graph of the straight line of charge and discharge of the battery, proving that the specifications of the charging method were made and the battery was correctly charged.

Keywords: Lead - acid battery charger, Buck converter, Switching power supply, Digital control

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos de uma Bateria.....	14
Figura 2 - Reação química durante os processos de carga e descarga	17
Figura 3 - Tensão da Bateria no Processo de Descarga.....	19
Figura 4 - Tensão da Bateria no Processo de Recarga	19
Figura 5 - Relação da Vida Útil e Temperatura de Operação.....	20
Figura 6 - Relação de Número de Ciclos e Profundidade de Descarga	20
Figura 7 - Modelo de Bateria de Chumbo-Ácido	21
Figura 8 – Tensão e Corrente na Bateria no Processo de Carga.....	23
Figura 9 - Retificador de Onda Completa em Ponte.....	24
Figura 10 - Formas de Onda do Retificador em Ponte.....	24
Figura 11 - Conversor CC-CC <i>Buck</i>	25
Figura 12 - Formas de Onda do <i>Buck</i> Operando em MCC	26
Figura 13 - Formas de Onda do <i>Buck</i> Operando em MCD	27
Figura 14 - Formas de Onda do <i>Buck</i> Operando em MCCr	28
Figura 15 - Modulação Por Largura de Pulso (PWM).....	29
Figura 16 - Diagrama de Blocos do Carregador de Bateria Chumbo-Ácido.....	30
Figura 17 – Circuito do Retificador Usado.....	32
Figura 18 – Circuito <i>Driver</i>	38
Figura 19 – Dimensões do Núcleo do Trafo de Pulso	39
Figura 20 – Montagem Conversor <i>Buck</i>	40
Figura 21 – Sensor de Tensão	40
Figura 22 – Sensor de Corrente ACS712.....	41
Figura 23 – Circuito Amplificador do Sensor de Corrente	42
Figura 24 - Circuito de Auxílio do Microcontrolador PIC16F877A	43
Figura 25 - Circuito Comparador para Amplificação do Sinal PWM	43
Figura 26 – Circuito de Controle.....	45
Figura 27 – Circuito das Fontes Auxiliares	46
Figura 28 – Placa do Retificador + Circuito de Proteção.....	47
Figura 29 – Placa do Conversor <i>Buck</i> + Circuito <i>Driver</i>	47
Figura 30 – Placa da Fonte Auxiliar	48
Figura 31 – Placa do Circuito de Controle.....	48
Figura 32 – Sinal do PWM em Malha Aberta	49
Figura 33 – Sinal da Tensão de Saída em Malha Aberta.....	50
Figura 34 – Reostato Utilizado	50
Figura 35 – Sinais de Tensão, PWM e Corrente, com razão cíclica mínima.....	51
Figura 36 – Sinais de Tensão, PWM e Corrente, com razão cíclica máxima	52
Figura 37 – Curva de Carga da Bateria.....	53
Figura 38 – Tensão na Bateria no Início e no Fim do Processo de Carga	53
Figura 39 – Curva de Descarga da Bateria	54
Figura 40 – Medição da Tensão e Corrente da Bateria, no Início e Fim do Processo de Descarga.....	54
Figura 41 - Fluxograma Do Software De Controle	59
Figura 42 – Layout da Placa de Circuito Impresso Retificador + Circuito de Proteção	62
Figura 43 – Layout da Placa de Circuito Impresso Conversor <i>Buck</i> + Circuito <i>Driver</i>	63
Figura 44 – Layout da Placa de Circuito Impresso da Fonte Auxiliar	64

Figura 45 – Layout da Placa de Circuito Impresso do Circuito Controlador65

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Profundidade de alcance de corrente em um fio
ΔiL	Varição da corrente
ΔT	Varição de temperatura
ΔV	Varição da Tensão
γ	Corrente de carga parametrizada
ε	Energia armazenada no indutor
f_s	Frequência de chaveamento
A_{cu}	Área de cobre do condutor
A_e	Área efetiva do núcleo
A_j	Área da janela do núcleo
Al	Fator de indutância
B_{max}	Densidade do campo magnético
C	Capacitância
D	Razão cíclica (<i>duty cycle</i>)
$D_{máx}$	Razão cíclica máxima
$D_{mín}$	Razão cíclica mínima
G	Ganho do conversor
$G(s)$	Função transferência
$I_{outMáx}$	Corrente de saída máxima
$I_{outMín}$	Corrente de saída mínima
J	Densidade de corrente no fio
K_u	Fator de utilização das janelas
K_j	Coeficiente de densidade dos fios
L	Indutância
N	Número de espiras
V_{ceSat}	Tensão de saturação do mosfet

V_d	Tensão direta no diodo
V_{in}	Tensão de entrada
$V_{inM\acute{a}x}$	Tensão de saída máxima
$V_{inM\acute{i}n}$	Tensão de saída mínima
V_{out}	Tensão de saída
T	Período do chaveamento
t_{on}	Tempo de condução do transistor
t_{off}	Tempo de não condução do transistor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.2 JUSTIFICATIVA	12
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 Objetivos Específicos	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA BATERIA	14
2.1.1 Funcionamento da Bateria	14
2.1.2 Parâmetros da Bateria.....	15
2.1.3 Tipos de Baterias	15
2.2 BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO	16
2.2.1 Características das Baterias de Chumbo-Ácido	16
2.2.2 Operação de uma Bateria de Chumbo-Ácido.....	17
2.2.3 Influência da Temperatura na Bateria de Chumbo-Ácido.....	19
2.2.4 Modelos de Bateria Chumbo-Ácido.....	21
2.3 MÉTODOS DE CARGA.....	22
2.3.1 Método a um Nível de Tensão e um Nível de Corrente	23
2.4 CONVERSORES DE POTÊNCIA	23
2.4.1 Retificador Onda-Completa	23
2.4.2 Conversor <i>Buck</i>	25
2.4.3 Modo De Condução Contínua (MCC).....	26
2.4.4 Modo De Condução Descontínua (MCD)	26
2.4.5 Modo De Condução Crítica (MCCr).....	27
2.5 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 METODOLOGIA.....	30
3.1.1 Retificador	30
3.1.2 Conversor <i>Buck</i>	30
3.1.3 Bateria de Chumbo Ácido.....	31
3.1.4 Fonte Auxiliar	31
3.1.5 Controle Digital.....	31
3.2 PROJETO DO RETIFICADOR.....	31
3.3 PROJETO DO <i>BUCK</i>	32
3.3.1 Razão Cíclica (<i>Dutycycle</i>)	33
3.3.2 Projeto do Indutor	33
3.3.3 Escolha do Núcleo	34
3.3.4 Dimensionamento do Núcleo	34
3.3.5 Número de Espiras.....	36
3.3.6 Escolha do Condutor	36
3.3.7 Cálculo do Capacitor	37
3.3.8 Circuito <i>Driver</i>	38
3.3.9 Projeto do Transformador de Pulso.....	38
3.3.10 Montagem do Conversor <i>Buck</i>	39
3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA MICROCONTROLADO	40
3.4.1 Implementação do Sensor de Tensão.....	40
3.4.2 Implementação do Sensor de Corrente.....	41
3.4.3 Circuito do Controlador Digital.....	42
3.4.4 Programa do Controlador	44
3.4.5 Circuito de Controle Completo	44

3.5 PROJETO DA FONTE AUXILIAR	45
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	47
4.1 MONTAGEM DO PROTÓTIPO	47
4.2 TESTE EM MALHA ABERTA.....	49
4.3 TESTE EM MALHA FECHADA	50
4.4 CURVA DE CARGA DA BATERIA.....	52
4.5 CURVA DE DESCARGA DA BATERIA.....	53
5 CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS.....	56
ANEXO 1.....	59
ANEXO 2.....	60
ANEXO 3.....	62
ANEXO 4.....	63
ANEXO 5.....	64
ANEXO 6.....	65
ANEXO 7.....	66

1 INTRODUÇÃO

É notável que nos últimos tempos a demanda por produtos eletrônicos, cresceu consideravelmente. Equipamentos que não eram acessíveis a grande parte da população até pouco tempo atrás, tornaram-se comuns e necessários para a maioria das pessoas.

A dependência de produtos elétricos e eletrônicos na sociedade é muito grande, em alguns setores a interrupção deste uso, pode causar grandes prejuízos, como uma câmara de refrigeração, por exemplo. Alguns casos são indispensáveis o uso de energia elétrica de forma contínua e ininterrupta, como em um aparelho de monitoramento de sinais vitais, comumente usados em Unidade de Terapia Intensiva (UTI).

A rede elétrica comum apresenta alguns tipos de problemas para quem precisa de uma fonte de energia sem quedas. Entre os problemas que comprometem a qualidade da energia ofertada estão picos de tensão, sobre tensão, subtensão e ruídos na carga, causados por interferência eletromagnética (SCHIAVON, 2007).

Devido a necessidade de uma fonte livre de quedas de tensão e as ocorrências destes tipos de problemas com a rede elétrica, foram desenvolvidos equipamentos com a finalidade de proporcionar uma fonte ininterrupta para a carga, que são popularmente chamados de *No-Breaks*.

Um *No-Break* é construído por alguns elementos relacionados a eletrônica de potência, cada um tem uma função específica, que operando em conjunto, chegam ao objetivo final proposto pelo equipamento. Os elementos que constituem uma fonte de tensão ininterrupta são um retificador, que transforma a tensão CA da rede em uma tensão CC, um banco de baterias que realizam o armazenamento de energia, um inversor que transforma a tensão CC armazenada em uma tensão CA na saída do conversor e circuitos eletrônicos que são responsáveis por fazer o controle do sistema (SCHIAVON, 2007).

As baterias de chumbo-ácido são um tipo de bateria que tem uma tecnologia considerada antiga, sendo inventada pelo francês Gastón Plante no ano de 1859, segundo (LAFUENTE, 2011). Apesar de existirem a muito tempo, as baterias de chumbo-ácido são comercializadas em grande escala até os dias de hoje, mais de 90% dos veículos produzidos utilizam este tipo de bateria (COELHO, 2001).

Mesmo que a ignição de automóveis seja a atividade que mais utiliza as baterias de chumbo-ácido, outros equipamentos também fazem o uso dessas baterias, sendo eles equipamentos hospitalares, empilhadeiras, sistema de luzes de emergência e os *No-Breaks* (STA-ELETRONICA, 2016).

Com a procura de baterias do modelo chumbo-ácido, torna-se necessário métodos que realizam o carregamento de forma eficiente, que seja rápido, econômico e que cause o menor dano possível. Neste trabalho será apresentado um retificador em ponte em conjunto com um conversor *Buck*, com controle digital, para garantir a eficiência do projeto.

1.2 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento do projeto de um carregador de bateria aborda algumas áreas da engenharia que estão diretamente relacionadas com as etapas do projeto, temáticas como Eletrônica de Potência e Controle, estão ligadas ao projeto, pela necessidade de uso de conversores CA-CC, conversores CC-CC e uso de microcontroladores para realizar o controle do sistema.

Outro aspecto importante para o desenvolvimento deste trabalho, é o fato de que o consumo de baterias de chumbo-ácido em equipamento como *No-breaks* ainda é muito grande, fazendo com que haja necessidades de formas de carregamentos eficientes.

1.3 OBJETIVOS

Desenvolver um carregador de bateria chumbo-ácido, através de um retificador em conjunto com um conversor CC-CC do tipo *Buck*, com um microcontrolador PIC16F877A fazendo o acionamento PWM e controle da tensão e corrente de carga.

Simular os resultados obtidos e construir um protótipo para uma bateria chumbo-ácido de 12 V e 5 Ah.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Revisão bibliográfica sobre os tipos de bateria;
- Revisão bibliográfica sobre as formas de carregamento de bateria modelo chumbo-ácido;
- Revisão bibliográfica sobre Retificador em Ponte;
- Revisão bibliográfica sobre Conversor CC-CC *Buck*;
- Desenvolvimento do Retificador;
- Desenvolvimento do Conversor CC – CC;
- Implementar o sistema de controle em um microcontrolador PIC16F877A;
- Construir protótipo para o carregamento de uma bateria chumbo-ácido 12 V com capacidade nominal de 5 Ah.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA BATERIA

2.1.1 Funcionamento da Bateria

Pode-se definir uma bateria, como um dispositivo que armazena energia através das reações químicas dos materiais em que é composta. De acordo com (LAZZARIN, 2006), “Fundamentalmente, as baterias operam pelo processo de reação química de oxidação e redução. ”

O processo de oxidação é responsável por liberar elétrons, enquanto a redução é o processo responsável por consumir os elétrons. Uma bateria é composta por quatro elementos, entre eles estão o ânodo, o cátodo, o eletrólito e um separador. O ânodo é responsável por liberar elétrons durante a reação química. O cátodo é responsável por receber os elétrons, liberados pelo ânodo. O eletrólito tem a função de conduzir a eletricidade no processo, podendo ser de material líquido, sólido ou gasoso. O separador, como o próprio nome diz, isola os dois lados da bateria. (LAZZARIN, 2006).

A Figura 1 demonstra como é formada uma bateria comum e como cada um de seus elementos atua.

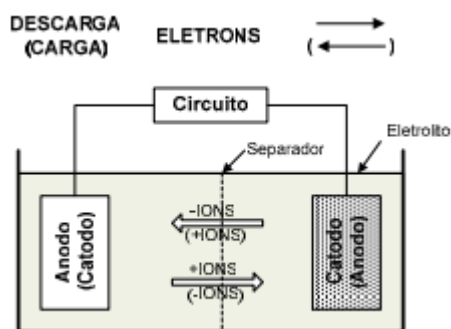


Figura 1 - Elementos de uma Bateria
 Fonte: Adaptado de LAZZARIN (2006).

Durante o processo de descarga da bateria, o ânodo libera elétrons para a oxidação, gerando íons positivos. Enquanto o cátodo, ao receber os elétrons liberados pelo ânodo, gera íons negativos. O separador permite o fluxo de íons, enquanto o fluxo de elétrons ocorre pelo eletrólito. No processo de carga da bateria, ocorre o inverso, o cátodo é responsável por liberar os elétrons e o ânodo recebe-os.

Simplificando o funcionamento, no processo de descarga, o cátodo se comporta como terminal positivo e o ânodo como terminal negativo. No processo de carga, o terminal positivo é o ânodo, e o terminal negativo é o cátodo (LAZZARAIN, 2006).

2.1.2 Parâmetros da Bateria

Alguns elementos e conceitos relacionados as baterias devem ser representados para que se possa ter um bom entendimento do seu funcionamento, entre eles estão as células, vida útil, auto descarga, carga e capacidade de armazenamento.

A células são dispositivos eletroquímicos capazes de fornecer energia para o um circuito elétrico externo, uma bateria é o conjunto de várias células (LAZZARIN, 2006).

A vida útil de uma bateria é definida pelo número de ciclos de carga e descarga que uma bateria pode realizar (MAMMANO, 2001).

A capacidade de armazenamento de uma bateria pode ser definida como a corrente máxima que uma bateria consegue fornecer durante um intervalo de tempo, sem que fique inutilizada. A unidade de medida é dada em Amperes-hora (Ah). Exemplo uma bateria que fornece em 20 horas uma corrente de 2 Amperes por hora, tem uma capacidade nominal de 40 Ah (LAZZARIN, 2006).

Auto Descarga é um fenômeno que ocorre com a bateria, mesmo que a bateria não esteja ligada a nenhum circuito, ele sofre uma descarga. Essa perda de energia armazenada acontece devido a fatores externos como umidade, temperatura, tempo de uso e quantidade de impurezas metálicas na bateria. Por esse motivo que com o passar do tempo as baterias perdem sua carga, mesmo que não sejam usadas. (OGAWA, 2011).

A carga pode ser definida como a ação de fornecimento de energia para a bateria, para que se possa realizar o armazenamento (OGAWA, 2011).

2.1.3 Tipos de Baterias

Existem diferentes tipos de baterias disponíveis no mercado. Cada bateria tem suas próprias características e benefícios. Entre as principais comercializadas estão

as baterias de chumbo-ácido, níquel-metal, lítion-íon e níquel-cádmio (LAZZARIN, 2006).

A seguir é apresentado uma breve descrição dos modelos de baterias mais utilizados.

- Níquel-metal: Compostas por níquel e hidreto metálico, possui uma carga elevada, por um período curto de tempo (COELHO, 2001).
- Lítion-íon: Como vantagens apresenta picos de potência elevados, e possui uma eficiência energética maior do que os demais modelos. Como desvantagens, está o fato de precisar ser aquecida à 70° C para operar corretamente. Os eletrodos metálicos de lítio têm um tempo de vida curto. Necessita de um controle de carga preciso, pois são sensíveis a sobrecarga (COELHO, 2001).
- Níquel-Cádmio: São as baterias usadas em celulares e outros produtos domésticos. Possui uma energia e densidade de potência maior do que as baterias de chumbo-ácido. Tempo de duração longo. Sua vida útil não é tão comprometida, quando está submetida a altas temperaturas, comparando com outras baterias. A grande desvantagem é seu material altamente tóxico (COELHO, 2001).
- Chumbo-ácido: A principal vantagem das baterias de chumbo-ácido está no preço, devido seu baixo custo, até hoje são altamente comercializadas. Como ponto negativo, pode-se destacar a densidade de energia menor em relação aos outros modelos. A dificuldade de determinar o estado de carga, também pode ser caracterizado com uma desvantagem (COELHO, 2001).

2.2 BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

2.2.1 Características das Baterias de Chumbo-Ácido

Apesar de ser um modelo de bateria antigo, sendo inventada no século XIX, somente depois da produção em larga escala de veículos, por possuir um baixo custo e facilidade no processo de produção é que as baterias de chumbo-ácido se tornaram altamente comercializadas, até os tempos atuais (BASTOS, 2013).

O principal ramo de mercado que utiliza a bateria de chumbo-ácido, é o setor automobilístico. Cerca de 90% dos carros vendidos, usam este modelo de bateria (COELHO, 2011).

São constituídas por placas de dióxido de chumbo (positivo), placas de chumbo (negativo) e ácido sulfúrico, que é usado como o eletrólito. A Figura 2 mostra o funcionamento da bateria através das reações químicas. Durante o processo de descarga, os elementos químicos reagem, formando água e sulfato de chumbo. No processo de carga, essa reação é revertida, voltando ao estado inicial (LAZZARIN, 2006).



Figura 2 - Reação química durante os processos de carga e descarga
Fonte: Adaptado de LAZZARIN (2006).

De acordo com (COPETTI, 2007), alguns fatores relacionados aos elementos químicos, podem causar danos a vida útil da bateria, entre eles estão a corrosão, degradação e sulfatação.

- **Corrosão:** Ocorre devido a transformação do chumbo metálico em óxidos de chumbo. Quando o eletrodo é corroído, a resistência ôhmica interna é elevada e o eletrodo perde seu material ativo.
- **Degradação:** Ocorre devido a constante transformação do material, durante o processo de carga e descarga. Ao longo do tempo o eletrodo pode ser rompido, danificando a bateria.
- **Sulfatação:** É o processo de recristalização dos cristais de PbSO_4 em grânulos de PbSO_4 . Esse fato ocorre, se a bateria ficar longos períodos de tempo operando com uma pequena quantidade de carga armazenada. A sulfatação da bateria, faz com que se reduza o volume de chumbo e de ácido sulfúrico. A bateria tem perda de eficiência, pois as capacidades de carga e fornecimento de energia são reduzidas.

2.2.2 Operação de uma Bateria de Chumbo-Ácido

A seguir é apresentado uma breve descrição de alguns conceitos, que são fundamentais para o entendimento do funcionamento de uma bateria, segundo (BASTOS, 2013).

- **Tensão Nominal:** É a tensão definida em cada célula da bateria, geralmente com o valor de 2,4 V.

- Tensão de Flutuação: Também chamada de tensão de recarga. É uma tensão aplicada com o objetivo de manter o acumulador sempre no estado de plena carga.
- Tensão Final de Carga: É a tensão limite onde o acumulador é considerado descarregado, com valores abaixo dessa tensão.
- Estado de Carga: É um parâmetro usado para informar a carga existente, assim evitando uma sobrecarga ou descarga acima do valor permitido. Também é chamado de SOC (*State of Charge*).

Quando um *No-Break* está em funcionamento, se uma tensão de flutuação for aplicada de forma errada, pode causar danos a bateria. Se no momento da recarga a tensão de flutuação for muito baixa, pode ocorrer a sulfatação da bateria, em contrapartida se a tensão de flutuação for muito alta, pode ocorrer perda de água, causando problemas relacionados a corrosão (LAZZARIN, 2006).

A tensão acumulada na bateria varia com os processos de carga e descarga, essa variação é causada devido a fatores como temperatura, corrente fornecida, tempo de carga, tempo de descarga e de aspectos construtivos da bateria (LAZZARIN, 2006).

As variações de tensão na carga e descarga em relação ao tempo e a corrente, operando a uma temperatura de 25° C, podem ser vistas na Figura 3 e Figura 4.

Na Figura 3 está representado a tensão no processo de descarga. Os valores das correntes representadas na imagem são de 80%, 60% e 20% da capacidade nominal (A capacidade nominal está representada pela letra C). Percebe-se que quanto maior for o nível de corrente, mais rápido será a descarga da bateria. A tensão diminui rapidamente dos 12 V até os 10,5 V que é o valor da tensão de fim de carga.

Na Figura 4 está representado a tensão no processo de recarga. Os valores das correntes representados na imagem são de 20%, 15% e 10% da capacidade nominal. Quando é atingido o valor limiar de 2,4 V, o carregamento da célula está completo. O tempo para atingir a tensão limiar é proporcional a corrente aplicada.

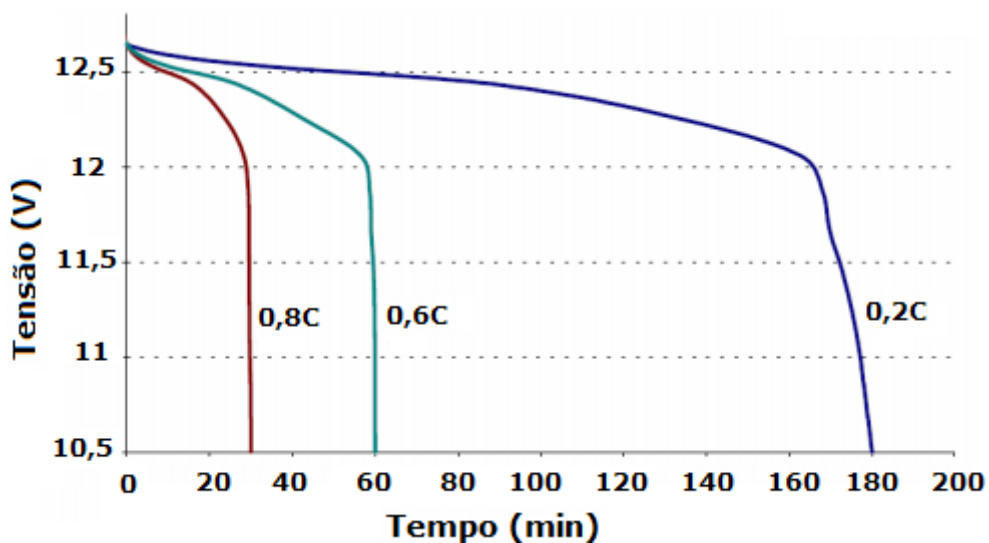


Figura 3 - Tensão da Bateria no Processo de Descarga
Fonte: Adaptado de LAZZARIN (2006).

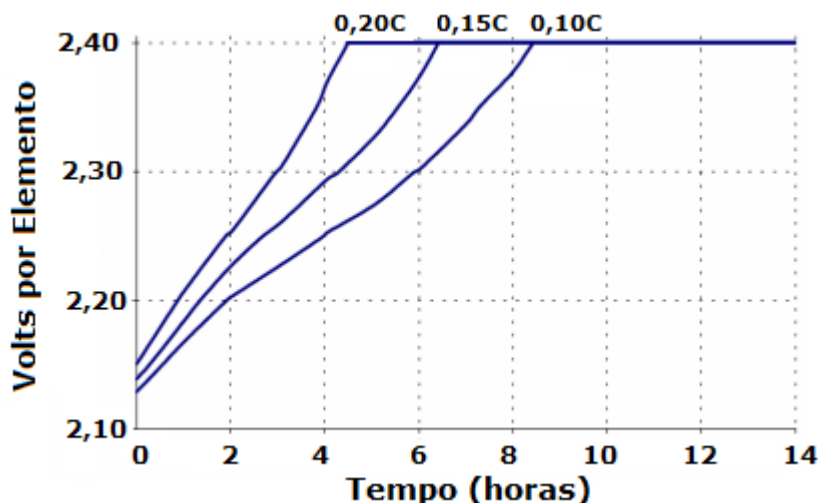


Figura 4 - Tensão da Bateria no Processo de Recarga
Fonte: Adaptado de LAZZARIN (2006).

As baterias de chumbo-ácido possuem uma carga lenta em relação a outros modelos de baterias, o motivo dessa carga ser lenta, está relacionado com a corrente aplicada no processo, as baterias de chumbo-ácido trabalham com correntes entre 10% e 20% da capacidade nominal da bateria (LAZZARIN, 2006).

2.2.3 Influência da Temperatura na Bateria de Chumbo-Ácido

A maioria das baterias foram projetadas para trabalhar a uma temperatura de 25° C. A tensão de flutuação é ajustada conforme as variações de temperatura, afim

de evitar danos na bateria. Para realizar esses ajustes, é feito uma medição de temperatura através dos polos da bateria e da sua superfície (LAZZARIN, 2006).

A vida útil está diretamente relacionada com a temperatura em que a bateria trabalha, quanto maior a temperatura de operação, menor será a vida útil (BASTOS, 2013).

A Figura 5 demonstra o desgaste que uma bateria sofre com a exposição a temperaturas mais elevadas.

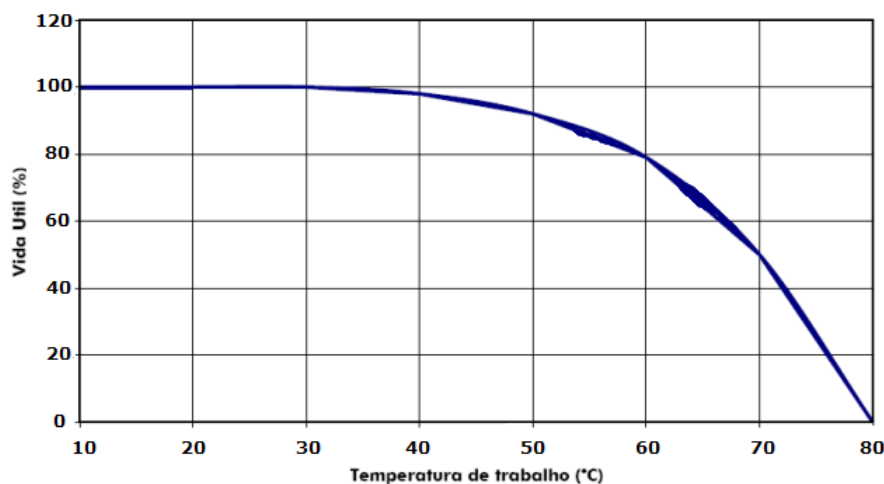


Figura 5 - Relação da Vida Útil e Temperatura de Operação
Fonte: Adaptado de CONTROLS (2008).

Outro aspecto que também interfere na vida útil das baterias, é a profundidade de descarga que é realizada. Uma bateria recarregável pode fazer o processo de carga e descarga diversas vezes, mas o número de ciclos que pode ser efetuado é inversamente proporcional à profundidade de descarga que é feita (BASTOS, 2013).

A Figura 6 demonstra um gráfico com o número de ciclos e a porcentagem em que a bateria é descarregada como parâmetros.

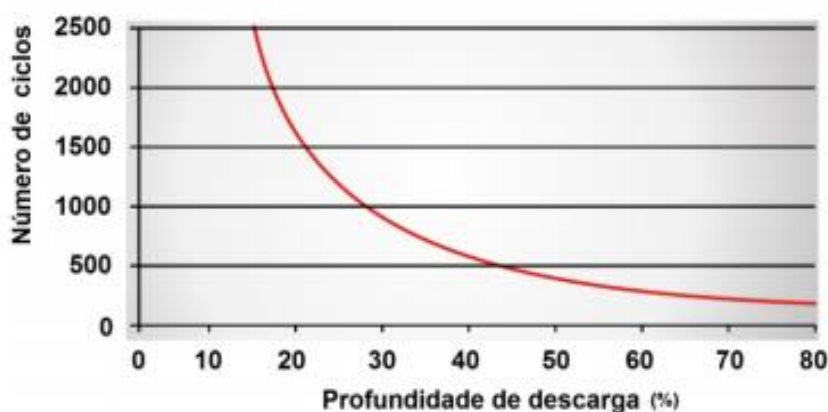


Figura 6 - Relação de Número de Ciclos e Profundidade de Descarga
Fonte: Adaptado BASTOS (2013).

2.2.4 Modelos de Bateria Chumbo-Ácido.

Em relação a construção de uma bateria existem dois principais tipos as baterias de chumbo-ácido inundados (*Flooded Lead Acid – FLA*) e as baterias de chumbo-ácido de válvula regulada (*Valve Regulated Lead Acid – VRLA*) (OGAWA, 2011).

Nas baterias FLA a principal característica é que o material do eletrólito (responsável pela condução da eletricidade) é uma solução líquida. Esse tipo de bateria necessita de manutenção, que depois de um determinado tempo, é feita com a troca do fluído (OGAWA, 2011).

As baterias VRLA são divididas em duas categorias, que são as que usam placas de vidro absorvente (*Absorbed Glass Mat – AGM*) e as baterias seladas (*Sealed Lead Acid - SLA*) (OGAWA, 2011).

Nas baterias seladas o eletrólito é feito de gel, são usadas principalmente em *No-Breaks* e produtos hospitalares. A principal vantagem é que não necessita de manutenção, a desvantagem é que deve ser descarregada a uma taxa menor de corrente, para evitar a formação de gases na parte interna (OGAWA, 2011).

Nas baterias AGM a condução é feita por pequenas placas de fibra de vidro, as vantagens e desvantagens são similares as das baterias seladas que usam gel (OGAWA, 2011).

Está representado na Figura 7, uma bateria de chumbo-ácido com todos os seus elementos.

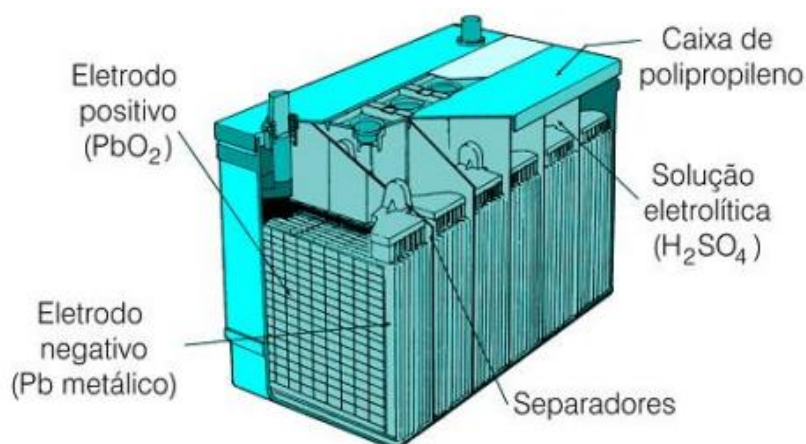


Figura 7 - Modelo de Bateria de Chumbo-Ácido
Fonte: Adaptado de OGAWA (2011).

2.3 MÉTODOS DE CARGA

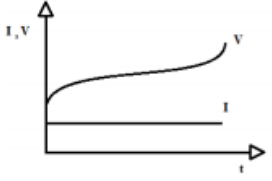
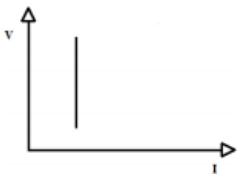

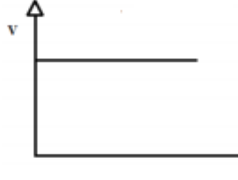
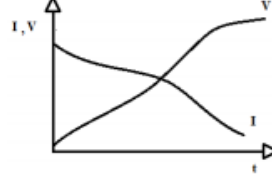
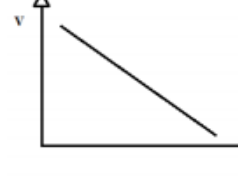
Existem várias formas de se fazer o carregamento das baterias, os principais métodos para realizar esse carregamento são por corrente constante, tensão constante ou potência constante (COELHO, 2001).

Usando esses métodos como referência pode-se desenvolver outras maneiras para carregar uma bateria, com alterações nos valores das variáveis que se deseja controlar. Esse controle é feito a partir de um conjunto de sensores, microcontroladores e circuitos integrados (LAZZARIN, 2006).

Os métodos são diferenciados pelas curvas da tensão e corrente de carga. Alguns fatores externos podem interferir nas curvas características de cada método, entre eles estão a temperatura ambiente, variações de tensão e frequência (COELHO, 2001).

O Quadro 1 demonstra a curva característica da corrente e tensão no tempo de cada método apresentado.

Apesar de existir várias formas de fazer o carregamento, somente o método a um nível de corrente e um nível de tensão será abordado, por possuir uma forma mais simples de ser implementada em sistemas físicos.

Tensão e corrente no tempo	Característica da carga	
		Corrente constante
		
		Potência constante

Quadro 1 - Curvas características dos métodos de carga.

Fonte: Adaptado de COELHO (2001).

2.3.1 Método a um Nível de Tensão e um Nível de Corrente

É o método mais utilizado devido a sua simplicidade de implementação, possuindo apenas dois estágios no carregamento. No primeiro estágio a corrente possui valor constante, até o momento em que a tensão fique com o valor da tensão de flutuação (recarga). No segundo estágio é feita a manutenção da carga, aplicando o valor da tensão de flutuação na bateria (COELHO, 2001).

A grande desvantagem deste método é não poder determinar se a bateria está totalmente carregada (LAZZARIN, 2006).

A Figura 8 mostra o comportamento da tensão e da corrente durante o processo de carga.

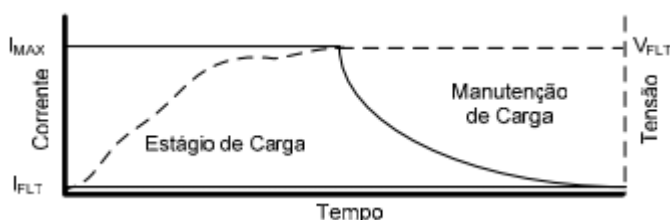


Figura 8 – Tensão e Corrente na Bateria no Processo de Carga
Fonte: Adaptado de LAZZARIN (2006).

2.4 CONVERSORES DE POTÊNCIA

Para realizar a carga de uma bateria com eficiência direto da rede elétrica, é necessário o uso de conversores corrente alternada – corrente contínua (CA – CC) e corrente contínua – corrente contínua (CC – CC). Existem diversos tipos de conversores estáticos de potência, mas para a realização da carga da bateria, somente dois serão necessários, que são o retificador em ponte e um conversor CC - CC do tipo *Buck*.

2.4.1 Retificador Onda-Completa

A principal função de um retificador é transformar uma tensão corrente alternada (CA) em uma tensão corrente contínua (CC). Os retificadores de onda-completa são melhores, pois conseguem aproveitar tanto o semi-ciclo positivo, quanto o semi-ciclo negativo, obtendo assim uma ondulação consideravelmente menor do que retificadores de meia-onda. (HART, 2011).

Os retificadores de onda-completa se dividem em dois principais tipos, com tomada central e em ponte.

A principal vantagem do modelo em ponte é que não necessita de um transformador com tomada central, a desvantagem é que ocorre uma queda de tensão maior provocada pelos diodos, por possuir dois diodos em cada ciclo (CORRADI, 2016).

A Figura 9 mostra o circuito de um retificador em ponte:

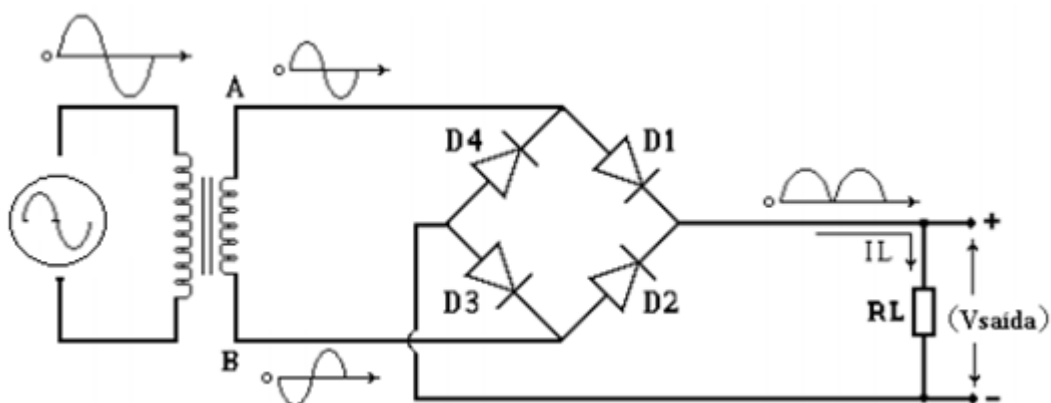


Figura 9 - Retificador de Onda Completa em Ponte
Fonte: Adaptado de CORRADI (2016).

A Figura 10 mostra a forma de onda na entrada de fonte CA e a forma de onda retificada no resistor de carga RL.

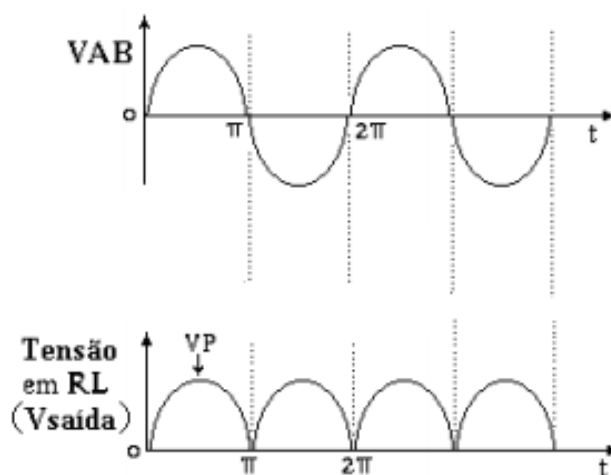


Figura 10 - Formas de Onda do Retificador em Ponte
Fonte: Adaptado de CORRADI (2016).

2.4.2 Conversor *Buck*

O conversor *Buck* é um conversor CC-CC abaixador de tensão, onde o valor médio na saída é menor ou igual ao valor médio da entrada, e a corrente média de saída é maior ou igual a corrente média de entrada. A queda no valor de tensão, acontece em razão do chaveamento, dependendo do tempo em que a chave fica fechada (0 – 100%), varia-se o valor da tensão de saída (AHMED, 2000).

A Figura 11 mostra o circuito de um conversor *Buck*.

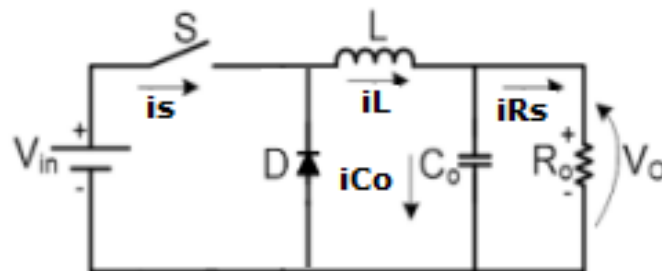


Figura 11 - Conversor CC-CC *Buck*
Fonte: Adaptado de AHMED (2000).

O funcionamento do conversor *Buck* pode ser dividido em duas etapas, com a chave fechada e com a chave aberta. Com a chave fechada o indutor é carregado, com a chave aberta, o diodo passa a conduzir e o indutor passa a ser descarregado.

O ganho é definido como a razão da tensão de saída sobre a tensão de entrada, mas pode ser definido também em razão do tempo de chaveamento, como mostra a Equação 1 e Equação 2. Onde t_{on} é o tempo que a chave fica fechada, T o tempo total de operação e o ganho G é igual a razão cíclica (AHMED, 2000).

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (1)$$

$$G = D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2)$$

Em relação aos modos de operação, existem três diferentes maneiras que o conversor pode trabalhar. Os modos se diferenciam em relação a corrente de descarga no indutor, que pode ser descarregado completamente ou parcialmente (BALESTERO, 2006).

2.4.3 Modo De Condução Contínua (MCC)

No MCC o indutor não é descarregado completamente, o valor da corrente nunca chega ao valor nulo. As formas de onda do conversor *Buck* operando em modo de condução contínua podem ser vistas na Figura 12 (BALESTERO, 2006).

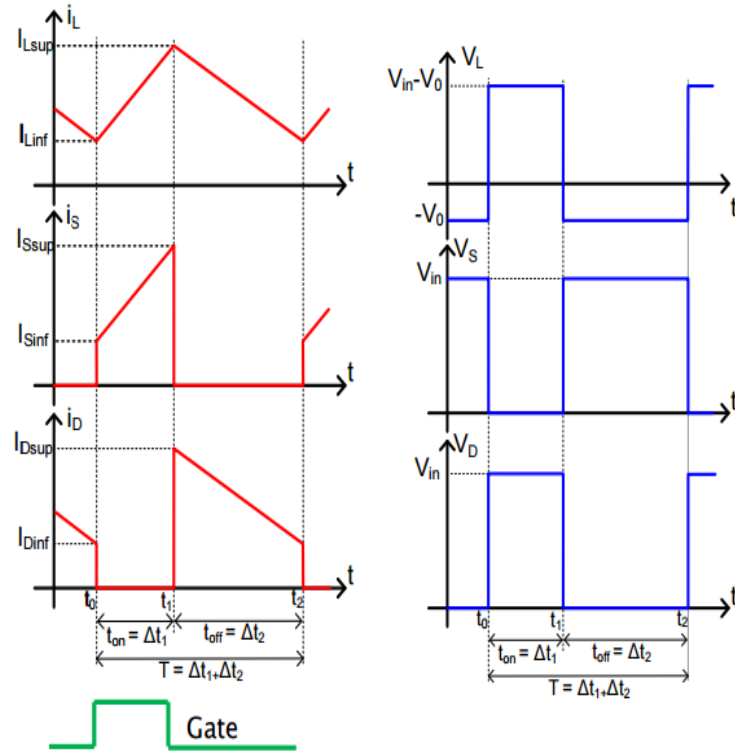


Figura 12 - Formas de Onda do *Buck* Operando em MCC

Fonte: Adaptado de AHMED (2000).

O ganho do conversor operando em MCC pode ser visto na Equação 2. Os cálculos para o indutor e capacitor podem ser vistos nas equações 3 e 4 (AHMED, 2000).

$$L = \frac{(V_{in} - V_{out}) * D}{\Delta i_L * f} \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{8} * \frac{\Delta i_L}{\Delta V * f_s} \quad (4)$$

2.4.4 Modo De Condução Descontínua (MCD)

No MCD o indutor é descarregado completamente. As formas de onda do conversor *Buck* operando em modo de condução descontínua podem ser vistas na Figura 13 (BALESTERO, 2006).

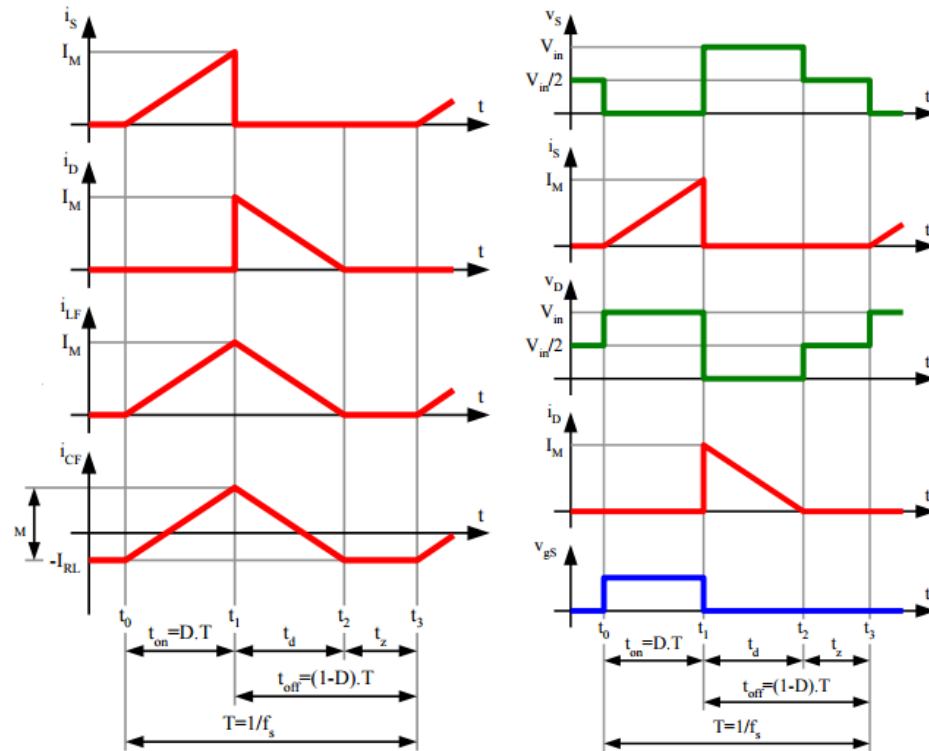


Figura 13 - Formas de Onda do *Buck* Operando em MCD
Fonte: Adaptado de AHMED (2000).

O ganho do conversor em MCD muda, a Equação (5) representa esse novo ganho (AHMED, 2000).

$$G = \frac{D^2}{\gamma - D^2} \quad (5)$$

Onde γ é a corrente de carga parametrizada, que está representado na equação (6).

$$\gamma = \frac{2 * L * i_R}{V_{in} * T} \quad (6)$$

2.4.5 Modo De Condução Crítica (MCCr)

No MCCr o conversor trabalha no valor limite entre os modos de condução contínua e descontínua. As formas de onda do conversor *Buck* operando em modo de condução crítica podem ser vistas na Figura 14 (BALESTERO, 2006).

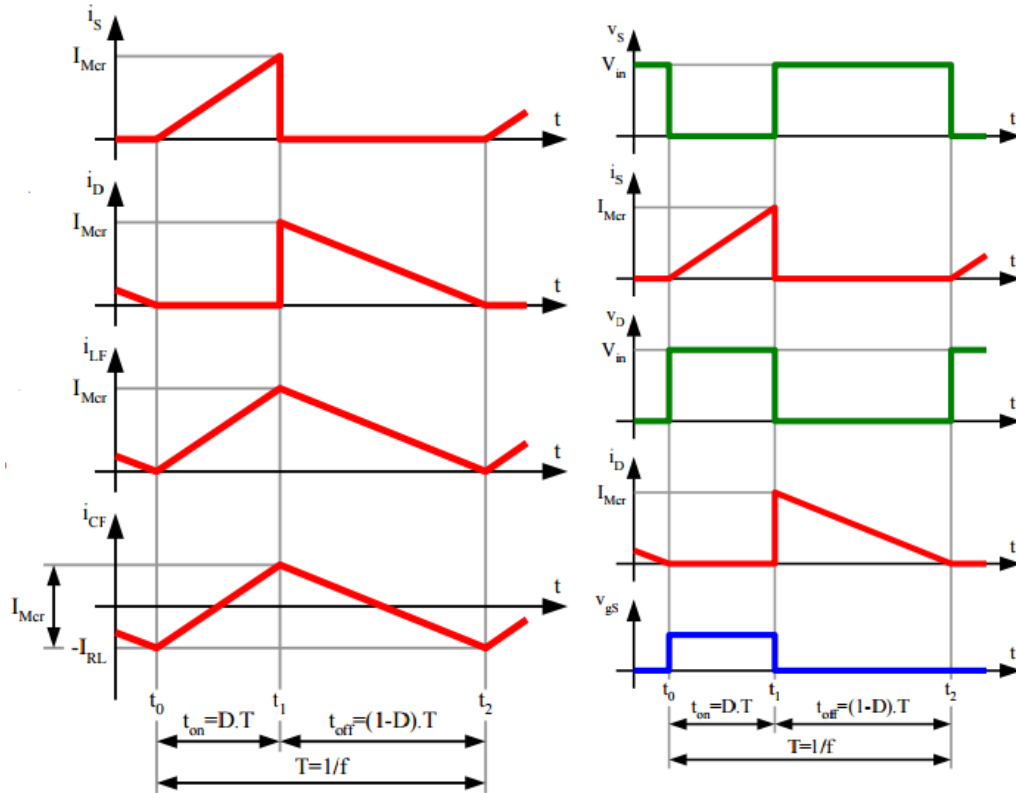


Figura 14 - Formas de Onda do *Buck* Operando em MCCr
Fonte: Adaptado de AHMED (2000).

O ganho do conversor em MCCr pode ser representado pela Equação (5). A corrente de carga parametrizada, a Equação (7) mostra esse novo valor (AHMED, 2000).

$$\gamma = G - G^2 \quad (7)$$

2.5 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO

A modulação por largura de pulso, também conhecida como PWM (*Pulse Width Modulation*), essa técnica é realizada quando se quer uma potência média na carga. É necessário que se faça um chaveamento, podendo ser feito com MOSFET, IGBT ou um transistor bipolar de junção, mudando o tempo em que a chave conduz, a largura no sinal de tensão média na carga também muda. Então, quanto maior for o tempo em que a chave estiver conduzindo, maior será a potência média na carga (BALESTERO, 2006).

A modulação pode ser vista na Figura 15.

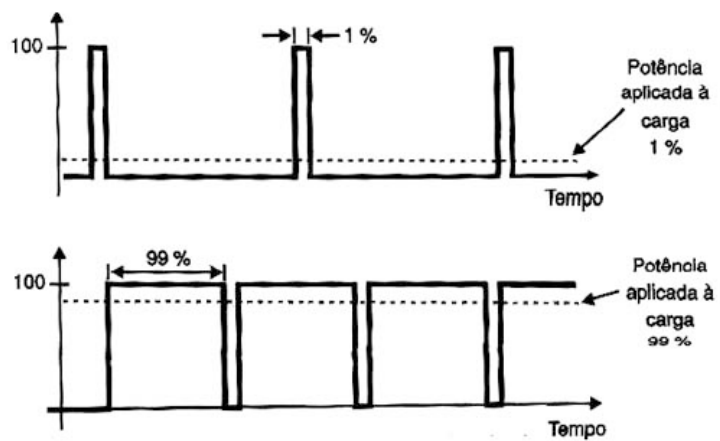


Figura 15 - Modulação Por Largura de Pulso (PWM)
Fonte: Adaptado de NEWTONCBRAGA (2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA

Para realizar a montagem do carregador de bateria chumbo-ácido, o seguinte sistema de diagrama de blocos, representado na Figura 16, será usado como referência. Cada etapa do sistema será desenvolvida, com análises, simulações e será implantado em um sistema físico, afim de carregar uma bateria com os conceitos vistos neste trabalho. O carregador que será desenvolvido, terá uma fonte de alimentação de 127/220 V com frequência de 60 Hz, podendo ser ligado na rede comum.

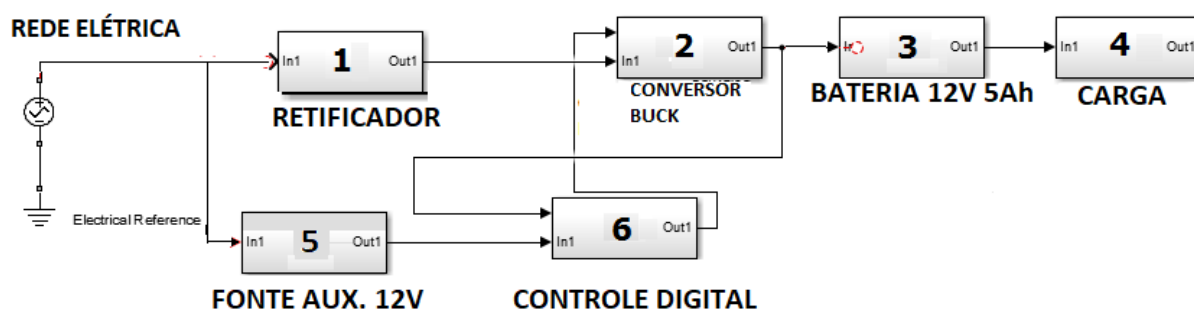


Figura 16 - Diagrama de Blocos do Carregador de Bateria Chumbo-Ácido
Fonte: Autoria Própria.

3.1.1 RETIFICADOR

No bloco 1 do diagrama da Figura 16, será desenvolvido um retificador em ponte, com o propósito de transformar a tensão CA da rede, em uma tensão CC que será ligada na entrada do conversor *Buck*.

3.1.2 CONVERSOR *BUCK*

No bloco 2 do diagrama da Figura 16, será desenvolvido um conversor *Buck*, que tem a função de diminuir a tensão retificada, que pode variar de 140 a 355 V de pico, dependendo da tensão de entrada, para os níveis adequados para fazer o carregamento.

3.1.3 BATERIA DE CHUMBO ÁCIDO

O bloco 3 do diagrama da Figura 16 representa a bateria que será carregada. O modelo escolhido será uma Bateria Selada VRLA GP12 – 5 S. No Quadro 2 contém as especificações básicas do produto de acordo com o fabricante.

Modelo	GP12 – 5 S
Tensão Nominal	12 V
Capacidade Nominal	5 A-h
Tensão de Flutuação	13,50 a 13,8V
Corrente Inicial	1,5 A
Temperatura de Operação	25° C

Quadro 2 – Especificações da Bateria Chumbo-Ácido
Fonte: Adaptado de GET POWER (2017).

O bloco 4 do diagrama representa qualquer carga que use a bateria como fonte de tensão.

3.1.4 FONTE AUXILIAR

O bloco 5 representa uma fonte auxiliar de 12 V com a finalidade de alimentar o circuito de controle.

3.1.5 CONTROLE DIGITAL

O bloco 6 do diagrama representa o controle digital do sistema. O controle PWM será implementado através de um microcontrolador PIC16F877A com o programa desenvolvido em linguagem C.

3.2 PROJETO DO RETIFICADOR

No momento que o circuito é ligado os capacitores estão descarregados, comportando-se como um curto-circuito, o que gera uma corrente alta. Para limitar essa corrente de partida, foi feito um circuito de proteção, que funciona com um resistor ligado em série na entrada, este tem a finalidade de reduzir a corrente de

entrada. Um circuito auxiliar, funciona como um temporizador que aciona o relé, responsável por trocar a saída do relé e retirar o resistor R1 do circuito (POZZATTI, 2015).

O circuito utilizado está representado na Figura 17.

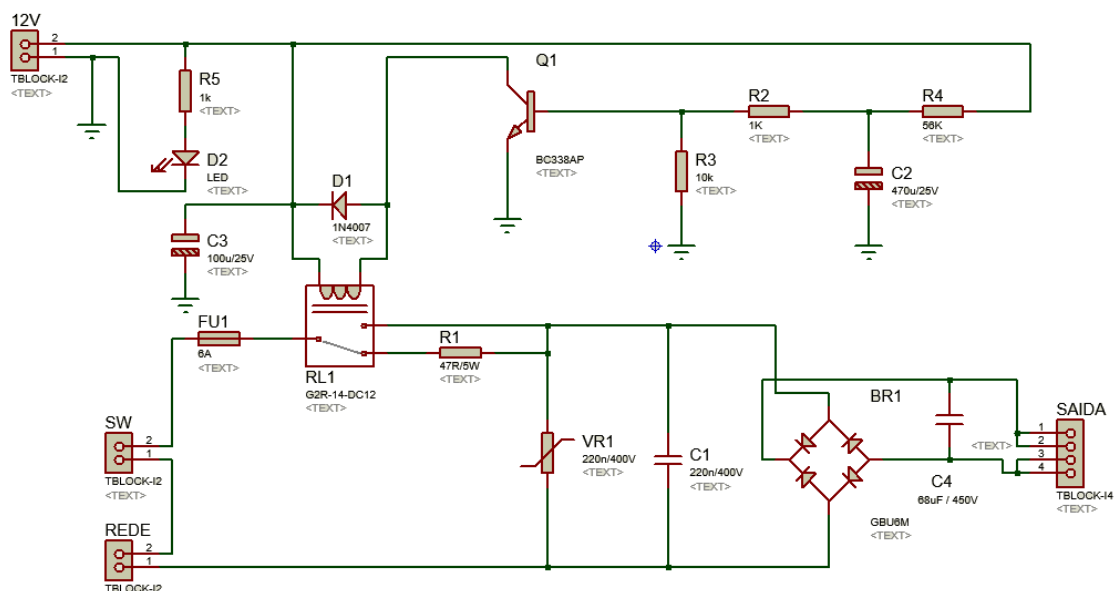


Figura 17 – Circuito do Retificador Usado
Fonte: Adaptado de POZZATTI (2015).

3.3 PROJETO DO BUCK

Os parâmetros para o projeto do conversor *Buck* estão definidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do Projeto do Conversor *Buck*

Símbolo	Parâmetro	Valor
f_c	Frequência de chaveamento	40 kHz
$V_{inMáx}$	Tensão Máxima de entrada	355 V
$V_{inMín}$	Tensão Mínima de entrada	140 V
V_{out}	Tensão de Saída	13,5 V
$I_{outMáx}$	Corrente máxima de saída	3,7 A
$I_{outMín}$	Corrente mínima de saída	0,5 A
V_{ceSat}	Tensão de saturação do MOSFET	1 V
V_d	Tensão direta do diodo	0,7 V

Fonte: Autoria Própria.

3.3.1 Razão Cíclica (*Duty cycle*)

Para definir os valores do indutor e capacitor do projeto, primeiro é necessário encontrar a razão cíclica em que o conversor irá trabalhar.

Como visto na Equação 2, o valor de D é a razão entre a tensão de saída sobre a tensão de entrada.

Com isso podemos obter o valor de D_{min} , usando a tensão máxima de entrada, representadas na Equação (8).

$$D_{min} = \frac{V_{out}}{V_{inMax}} = \frac{13,5}{350} = 0,04 \quad (8)$$

E também podemos obter o valor de D_{max} , usando o valor da tensão mínima de entrada. A equação pode ser vista abaixo.

$$D_{max} = \frac{V_{out}}{V_{inMin}} = \frac{13,5}{140} = 0,1 \quad (9)$$

3.3.2 Projeto do Indutor

Para realizar o projeto do Indutor, é necessário que se encontre o valor da indutância, que pode ser obtido com a seguinte equação (POMILIO, 2014).

$$L > \frac{D_{min} * (1 - D_{min}) * V_{inmax}}{2 * I_{outmin} * f_c} = \frac{0,04 * (1 - 0,04) * 350}{2 * 0,5 * 40k} = 336 \mu H \quad (10)$$

A energia que o indutor consegue armazenar é dado na equação 11.

$$\varepsilon = \frac{1}{2} * L * (I_{outmin} + I_{outmax})^2 = \frac{1}{2} * 336 \mu * (0,5 + 3,7)^2 = 2,96 mJ \quad (11)$$

3.3.3 Escolha do Núcleo

O núcleo escolhido um núcleo de ferrite do tipo EE para o projeto. A razão da escolha desse modelo, se dá ao fato de que os núcleos do tipo EE possuem um circuito magnético fechado, fazendo com que se reduza interferências de outros componentes (TREVISO, 2006).

3.3.4 Dimensionamento do Núcleo

Sabendo os valores de indutância e de energia armazenada no indutor é possível dimensionar o núcleo que será usado no projeto (TREVISO, 2006).

O núcleo possui uma área efetiva, denominada de A_e e uma área A_j com a finalidade de enrolar as espiras do indutor. O produto dessas áreas, pode ser relacionado com a energia do indutor, conforme a equação 12 (LEÃO, 2016).

$$A_j = \left(\frac{2 * \epsilon_{max} * 10^4}{K_u * K_j * B_{max}} \right)^2 cm^4 \quad (12)$$

Onde:

- K_u representa o fator de utilização das janelas. Pode ser definido com 0,4 (TREVISO).

- K_j – representa o coeficiente de densidade dos fios.

- B_{max} tem um valor de 0,3T, para núcleos com entreferro.

- A variação de temperatura (ΔT), foi estipulada para um valor de 30°.

O coeficiente de densidade do fio (K_j), é retirado da tabela 2.

Tabela 2 – Valores de K_j e X dos tipos de núcleos.

Núcleo	K_j $20^\circ\text{C} \leq \Delta t \leq 60^\circ\text{C}$	X
POTE	$74,78. \Delta T^{0,54}$	+0,17
EE	$63,35. \Delta T^{0,54}$	+0,12
X	$56,72. \Delta T^{0,54}$	+0,14
RM	$71,7. \Delta T^{0,54}$	+0,13
EC	$71,7. \Delta T^{0,54}$	+0,13
PQ	$71,7. \Delta T^{0,54}$	+0,13

Fonte: Adaptado de LEÃO (2016).

Assim obtêm-se o valor de K_j , com a seguinte equação.

$$K_j = 63,35 * \Delta T^{0,54} = 63,35 * 30^{0,54} = 397,55 \quad (13)$$

O valor de z , pode ser obtido com a seguinte equação, onde o valor de x , encontrado na Tabela 2.

$$z = \frac{1}{1-x} = \frac{1}{1-0,12} = 1,136 \quad (14)$$

Com os valores obtidos é possível definir $A_j = 1,28 \text{ cm}^4$. Existem dimensões padrões para o tamanho do núcleo, o núcleo de ferrite do projeto é escolhido de acordo com os valores da Tabela 3. O núcleo que melhor se adapta ao projeto é o 42/21/15.

Tabela 3 – Parâmetros dos tipos de núcleo EE.

Designação	$A_p \text{ (cm}^4\text{)}$	$l_e \text{ (cm)}$	$A_e \text{ (cm}^2\text{)}$
20/10/5	0,48	4,28	0,312
30/15/7	0,71	6,69	0,597
30/15/14	1,43	6,69	1,20
42/21/15	4,66	9,7	1,82
42/21/20	6,14	9,7	2,40
55/28/21	14,91	12,3	3,54
65/33/26	36,28	14,7	5,25

Fonte: Adaptado de POZZATTI (2015).

3.3.5 Número de Espiras

Para realizar o cálculo do número de espiras do indutor, é necessário que se encontre o fator de indutância Al , descrito na equação 15 (LEÃO, 2016).

$$Al = \frac{Ae * Bmax}{2 * \epsilon} = 503 \text{ nH/esp}^2 \quad (15)$$

Com o valor de Al definido é possível calcular o número de espiras, de acordo com a seguinte equação:

$$N = \sqrt{\frac{L}{Al}} = \sqrt{\frac{336\mu}{503n}} = 26 \text{ espiras} \quad (16)$$

3.3.6 Escolha do Condutor

A densidade de corrente no cobre é definida pela equação 17.

$$J = Kj * Ap^{-X} = 397,55 * 1,28^{-0,12} = 388,95 \text{ A/cm}^2 \quad (17)$$

Com o valor de J definido, é possível calcular a área do condutor, representada na seguinte equação.

$$Acu = \frac{Ioutmax}{J} = \frac{3,7}{388,95} = 0,0095 \text{ cm}^2 \quad (18)$$

O condutor não pode ter um valor maior que 2Δ , pois pode sofrer o efeito *skin*, que é o aumento da resistência do condutor elétrico, causado pela diminuição da área efetiva do condutor (LEÃO, 2016).

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f}} = \frac{7,5}{\sqrt{40k}} = 0,0375 \quad (19)$$

Mesmo a área do condutor sendo menos do que 2Δ , no projeto foi usado 3 fios de cobre. Portanto a área terá o valor da equação 20.

$$A_{cu} = \frac{0,0095}{3} = 0,0032 \text{ cm}^2 \quad (20)$$

De acordo com a Tabela 4, o condutor mais próximo para ser utilizado é o #21AWG, com área de 0,004105 cm².

Tabela 4 – Especificações do fio de cobre

FIOS E CABOS PADRÃO AWG / MCM <i>American Wire Gauge e 1000 Circular Mils (1 mil = .0254 mm)</i>					FIOS E CABOS PADRÃO MÉTRICO	
Bitola	Diâmetro aproximado (mm)	Seção aproximada (mm ²)	Resistência linear aproximada ¹ (ohm/m)	Corrente máxima ² (A)	Seção nominal (mm ²)	Corrente máxima ² (A)
40 AWG	0,08	0,005	3,4	-	-	-
39 AWG	0,09	0,006	2,7	-	-	-
38 AWG	0,10	0,008	2,2	-	-	-
37 AWG	0,11	0,010	1,7	-	-	-
36 AWG	0,13	0,013	1,4	-	-	-
35 AWG	0,14	0,016	1,1	1	-	-
34 AWG	0,16	0,020	0,86	-	-	-
33 AWG	0,18	0,025	0,68	-	-	-
32 AWG	0,20	0,032	0,54	-	-	-
31 AWG	0,23	0,040	0,43	-	-	-
30 AWG	0,26	0,051	0,34	2	0,05	2
29 AWG	0,29	0,064	0,27	-	-	-
28 AWG	0,32	0,081	0,21	-	-	-
27 AWG	0,36	0,10	0,17	-	-	-
26 AWG	0,41	0,13	0,13	-	-	-
25 AWG	0,46	0,16	0,11	-	-	-
24 AWG	0,51	0,21	0,084	4	0,20	4
23 AWG	0,57	0,26	0,067	-	-	-
22 AWG	0,64	0,33	0,053	6	0,30	6
21 AWG	0,72	0,41	0,042	-	-	-

Fonte: Adaptado de POZZATTI (2015).

3.3.7 Cálculo do Capacitor

Usando a equação 4, é possível definir capacitor de saída do conversor *Buck*.

$$C = \frac{1}{8} * \frac{\Delta i_L}{\Delta V * f_s} = \frac{1}{8} * \frac{(0,5 * 3,7)}{(0,022 * 13,5) * 40k} = 19,3 \mu F \quad (21)$$

Porém para o circuito prático, foi definido um capacitor de 1000 μF, para se obter uma melhor filtragem.

3.3.8 Circuito *Driver*

O circuito driver tem a finalidade de fazer a comunicação entre os circuitos do Conversor *Buck* e o circuito de controle. A tensão é amplificada para que o MOSFET possa ser ativado (POZZATTI, 2015).

O circuito driver utilizado no projeto, está representado na Figura 18.

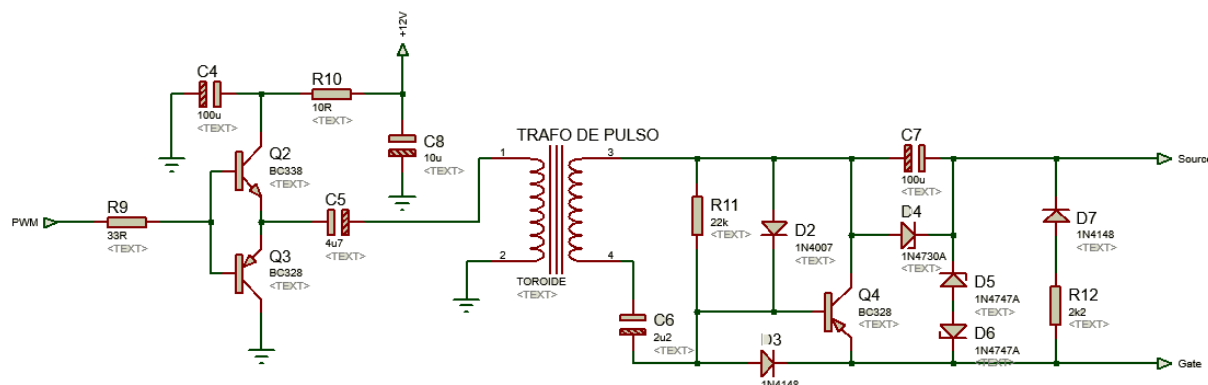


Figura 18 – Circuito *Driver*
Fonte: Adaptado de POZZATTI (2015).

O circuito driver funciona com o chaveamento dos transistores Q2 e Q3, transformando o sinal PWM em uma onda quadrada. O Trafo de pulso isola a tensão do lado primário do lado secundário (POZZATTI, 2015).

O circuito ligado a parte secundário do Trafo de pulso, protege o MOSFET, se a tensão for superior ao limite de acionamento.

3.3.9 Projeto do Transformador de Pulso

O transformador de pulso possui 20 espiras no enrolamento primário e 30 espiras no lado secundário, foi utilizado fios de um cabo de rede *ethernet*. O transformador possui valores de 2,2 mH no setor primário e 3 mH no setor secundário, aproximadamente. As dimensões do núcleo estão especificadas na Figura 19, com as medidas em mm (milímetros).

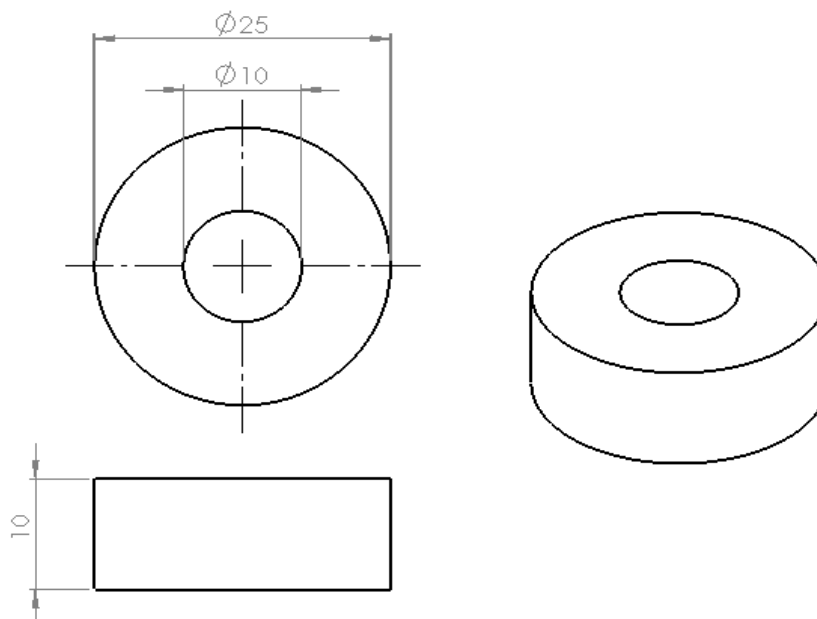


Figura 19 – Dimensões do Núcleo do Trafo de Pulso
Fonte: Autoria Própria.

3.3.10 Montagem do Conversor *Buck*

Foi adicionado um circuito *snubber*, formado por um resistor de 47 Ω em série com um capacitor de 470 pF, em paralelo com o MOSFET IRF740. A função do *snubber*, é amortecer uma alta tensão que possivelmente pode ocorrer na comutação do circuito.

O *Buck* trabalha em um chaveamento de alta frequência, por esse motivo o diodo escolhido foi o modelo HER503, que atende as especificações do projeto.

Também foram adicionados um resistor de 2,2 k Ω em série com um led, para indicar se o *Buck* está ligado ou desligado, um resistor de carga de 4,7 k Ω , para estabilizar a variação de carga na saída e um diodo entre o *Buck* e a saída com a finalidade de impedir que exista uma corrente reversa, da bateria para o conversor.

A Figura 20 mostra a montagem completa do *Buck*.

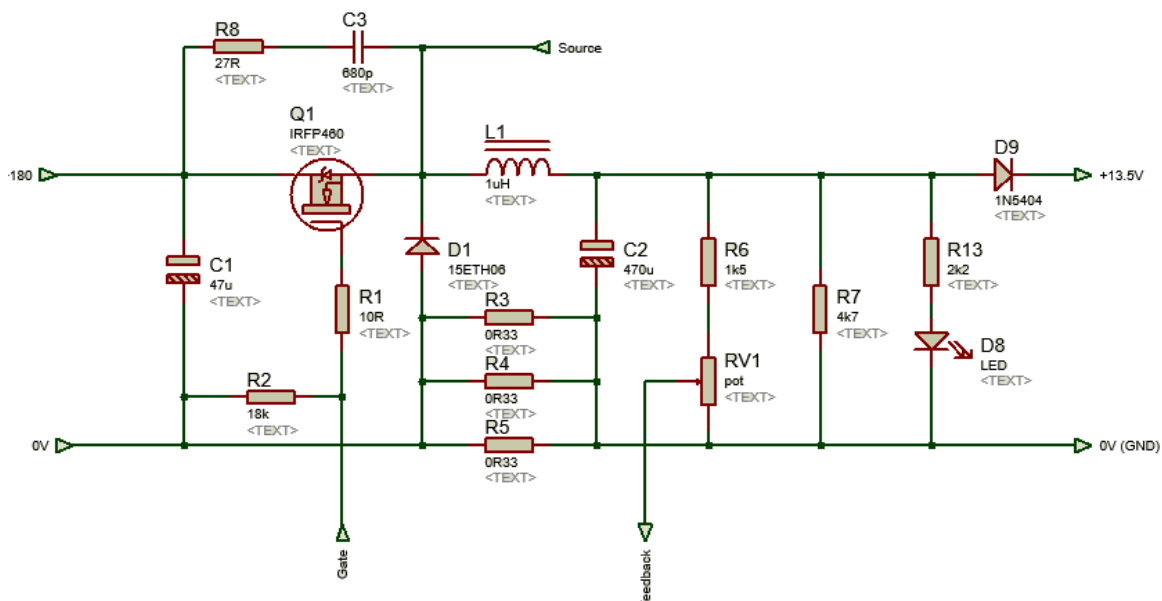


Figura 20 – Montagem Conversor Buck
 Fonte: Adaptado de POZZATTI (2015).

3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA MICROCONTROLADO

3.4.1 Implementação do Sensor de Tensão

O controle do sinal PWM é realizado a partir da medição do sensor de tensão DC ligado em paralelo com a saída do conversor *Buck*. O sensor é composto por um divisor de tensão, com resistores de 7,5 k Ω e 3 k Ω e um fator de redução de 5. A saída do sensor é ligada na porta analógica do microcontrolador e varia de 0 a 5 V, tendo uma tensão limite de 25 V para a medição (GBK, 2017).

A Figura 21 mostra o modelo do sensor utilizado no projeto.



Figura 21 – Sensor de Tensão
 Fonte: Adaptado de GBK (2017).

3.4.2 Implementação do Sensor de Corrente

Também é inserido um sensor de corrente como forma de proteção, garantido que a corrente não ultrapasse o limite desejado de 2,5 A.

O sensor é alimentado com uma tensão de 5 V e tem uma saída de 2,55 V, quando a corrente elétrica sofre alguma alteração, a tensão de saída do sensor também muda, com a queda de 1 A, a tensão de saída aumenta 66 mV (ALLEGRO, 2017). A Figura 22 mostra o modelo do sensor ACS712 utilizado no projeto.

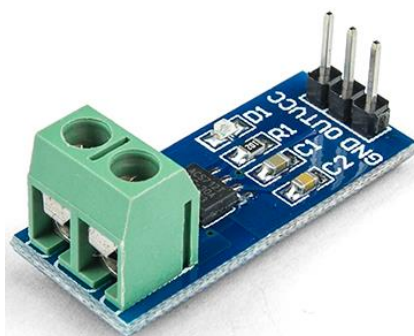


Figura 22 – Sensor de Corrente ACS712
Fonte: Adaptado de ALLEGRO (2017).

O sinal de saída do sensor de corrente varia entre 2,55 V e 2,20 V, por essa razão é necessário fazer um circuito auxiliar que amplifique essa tensão, para ser realizado a leitura do microcontrolador. Os circuitos utilizados são um subtrator e um amplificador não inversor, representados na Figura 23.

O circuito subtrator tem como saída a diferença entre as tensões $V1$ e a tensão de saída do sensor ACS712, que varia de 2,2 V até 2,55 V. A tensão $V1$ é o resultado do divisor de tensão de R5, R6 e R7, possuindo um valor de 2,6 V aproximadamente.

A operação pode ser vista na equação 22.

$$V_{sub} = \frac{R2}{R1} * (V1 - V_{sensor_corrente}) \quad (22)$$

O segundo estágio existe um Amplificador Não Inversor, que amplifica o sinal de saída V_{sub} do subtrator com um ganho de 11. Variando assim a tensão de entrada do microcontrolador de 0,55 V até 4,4 V. O sinal do sensor ACS712 amplificado pode ser visto na equação 23.

$$V_{sensor_amp} = V_{sub} * \left(1 + \frac{R9}{R8}\right) \quad (23)$$

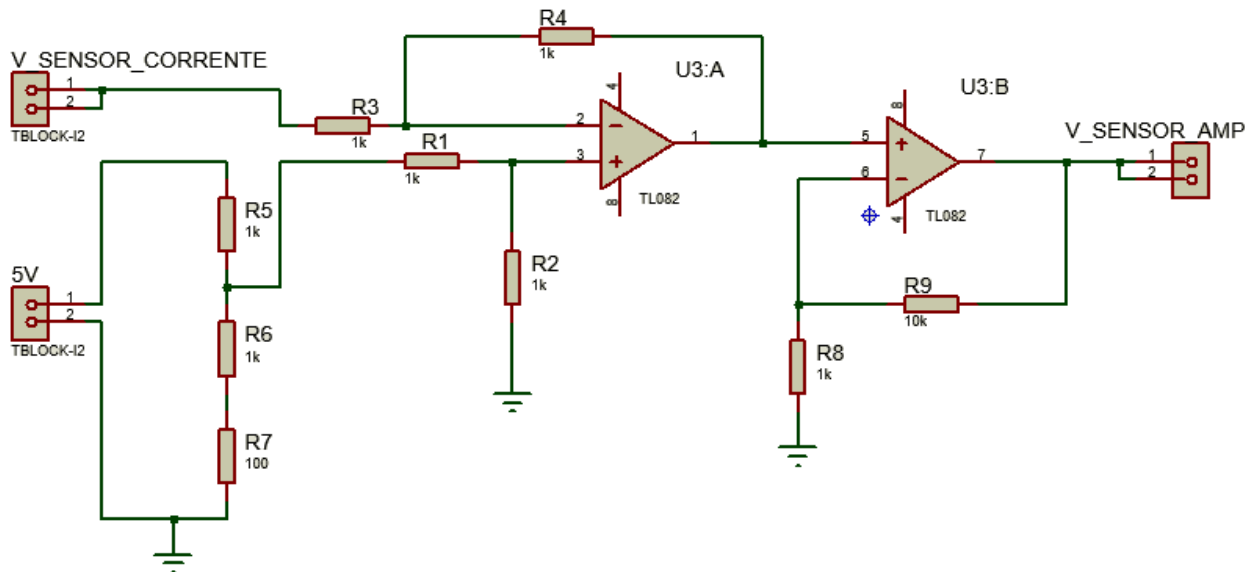


Figura 23 – Circuito Amplificador do Sensor de Corrente
Fonte: Autoria Própria.

3.4.3 Circuito do Controlador Digital

O controle PWM é realizado por um microcontrolador PIC16F877A. A Figura 24 mostra o circuito onde o microcontrolador é ligado e também especifica os sinais de entrada e saída. As entradas são os sinais de tensão dos sensores de corrente e tensão, a saída é ligada ao circuito drive, que aciona o MOSFET do conversor *Buck*.

O pino 1 é o *Master Clear* do microcontrolador, que está ligado a um botão para reiniciar o programa. O pino 2 do PIC16F877A recebe o sinal do sensor de tensão, o pino 3 é ligado o sinal amplificado do sensor de corrente. Nos pinos 13 e 14 é ligado o cristal de 12 MHz em conjunto com os capacitores para fazer a função do oscilador externo. A saída do sinal modulado para o controle está no pino 17.

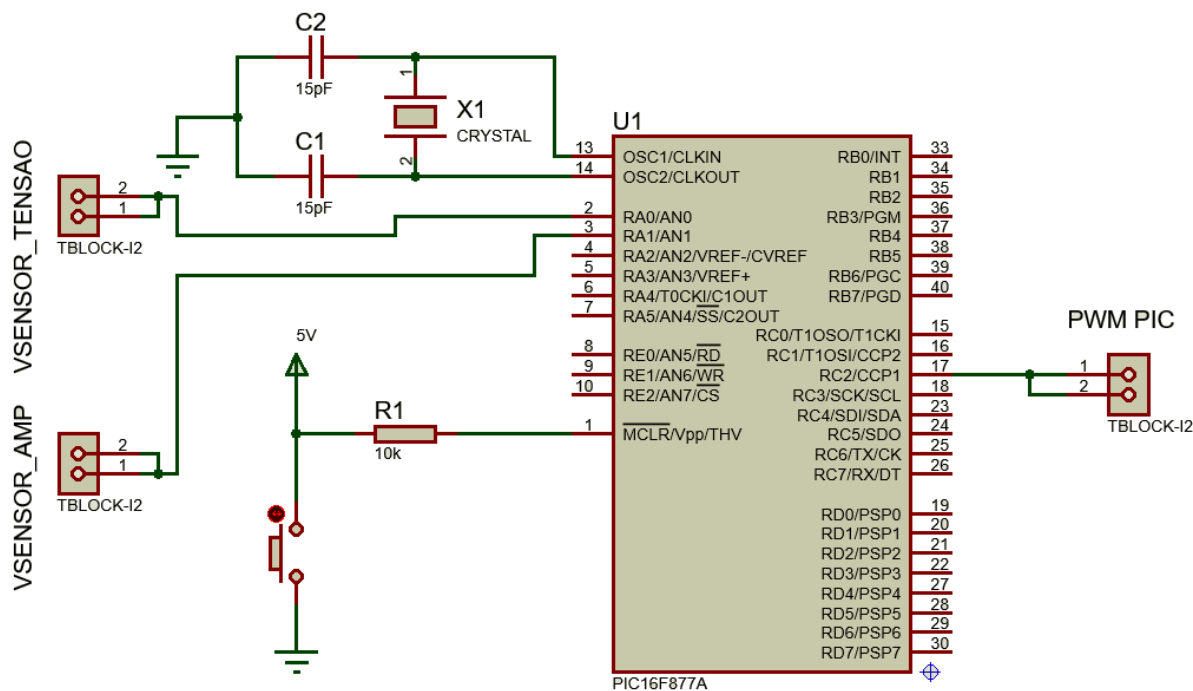


Figura 24 - Circuito de Auxílio do Microcontrolador PIC16F877A

Fonte: Autoria Própria.

O sinal PWM na saída do microcontrolador possui um valor máximo de 5 V, porém para o circuito *Driver* da Figura 18 acionar o MOSFET é necessária uma tensão de 10 V. Por esse motivo é feito um circuito comparador com amplificador operacional CA3140, onde tem uma tensão de referência de 2,5 V, resultante do divisor de tensão de R2 e R3 ligado no pino 2, quando o sinal PWM tem valores maiores que 2,5 V o sinal de saída no pino 6 é amplificado para 12 V. O circuito comparador pode ser visto na Figura 25.

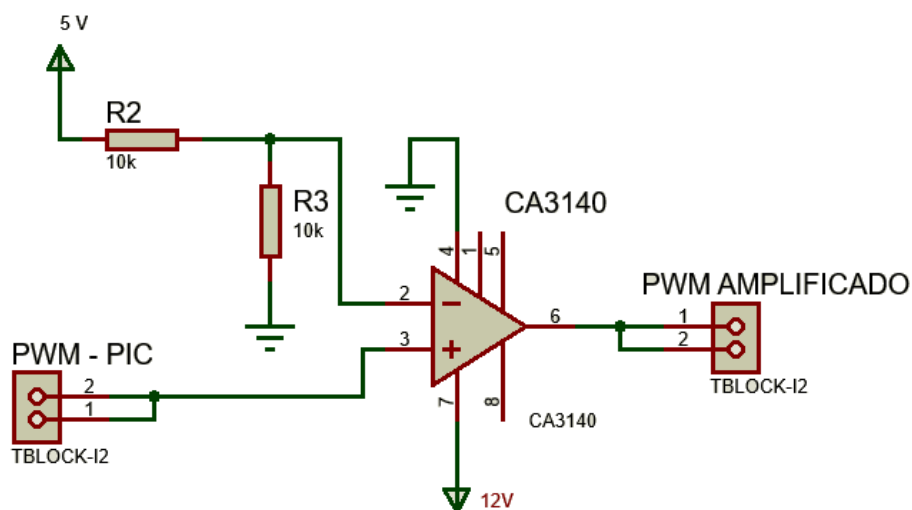


Figura 25 - Circuito Comparador para Amplificação do Sinal PWM

Fonte: Autoria Própria.

3.4.4 Programa do Controlador

O sinal de saída do sensor de tensão ligado na porta analógica do microcontrolador é usado como uma tensão de referência, possuindo um valor próximo a 1,65 V. Quando a saída do conversor *Buck* abaixa para valores menores que 13,5 V, o sinal do sensor de tensão também abaixa, o microcontrolador interpreta esse sinal e aumenta a porcentagem do *dutycycle*. O contrário também é feito, quando a saída do *Buck* tem valores maiores que 13,5 V, o sinal do sensor fica maior que 1,65 V fazendo com que o microcontrolador diminua a porcentagem do *dutycycle*. A faixa de trabalho do *dutycycle* é limitada entre 5% e 15%. Foram usados valores próximos aos valores de *dutycycle* mínimo (4%) e máximo (10%), devido ao uso do diodo que tem a função de evitar a corrente reversa da bateria para o conversor, especificado na Figura 20. Os valores usados na implementação do código foram maiores devido à queda de tensão no diodo.

Se a corrente ultrapassar 2,5 A, o sinal amplificado do sensor de corrente chega a 4,4 V, fazendo com que o *dutycycle* diminua, garantindo que a corrente não ultrapasse os valores desejados.

O fluxograma de funcionamento do programa desenvolvido pode ser visto no Anexo 1.

O programa do controlador está compilado na linguagem C, os softwares utilizados no processo são o MikroC PRO for PIC, para a criação do código, e o PicKit 2 v2.61 em conjunto com a gravadora PICKIT 2 para gravar no microcontrolador.

O código utilizado para o controle do conversor *Buck* em malha fechada pode ser visto no Anexo 2.

3.4.5 Circuito de Controle Completo

O circuito e controle é constituído pelos esquemáticos apresentados na seção 3.4, sendo a ligação entre o sensor de tensão, sensor de corrente ACS712, circuito de amplificador do sensor de corrente, circuito de auxílio do microcontrolador e circuito de amplificação do sinal PWM. A Figura 26 mostra o esquemático do circuito de controle.

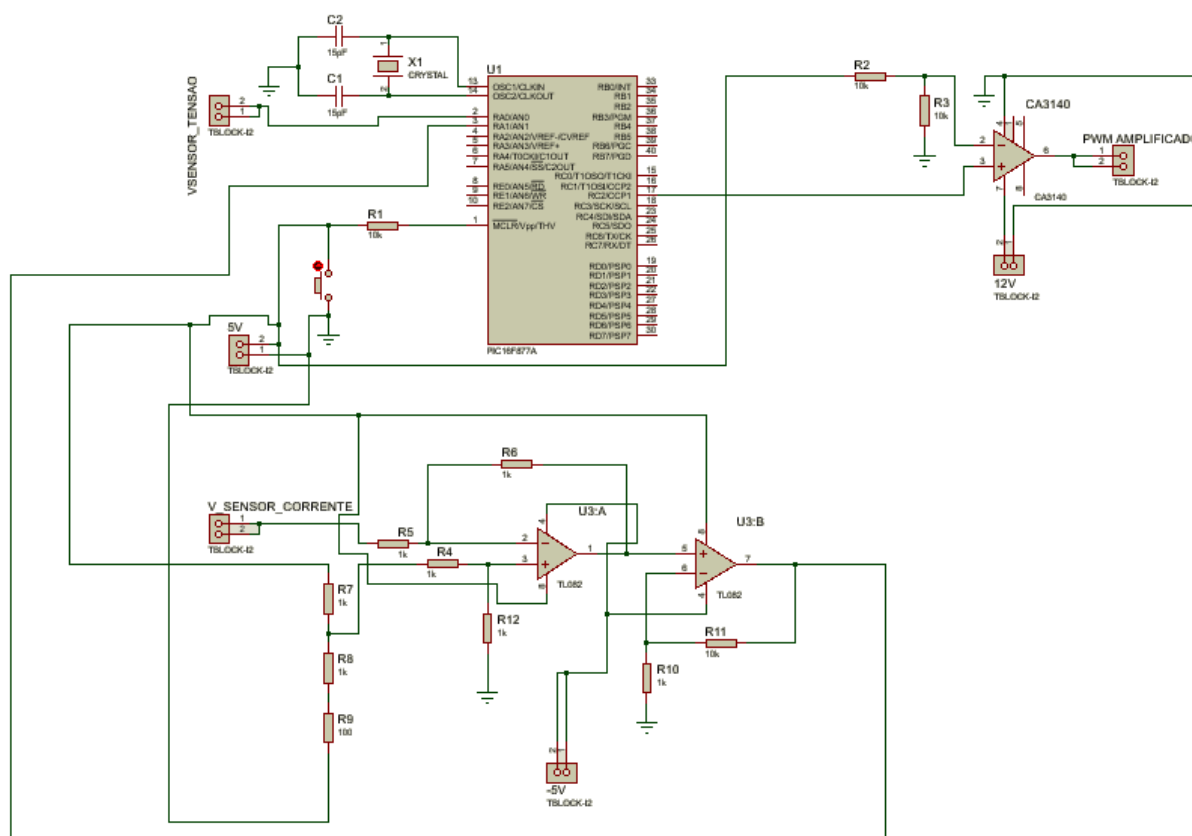


Figura 26 – Circuito de Controle
Fonte: Autoria Própria.

3.5 PROJETO DA FONTE AUXILIAR

O circuito de proteção do retificador, circuito driver e o circuito comparador para amplificação do sinal PWM são alimentados por uma fonte auxiliar de 12 V.

O circuito em que se encontra o microcontrolador PIC16F877A deve ser alimentado com 5 V, é utilizado um regulador de tensão LM7805, para que se possa obter essa tensão a partir da fonte de 12 V (MICROCHIP, 2017).

No circuito de amplificação do sinal do sensor de corrente, onde se encontra o subtrator e o amplificador não inversor, o amplificador operacional utilizado é um TL082, que necessita de uma alimentação simétrica de +5 V e -5 V, por isso é utilizado uma fonte de externa de 5 V, em conjunto com o a tensão de saída do LM7805 (TEXAS, 2017).

O sensor de corrente ACS712 deve ser ligado a uma tensão de 5 V, também obtido a partir do regulador de tensão LM7805.

O circuito utilizado para ligar as fontes auxiliares de +12 V, +5 V e -5 V, está representado na Figura 27.

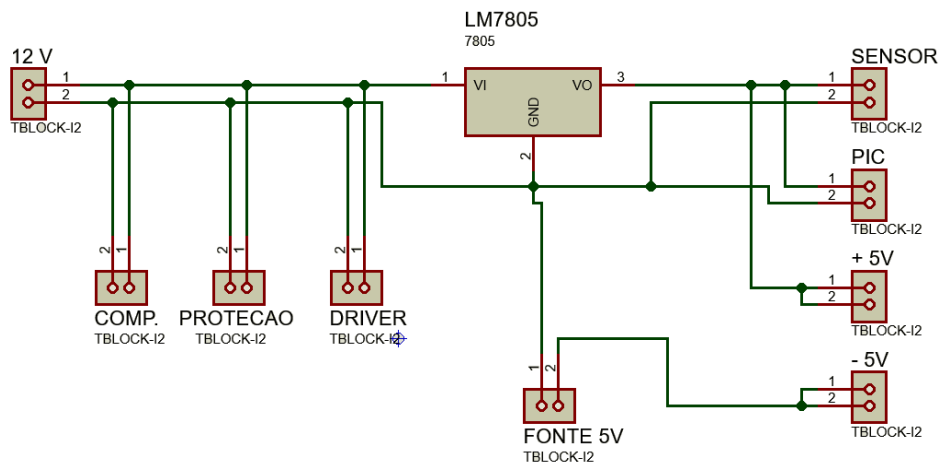


Figura 27 – Circuito das Fontes Auxiliares
Fonte: Autoria Própria.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Para efetuar a tomada dos resultados, todos os circuitos descritos no projeto foram feitos fisicamente em um protótipo com placas de fibra de vidro e trilhas de cobre. As placas dos retificador e circuito de proteção, podem ser vistas na Figura 28.



Figura 28 – Placa do Retificador + Circuito de Proteção
Fonte: Autoria Própria.

O layout da placa de circuito impresso do Retificador + Circuito de Proteção pode ser visto no Anexo 3.

As placas do conversor *Buck* e circuito *Driver*, podem ser vistas na Figura 29.



Figura 29 – Placa do Conversor *Buck* + Circuito *Driver*
Fonte: Autoria Própria.

O layout da placa de circuito impresso do conversor *Buck* + circuito *Driver* pode ser visto no Anexo 4.

A placa da fonte auxiliar pode ser vista na Figura 30.



Figura 30 – Placa da Fonte Auxiliar
Fonte: Autoria Própria.

O layout da placa de circuito impresso da fonte auxiliar pode ser visto no Anexo 5.

A imagem representando a placa do Circuito de Controle pode ser vista na Figura 31.

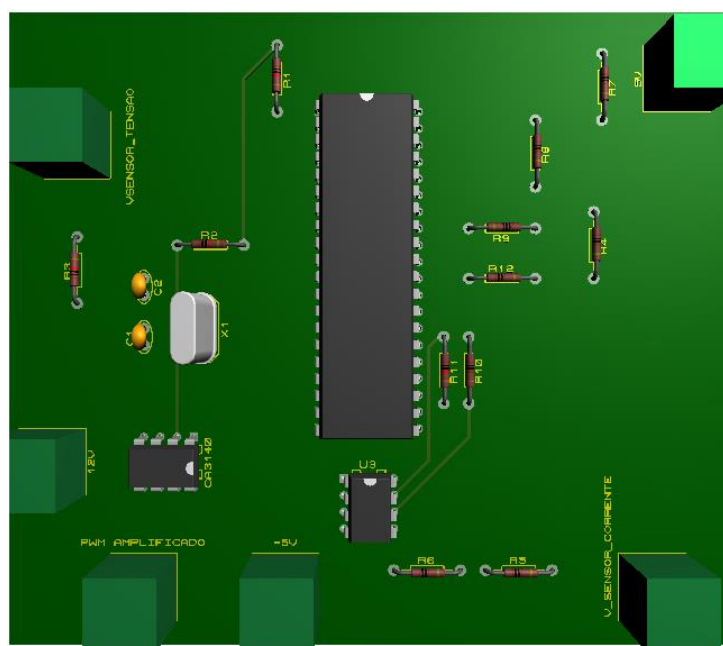


Figura 31 – Placa do Circuito de Controle
Fonte: Autoria Própria.

O layout da placa de circuito impresso do circuito de controle pode ser visto no Anexo 6.

4.2 TESTE EM MALHA ABERTA

Para confirmar que os parâmetros de *dutycycle* e frequência calculados anteriormente estivessem corretos, foi realizado um teste em malha aberta e foram retirados os sinais PWM e a tensão de saída do carregador.

O código do programa utilizado para o conversor *Buck* operar em malha aberta pode ser visto no Anexo 7.

A Figura 32 mostra o sinal PWM em malha aberta. Pode-se observar ao lado direito da figura, as tensões de pico a pico e máxima, mostrando que o sinal PWM na saída do microcontrolador, foi amplificado para valores próximos de 10 V. A frequência de trabalho é aproximadamente 23 kHz, esse valor foi utilizado para o teste, pois os valores do sinal de saída passam a se estabilizar dentro do limite desejado a partir desta frequência. O período total do sinal é igual a 43,33 μ s, o parâmetro de largura positiva de 1,59 μ s mostra o tempo de condução do mosfet (*ton*) totalizando 3,7% do tempo, valores próximos ao *dutycycle* mínimo de 4% calculados anteriormente.

A tensão de saída do conversor está representada na Figura 33, os parâmetros indicados são o valor médio, tensão de pico a pico, tensão máxima e mínima. A tensão de 13,8 V está com o valor dentro do indicador dentro das especificações da bateria, mostrados no Quadro 2. A variação de 800 mV, representa um total de 5,8% de variação do sinal.

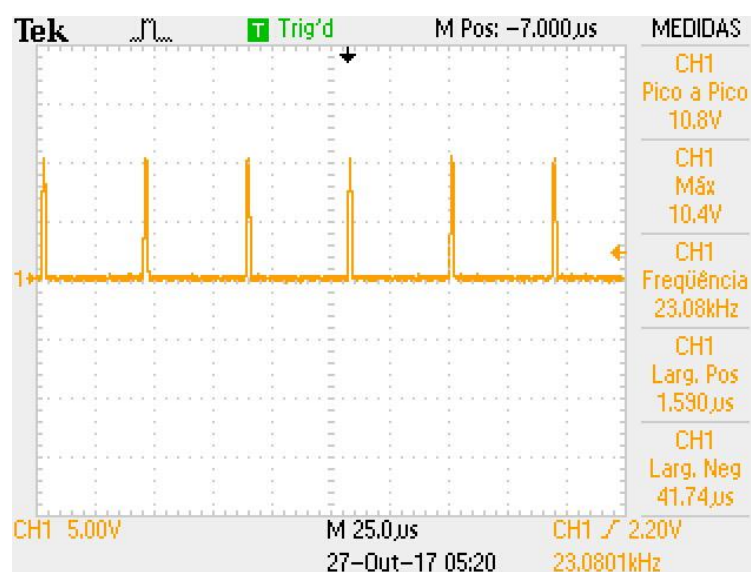


Figura 32 – Sinal do PWM em Malha Aberta
Fonte: Autoria Própria.

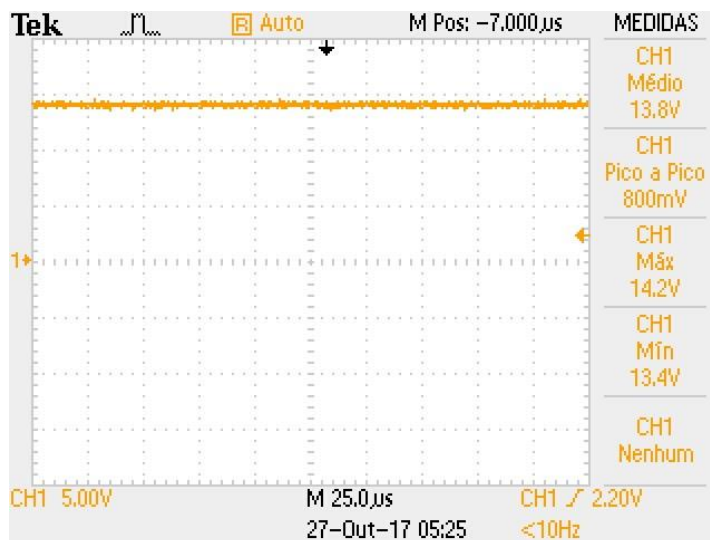


Figura 33 – Sinal da Tensão de Saída em Malha Aberta
Fonte: Autoria Própria.

4.3 TESTE EM MALHA FECHADA

Com o auxílio do reostato, variando a resistência de 6,5 a 200 Ω , foi possível verificar que a tensão se manteve fixa e a corrente sofreu variação no seu valor. O reostato utilizado no processo pode ser visto na Figura 34.

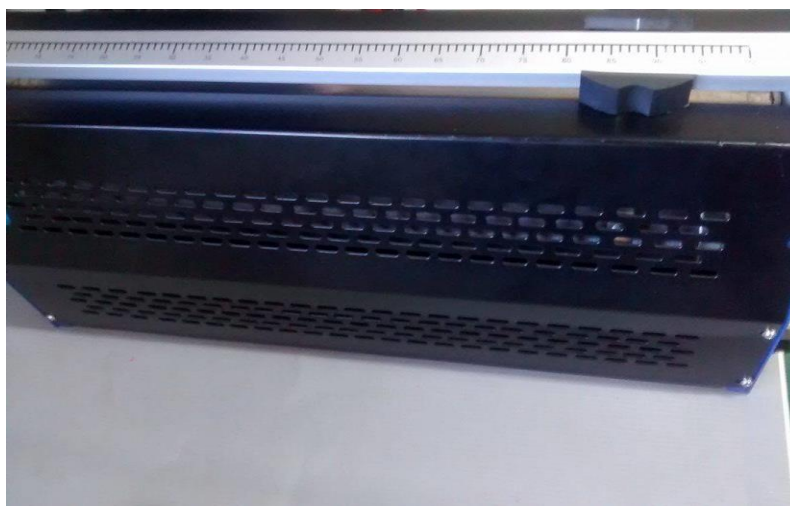


Figura 34 – Reostato Utilizado
Fonte: Autoria Própria.

Com a resistência máxima do reostato, foi obtido uma corrente de 60 mA, a tensão média na saída ficou em 13,4 V com um 1 V de pico a pico, a frequência do PWM ficou fixa em 40 kHz com um período de 25 μ s, a largura positiva marcou 1,169 μ s totalizando 4,68% de *dutycycle*, operando no mínimo da capacidade necessária. O sinal de tensão de saída na cor amarela e PWM na cor azul, podem ser

vistos na Figura 35, junto com a medição da corrente que se encontra ao lado esquerdo da imagem.

Com a resistência mínima do reostato, foi obtido a corrente de 2 A, houve uma queda de tensão na saída, se estabelecendo em 13,1 V e um aumento na oscilação, ficando com 1,6 V na tensão de pico a pico, a frequência e o período continuaram estabilizados em 40 kHz e 25 μ s, mudando a porcentagem de trabalho do *duty cycle*, a largura positiva aumentou para 1,594 μ s, totalizando 6,4% operando no máximo da capacidade necessária. Os sinais de tensão na cor amarela e PWM na cor azul podem ser vistos na Figura 36, junto com a medição da corrente que se encontra do lado esquerdo da imagem.

Pode-se confirmar que a razão cíclica mínima e máxima calculadas nas Equações 8 e 9 foram obtidas, permanecendo entre 4 e 10% durante o teste em malha fechada.

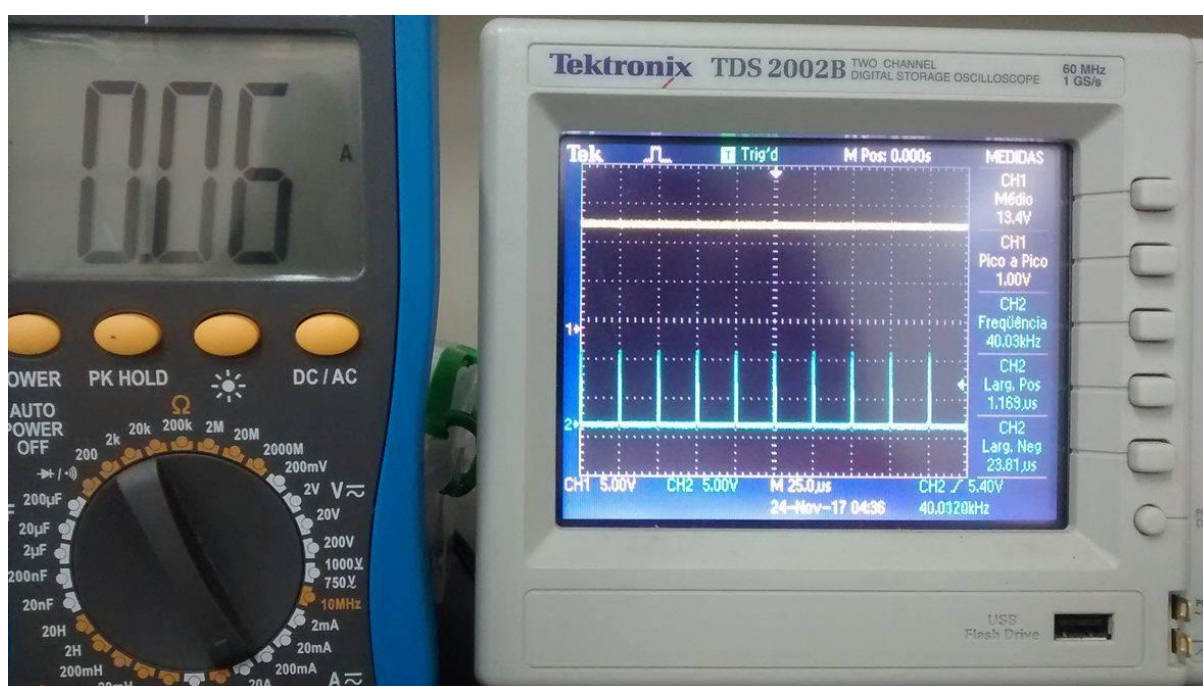


Figura 35 – Sinais de Tensão, PWM e Corrente, com razão cíclica mínima
Fonte: Autoria Própria.

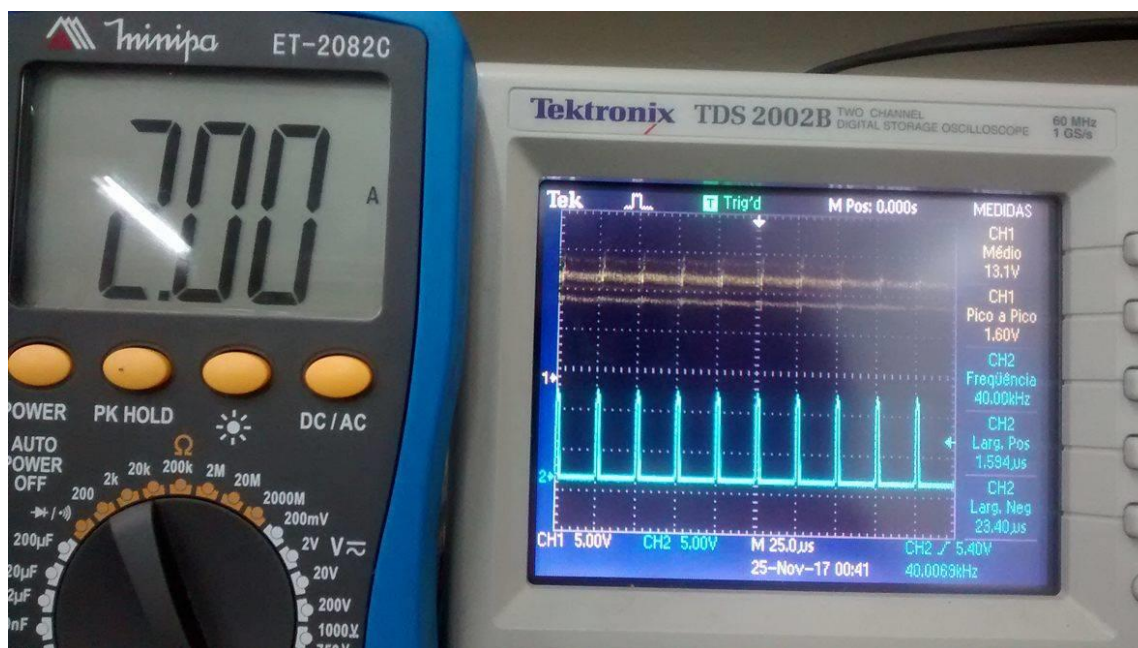


Figura 36 – Sinais de Tensão, PWM e Corrente, com razão cíclica máxima
Fonte: Autoria Própria.

4.4 CURVA DE CARGA DA BATERIA

Com o sinal de saída do conversor devidamente ajustado em 13,5 V, é realizado o carregamento da bateria especificada no Quadro 2. No início do carregamento, a bateria possui 10,93 V, com um total de 140 minutos é alcançado o nível da tensão de flutuação de 13,5 V.

Durante o estágio de carga, a corrente apresenta uma variação de 600 mA a 860 mA. Quando a tensão chega em 13,20 V, ocorre uma queda na corrente, permanecendo em 350 mA até que a tensão de flutuação seja atingida. Quando o estágio de carga termina, começa a manutenção da carga, onde a tensão e corrente de flutuação são mantidas, a tensão permanece entre 13,5 V e 13,8 V e a corrente permanece em 100 mA. O gráfico da curva de carga da tensão e corrente durante o tempo de carregamento pode ser visto na Figura 37.

Na Figuras 38 são apresentadas as medidas de tensão no processo de início (10,93 V) e final de carga (13,53 V).

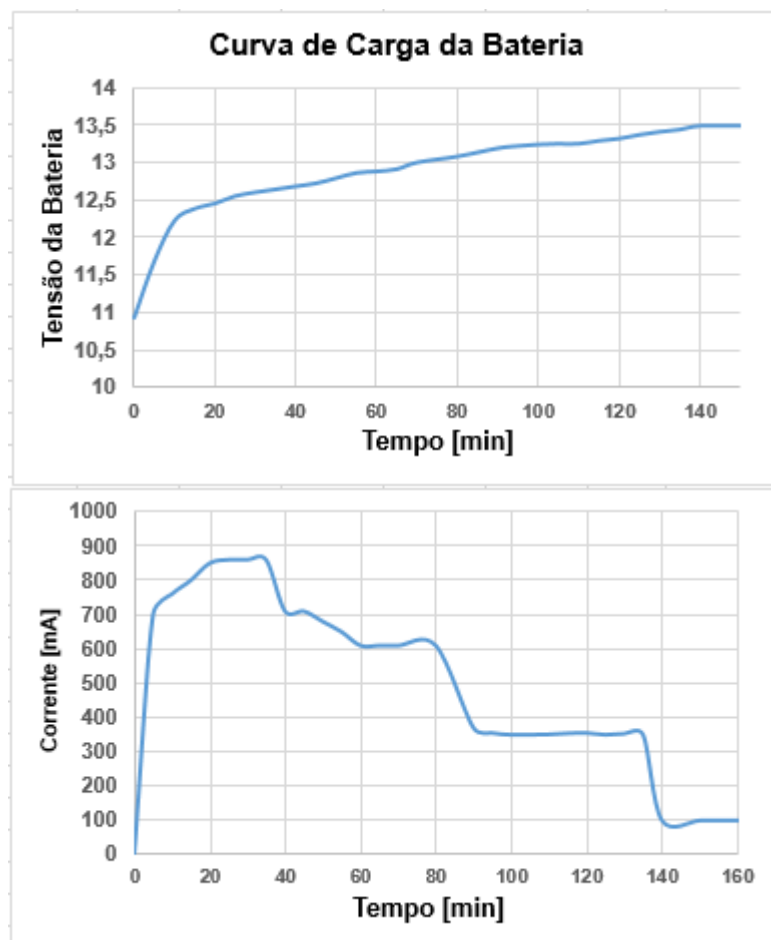


Figura 37 – Curva de Carga da Bateria
Fonte: Autoria Própria.



Figura 38 – Tensão na Bateria no Início e no Fim do Processo de Carga
Fonte: Autoria Própria.

4.5 CURVA DE DESCARGA DA BATERIA

Para certificar que o processo de carga da bateria foi realizado corretamente, a bateria foi descarregada e o resultado foi comparado com o gráfico de tensão na bateria no processo de descarga, representado na Figura 3. Com a bateria em 13,22 V o processo foi iniciado, quando a bateria atingiu o 10,5 V o processo foi

interrompido, para não causar uma descarga profunda e danificar a bateria. Com uma resistência de $20\ \Omega$, obteve-se um tempo de descarga de 120 minutos. O gráfico da curva de descarga pode ser visto na Figura 39.

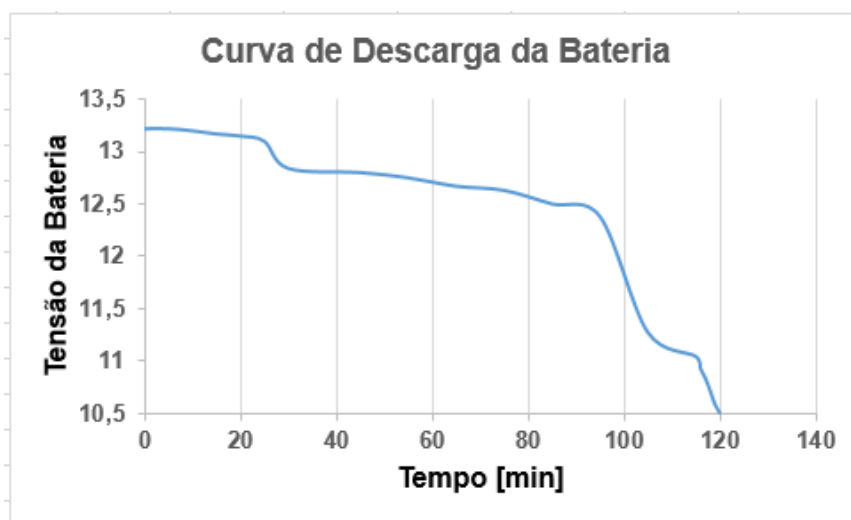


Figura 39 – Curva de Descarga da Bateria
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 40 mostra o nível de tensão e corrente da bateria e corrente da bateria, no início (a) e fim (b) do processo de descarga.

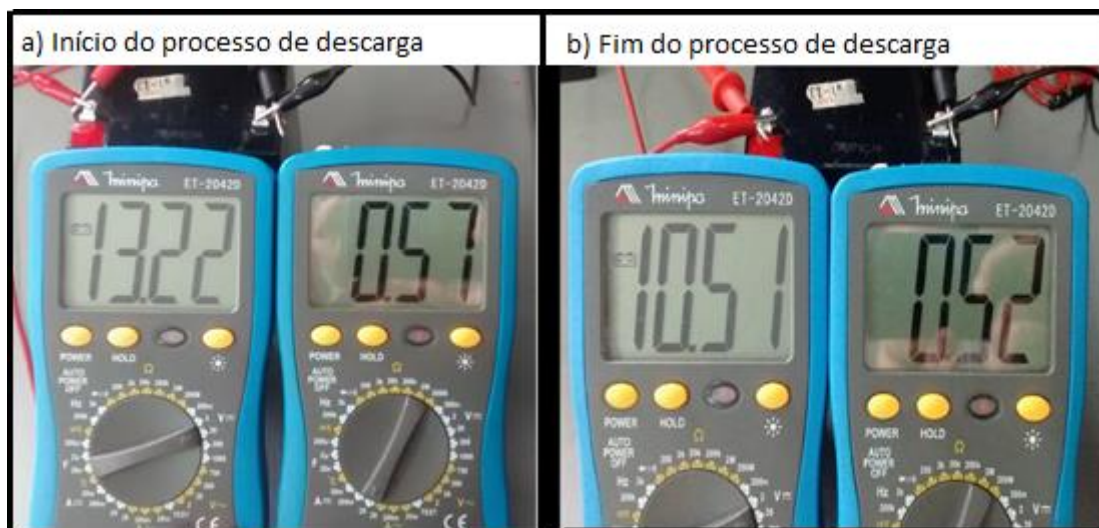


Figura 40 – Medição da Tensão e Corrente da Bateria, no Início e Fim do Processo de Descarga.
Fonte: Autoria Própria.

5 CONCLUSÃO

Apesar das baterias de chumbo-ácido possuírem desvantagens de desempenho comparada aos outros modelos, existem certas vantagens, principalmente em relação ao custo para determinadas aplicações, fazendo com que o carregamento de forma eficiente se torne necessário para não comprometer a sua vida útil.

O controle digital em conjunto com os circuitos de eletrônica de potência, como o retificador e conversor CC – CC abaixador (*Buck*), trabalham de forma que os valores de tensão e corrente para o processo de carga são atingidos e mantidos durante o carregamento.

Em relação ao microcontrolador utilizado para o sistema de controle, pode-se perceber que o PIC16F877A, é um microcontrolador de baixo custo com flexibilidade para se adaptar e atender a necessidades do projeto, mesmo que seja necessário o auxílio de circuitos externos.

Com os resultados da curva de carga e descarga da bateria, é possível perceber que a finalidade do projeto foi atendida, a bateria foi carregada completamente. Os resultados esperados de cada parte do projeto foram obtidos. O sinal de tensão da rede elétrica foi retificado corretamente, o conversor *Buck* operando em malha fechada, com o auxílio dos sensores de tensão e corrente em conjunto com o microcontrolador, reduziu a tensão de entrada para valores próximos a 13,5 V que é tensão de flutuação do modelo da bateria utilizada.

Foi constatado também uma variação de tensão e corrente na saída, devido ao método utilizado para fazer o controle em malha fechada, porém o carregamento da bateria não foi comprometido.

REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**; tradução Bazán Tecnologia e Linguística, revisão técnica João Antônio Martino. 2000.

ALLEGRO MICROSYSTEMS. **ACS712 Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor**. Disponível em: < <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/168326/ALLEGRO/ACS712.html> >. Acesso em: 16 out. 2017.

BALESTERO, Juan Paulo Robles. **Conversor Buck Utilizando Célula de Comutação de Três Estados**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista. 2006.

BASTOS, Renan Fernandes. **Sistema de gerenciamento para carga e descarga de baterias (chumbo-ácido) e para busca do ponto de máxima potência gerada em painéis fotovoltaicos empregados em sistemas de geração distribuída**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2013.

COELHO, Kefas Damazio. **Estudo de uma fonte ininterrupta de corrente contínua de baixa potência gerenciada por um microcontrolador**. 2001.

CONTROLS, Johnson. **Manual técnico bateria estacionária Freedom®**. Julho de 2008.

COPETTI, Jacqueline Biancon; MACAGNAN, Mario Henrique. **Baterias em sistemas solares fotovoltaicos**. In: I CBENS-I Congresso Brasileiro de Energia Solar. 2007.

CORRADI JUNIOR, R. **Circuitos Retificadores**. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjC2IXU7OnPAhVMGZAKHUSHAnkQFggeMAA&url=http://www.netsoft.inf.br/aulas/EAC_Curso_Eletronica_Aplicada/2__Circuitos_Retificadores.pdf&usg=AFQjCNFYUHY0tMYLbFOW8GfGnVBdWhdmGw>. Acesso em: 20 out. 2016.

GET POWER. **Manual Técnico Bateria Estacionária Regulada Por Válvula MONOBLOCOS 6V E12v SÉRIE GP**. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjju84WWnt_XAhXKf5AKHYshB6UQFgg1MAA&url=http%3A%2F%2Fxa.yimg.com%2Fkq%2Fgroups%2F2463855%2F203267038%2Fname%2FMANUAL%2BT%25C3%2589CNICO%2BGETPOWER%2Brev0.pdf&usg=AOvVaw3xqPcHeZBrdalXUsfjdAk>. Acesso em: 27 nov. 2017

GBK ROBOTICS. **Sensor de Tensão DC.** Disponível em: <https://www.gbkrobotics.com.br/boards>. Acesso em: 21 nov. 2017

HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos.** 1ª Edição. AMGH Editora Ltda, 2011.

LAFUENTE, César Orellana. **Carregador de baterias monofásico para aplicação em veículos elétricos.** 2011.

LAZZARIN, Telles Brunelli. **Estudo e implementação de um carregador de baterias com uma técnica de avaliação de sua vida útil.** 2006.

LEÃO, Aline Rocha. **Desenvolvimento de kit's didáticos para aulas práticas de eletrônica de potência: conversores buck, boost e buck/boost.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MAMMANO, Bob. **Portable Power-A Designer's Guide to Battery Management.** Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas, 2001.

MICROCHIP Technology Inc. **PIC16F87XA, 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers.** Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39582b.pdf> >. Acesso em: 16.out. 2017.

NEWTONCBRAGA. **O que é PWM (MEC 071).** Disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/110-mecatronica/robotica/5169-mec071a>>. Acesso em: 20 out. 2016.

OGAWA, Vanessa Gomes Cruz. **Proposta de identificação dos parâmetros do modelo de bateria para uso na modelagem de sistemas de partida de veículos automotivos.** 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

POMÍLIO, José A. **Topologias Básicas de Conversores CC-CC não isolados.Apostila Didática. Publicação FEE 13/95.** Revisão: 2014. Disponível em:<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/CAP1.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2017.

POZZATTI, Evandro. **Projeto e análise de uma fonte chaveada em alta frequência para laboratório de ensino com saídas: ± 12 V, ± 5 V, ± 3 , 3 V e variável até 25 V.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SCHIAVON JUNIOR, Gilson. **No-Break 1,2KVA, senoidal, operando em malha fechada: circuito de potência, circuito de controle analógico e circuito de controle digital com DSC.** 2007. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina.

STA-ELETRONICA. **Vantagens e limitações das baterias chumbo-ácido.** Disponível em: <<http://www.sta-eletronica.com.br/artigos/vantagens-e-limitacoes-das-baterias-chumbo-acido>>. Acesso em: 29 set. 2016.

TREVISI, Carlos H. G. **Eletrônica de Potência. Apostila Didática de Mestrado.Londrina.** Universidade Estadual de Londrina. 2006.

TEXAS INSTRUMENT. **L082 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier.** Disponível em : <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl082-n.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2017.

ANEXO 1

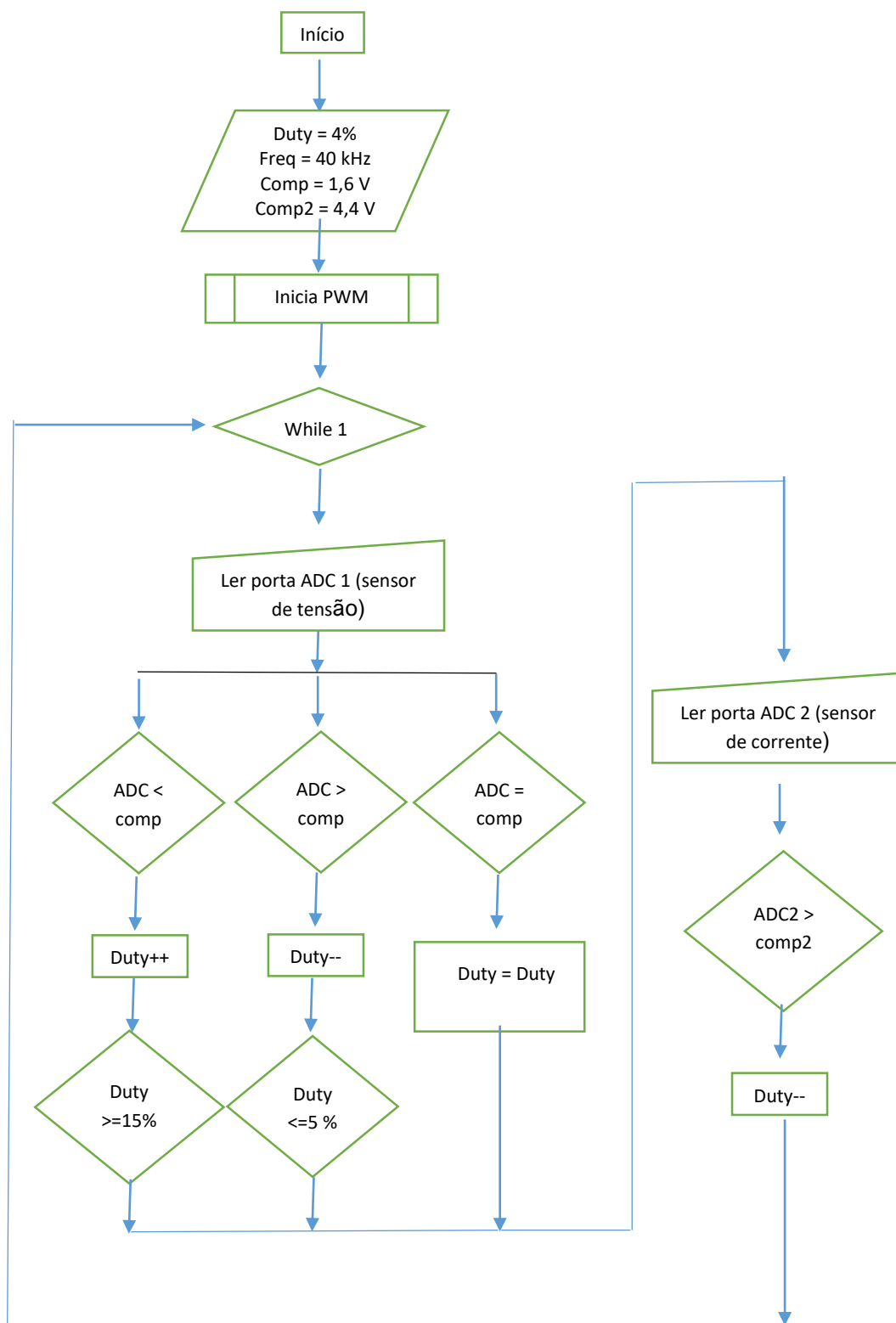


Figura 41 - Fluxograma Do Software De Controle
Fonte: Autoria Própria.

ANEXO 2

ANEXO 2 – Código do Controlador Operando em Malha Fechada

Fonte: Autoria Própria.

```
//Clock 12MHz
//Ciclo de máquina => t=1/(12.000.000/4) => t = 333,33ns

// 1023 = 5V
// x = 1.6V => regra de 3, x = 337;

//1023 = 5V
// x2 = 4V => regra de 3, x2 = 820V;

unsigned short percent_duty=4;
unsigned int ADC = 0;
unsigned int ADC2 = 0;

void main() {

    int comp = 337; // valor de referencia para comparação 337 = 1.6V;
    int comp2 = 820; //valor de referencia para comparação 820 = 4V ;

    CMCON = 0x07; // Desabilita comparadores
    ADCON0 = 0x01; // Liga o modulo conversor AD e habilita o canal AN0
    ADCON1 = 0x04; // Configura AN0 e AN1 como analógico
    PWM1_Init(40000); // Inicia PWM1 com 40kHz
    PWM1_Start();
    PWM1_Set_Duty(percent_duty*255/100);

    while(1){
        ADC = ADC_Read(0);
```

```
PWM1_Set_Duty(percent_duty*255/100);

if( ADC < comp){
    percent_duty++;
    delay_ms(5);

    if(percent_duty > 15 || percent_duty == 15){
        percent_duty = 15;
    }
}

if ( ADC > comp){
    percent_duty--;
    delay_ms(5);

    if(percent_duty < 5 || percent_duty == 5 ){
        percent_duty = 5;
    }
}

if( ADC == comp){
    percent_duty = percent_duty;
}

if (ADC2 > comp2){
    percent_duty--;
}

}

}
```

ANEXO 3

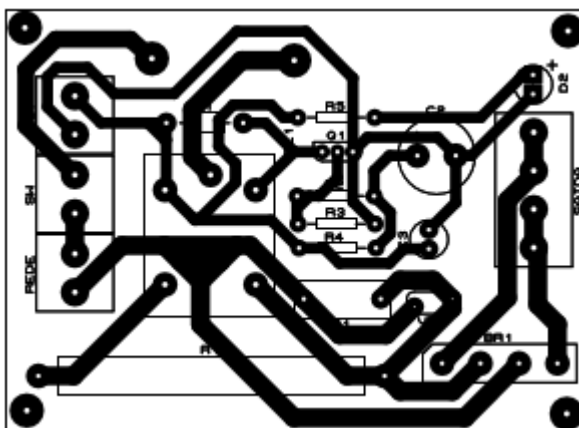


Figura 42 – Layout da Placa de Circuito Impresso Retificador + Circuito de Proteção
Fonte: Adaptado de POZZATTI (2015).

ANEXO 4

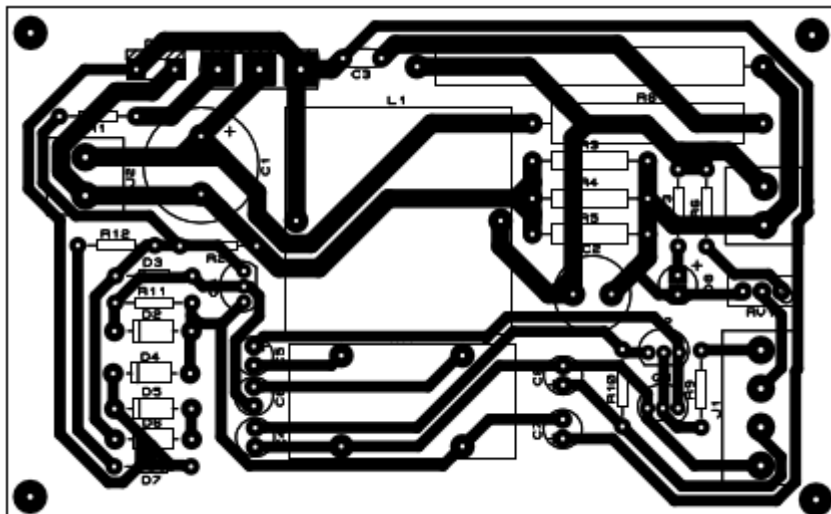


Figura 43 – Layout da Placa de Circuito Impresso Conversor *Buck* + Circuito Driver
Fonte: Adaptado de POZZATI (2015).

ANEXO 5

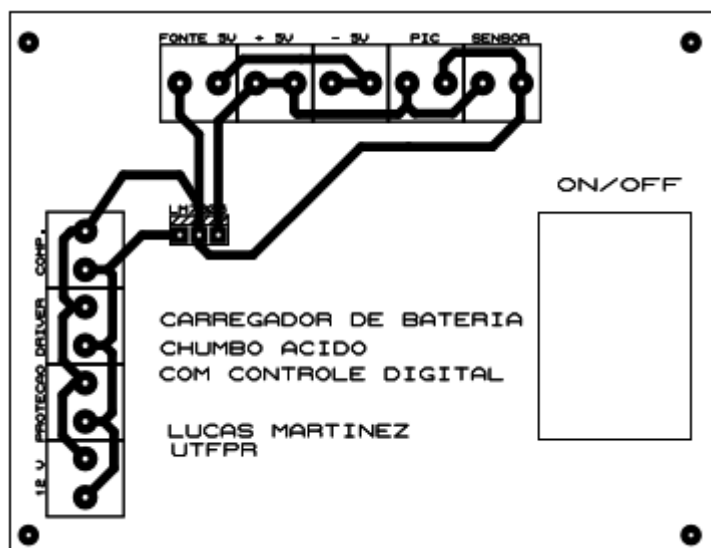


Figura 44 – Layout da Placa de Circuito Impresso da Fonte Auxiliar
Fonte: Autoria Própria.

ANEXO 6

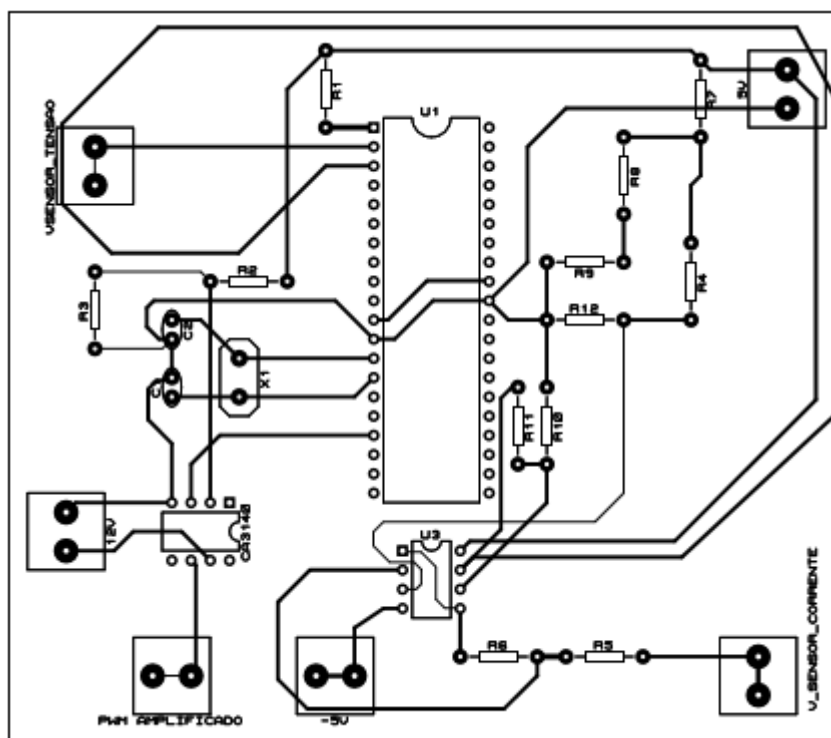


Figura 45 – Layout da Placa de Circuito Impresso do Circuito Controlador
Fonte: Autoria Própria.

ANEXO 7

ANEXO 7 – Código do Controlador Operando em Malha Aberta

Fonte: Autoria Própria.

```
#define butt1 RB1_bit
```

```
#define butt2 RB2_bit
```

```
unsigned short duty1, duty2;
```

```
void main() {
```

```
    CMCON = 0x07; //Desabilita os comparadores
```

```
    TRISB = 0xFF; //PORTB entrada
```

```
    TRISC = 0x00; //PORTC saída
```

```
    PORTB = 0xFF; //Inicia em Nivel alto
```

```
    PORTC = 0x00; //Inicia em Nivel baixo
```

```
    PWM1_Init(23000); //Frequencia em 23kHz
```

```
    PWM2_Init(23000);
```

```
    duty1 = 1;
```

```
    PWM1_Start();
```

```
    PWM1_Set_duty(duty1);
```

```
    while(1){
```

```
        if(butt1 == 0){
```

```
            delay_ms(40);
```

```
            duty1++;
```

```
            PWM1_Set_duty(duty1);
```

```
}

if(butt2 == 0){
    delay_ms(40);
    duty1--;
    PWM1_Set_duty(duty1);
}

if (duty1 == 0){
    delay_ms(40);
    duty1 = 1;
    PWM1_Set_duty(duty1);
}
}

}
```