

THALES EUGENIO PORTES DE ALMEIDA

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE
UM CARREGADOR PARA UM
BANCO DE BATERIAS TIPO
CHUMBO-ÁCIDO INTELIGENTE COM
BAIXAS PERDAS DE ENERGIA**

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CARREGADOR PARA UM BANCO DE BATERIAS TIPO CHUMBO-ÁCIDO INTELIGENTE COM BAIXAS PERDAS DE ENERGIA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de
São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com
ênfase em sistemas de energia e
automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Roberto Boffino de Almeida Monteiro

São Carlos

2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A447p	Almeida, Thales Eugenio Portes de Projeto e implementação de um carregador para um banco de baterias tipo chumbo-ácido inteligente com baixas perdas de energia / Thales Eugenio Portes de Almeida ; orientador José Roberto Boffino de almeida Monteiro. -- São Carlos, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011. 1. Carregador. 2. Bateria. 3. Eletrônica. 4. Chumbo - ácido. 5. Microcontrolador. I. Título.
-------	--

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Thales Eugenio Portes de Almeida

Título: "Projeto e Implementação de um Carregador de Baterias
Tipo Chumbo-Ácido Inteligente de Média Tensão com Baixas
Perdas de Energia"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 29/11/2011,

com NOTA 7,5 (Sete e cinco), pela comissão julgadora:



Prof. Dr. Azauri Albano de Oliveira Júnior - EESC/USP



MSc. Marcelo Suetake - EESC/USP



Prof. Associado Homero Schiabel
Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica
EESC/USP

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais,

Alecio Eugenio Portes de Almeida e Rosa Maria Ricomini Portes de Almeida

Agradecimentos

Agradeço ao professor Dr. José Roberto Boffino de Almeida Monteiro pela orientação neste trabalho, pelas discussões elucidativas e toda a ajuda no projeto do sistema, sempre colaborando para o desenvolvimento do projeto e dos conhecimentos sobre a área.

À minha mãe, Rosa, e aos meus irmãos Thomas e Thulio pela companhia e por todo o apoio durante minha graduação.

Aos meus colegas Tiago, Geyverson e Oureste que me acompanharam durante todo o curso de graduação e que foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto.

Sumário

Dedicatória	VII
Agradecimentos	IX
Lista de figuras	XIII
Resumo.....	XV
Abstract	XVII
1 – Introdução	1
2 – Baterias.....	3
2.1 - O que são Baterias	3
2.2 - A Bateria de Chumbo-Ácido	3
2.3 - Características de desempenho de Baterias SLI.....	4
2.4 - Métodos de Carga	6
3 – Conversores.....	9
3.1 - Retificadores monofásicos utilizando diodos	9
3.1.1 - Retificador monofásico de meia onda	9
3.1.2 - Retificador monofásico de onda completa	10
3.2 - Choppers	12
3.2.1 - O <i>Chopper</i> Abaixador	13
3.2.2 - O Chopper Elevador	15
3.2.3 - A Modulação PWM	16
4 – Desenvolvimento do projeto.....	19
4.1 - Sistema de potência	21
4.2 - Sistema de Controle	26
4.3 - Projeto do Circuito	29
5 – Resultados	33
5.1 – Testes de Acionamento	33
5.2 – Testes do Sistema de Proteção	35
5.3 – Sensor de tensão	37
5.4 – Testes com alimentação pela rede elétrica.....	38
5.5 – Testes de carga	40
5.6 - Eficiência	41
6 – Conclusão	45
Bibliografia	47
Apêndice A – Projeto do Protótipo	49

Apêndice B – Placa de interface	51
---------------------------------------	----

Lista de figuras

Figura 1 - Esquema Básico do Sistema.....	2
Figura 2 – Curvas de tensão e corrente na descarga da célula (adaptado de[1])	5
Figura 3 – Tensão da célula na descarga da bateria para diversas temperaturas (adaptado de[1])	6
Figura 4 – Retificador monofásico de meia onda.....	9
Figura 5 – Formas de onda de tensão de entrada e saída de retificador monofásico de meia-onda.....	10
Figura 6 – Retificador monofásico de onda completa aplicando transformador com terminação central.....	11
Figura 7 – Retificador monofásico de onda completa aplicando quatro diodos.....	11
Figura 8 – Formas de onda de tensão de entrada e saída de um retificador monofásico de onda completa.....	12
Figura 9 – Circuito de um <i>chopper</i> abaixador.....	13
Figura 10 – Formas de onda de entrada e saída de um chopper abaixador com carga resistiva	13
Figura 11 – Formas de onda de corrente em chopper com carga RL	15
Figura 12 – Circuito de um chopper elevador.....	15
Figura 13 – Formas de onda de entrada e saída de tensão de um conversor com modulação por largura d pulso.....	17
Figura 14 – Diagrama inicial do sistema do carregador.....	20
Figura 15 - Esboços iniciais para o arranjo do retificador com o <i>chopper</i>	21
Figura 16 – Circuito para simulação do retificador com o conversor <i>buck</i> em seguida	21
Figura 17 – Simulação do retificador com o conversor <i>buck</i> em seguida, mostrando os sinais de entrada e saída de tensão.....	22
Figura 18 – Circuito para simulação do sistema aplicado sobre o banco de baterias ..	23
Figura 19 – Simulação do sistema aplicado sobre o banco de baterias, mostrando os sinais de entrada e saída de tensão.	23
Figura 20 – Circuito para simulação do sistema com filtro	24
Figura 21 – Simulação do sistema com filtro, mostrando os sinais de entrada e saída de tensão.	24
Figura 22 – Formas de onda de entrada e saída de corrente no sistema	25
Figura 23 – Formas de onda de entrada e saída de corrente no sistema com indutor de 15mH	25
Figura 24 – Fluxograma básico da sequência de controle do processo de carga.....	26

Figura 25 – Comportamento da tensão e da corrente durante os estágios de carga...	28
Figura 26 – Esquema de ligação do CI IR2121 [10]	29
Figura 27 - Esquema de ligação do sistema de proteção.....	30
Figura 28 - Amplificador para leitura da tensão da bateria.....	30
Figura 29 - Foto da placa de interface utilizada, com diagrama de pinos do conector.	31
Figura 30 - Sinais do sistema de acionamento da chave	34
Figura 31 - Atraso no acionamento da porta em relação à excitação.....	35
Figura 32 - Análise do comportamento do sistema de proteção contra sobrecorrente; (a) saída do sensor, (b) tensão sobre a carga.....	36
Figura 33 - Corte na condução pelo sistema de proteção contra sobrecorrente	37
Figura 34 - Sinal de saída do sensor de tensão sobre a carga	38
Figura 35 - Conversor atuando sobre corrente alternada, com frequência de chaveamento reduzida.	39
Figura 36 - Conversor atuando sobre corrente alternada, com frequência de chaveamento de 20kHz.....	39
Figura 37 - Protótipo montado em laboratório carregando uma bateria.....	40
Figura 38 - Sinais na interface com o microcontrolador.....	41
Figura 39 – Circuito para Simulação do Sistema Final	42
Figura 40 – Curva de Eficiência com 6 Baterias	43
Figura 41 – Curva de Eficiência com Uma Bateria	44

Resumo

Este trabalho descreve o projeto de um carregador de baterias tipo chumbo-ácido controlado por um microcontrolador, utilizando os princípios e técnicas da eletrônica de potência. O sistema será capaz de carregar um banco de baterias composto por até seis baterias dispostas em série, controlando o processo de carga para garantir a integridade do sistema e otimizar a vida útil das mesmas, utilizando métodos inteligentes para o processo de carga. O banco de baterias pertence a um projeto em andamento que trata do desenvolvimento de um veículo náutico autônomo.

Palavras-chave: Carregador, Bateria, Eletrônica, Chumbo-ácido, Microcontrolador.

Abstract

This paper describes the project of a lead-acid battery charger controlled by means of a microcontroller, using the principles and techniques of power electronics. The system must be capable of charging a battery bank composed by up to six batteries arranged in series, managing the charge process in order to ensure the integrity of the battery bank and optimize the batteries' life-cycle, through intelligent charging methods. The battery bank belongs to another ongoing project of an autonomous nautical vehicle.

Keywords: Charger, Battery, Electronics, Lead-acid, Microcontroller

1 – Introdução

O uso de veículos elétricos é bastante comum em diversas áreas, seja na indústria em empilhadeiras ou veículos de tração, para o lazer como carros de golfe, em veículos de transporte público e mais recentemente o crescimento do setor de veículos de passeio.

A fonte de energia dos veículos elétricos é geralmente um conjunto de baterias recarregáveis, com isto o bom estado das baterias é um fator decisivo para a confiabilidade do veículo. A vida útil das baterias é limitada e depende de diversos cuidados em sua utilização, sendo que o processo de recarga das baterias é bastante crítico nesse sentido.

Na escola de engenharia de São Carlos há um projeto que trata do desenvolvimento de um veículo náutico elétrico autônomo, que atualmente é alimentado por um conjunto de seis baterias do tipo chumbo-ácido dispostas em série. Para este veículo o processo de carga é feito para cada bateria individualmente, o que toma muito tempo e não garante carga uniforme em todas as baterias, além de necessitar desmontar todo o banco de baterias para o processo. Desta forma, a necessidade de um processo de carga mais rápido e confiável culminou no desenvolvimento de um novo sistema.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um carregador de baterias capaz de carregar esse banco de baterias ligado diretamente à rede elétrica, de forma uniforme e confiável, tornando o processo de carga mais simples e facilitando o uso do veículo, diminuindo o tempo de espera até que o veículo possa ser usado novamente após terminar uma missão.

É necessário o estudo das baterias do tipo chumbo-ácido, suas características e desempenho, e quais são os processos de carga, a fim de utilizar um método de carga que maximize a vida útil das baterias. Para o desenvolvimento do circuito do carregador é essencial o estudo das características elétricas do processo de carga e das topologias de circuitos existentes para alcançar os patamares exigidos utilizando os conhecimentos da eletrônica de potência.

É utilizada ainda uma placa de interface com um microcontrolador da família ARM Cortex-M3, desenvolvida em laboratório, para gerir o processo de carga.

Na Figura 1 é mostrado o esquema básico do sistema idealizado, alimentado diretamente da rede elétrica.

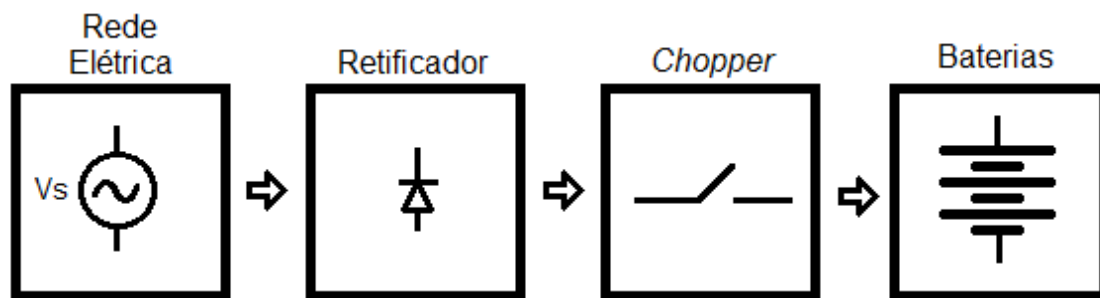


Figura 1 - Esquema Básico do Sistema

No Capítulo 2 são mostrados os estudos sobre as baterias do tipo chumbo-ácido e os processos de carga, incluindo as características elétricas para o processo.

Optou-se por utilizar uma topologia de fonte chaveada com retificados em onda completa e um conversor *chopper*, o estudo das características dos conversores abordados é mostrada no capítulo 3.

O capítulo 4 descreve o desenvolvimento do circuito do carregador, feito primeiramente através de simulações, levando ao desenvolvimento do protótipo do carregador final.

No capítulo 5 são descritos os resultados obtidos utilizando-se o protótipo, através de testes iniciais de cada subsistema do projeto e também do funcionamento do projeto como um todo.

Finalmente no capítulo 6 é apresentada a conclusão sobre o trabalho.

São apresentados também a bibliografia e, nos apêndices A e B, o diagrama esquemático do protótipo desenvolvido com algumas fotos e o diagrama esquemático da placa de interface.

2 – Baterias

Neste capítulo será abordado um estudo sobre baterias, o que são e como funcionam, em particular as baterias do tipo chumbo-ácido, abordando conceitos básicos e aspectos funcionais, as características de desempenho e os principais métodos de carga utilizados.

2.1 - O que são Baterias

Baterias são dispositivos que convertem energia química armazenada em seus componentes em energia elétrica, através de reações químicas com transferência de elétrons de um material para outro.

O termo bateria se refere ao conjunto de células, unidades menores, agrupadas, conectadas em série ou paralelo para os devidos fins. É na célula que se encontram os elementos químicos e onde ocorrem as reações que resultam na corrente elétrica. As células são compostas essencialmente de três componentes, são eles o catodo, o anodo e o eletrólito.

Anodo, ou eletrodo negativo é o elemento que cede elétrons ao sistema externo, Catodo, ou eletrodo positivo é o elemento que recebe os elétrons do sistema externo e o eletrólito é o meio de transferência de carga entre os eletrodos. [1]

As baterias podem ser classificadas em dois grupos principais, primárias e secundárias; as primárias são baterias nas quais o ciclo não pode ser revertido, assim uma vez consumida sua energia armazenada a bateria fica inutilizada; as baterias secundárias são baterias nas quais o ciclo de consumo de sua energia pode ser revertido, recarregando a bateria, assim a bateria pode ser utilizada novamente várias vezes.[2]

Dentre os tipos de baterias mais utilizadas, podemos citar das primárias, as baterias a base de zinco (com mercúrio, manganês prata ou ar por exemplo, ou as conhecidas pilhas alcalinas) e a base de lítio; e das secundárias, Chumbo-ácido, Níquel-Metal Hidrido, Níquel-Cádmio e Lítio-Íon.[1]

2.2 - A Bateria de Chumbo-Ácido

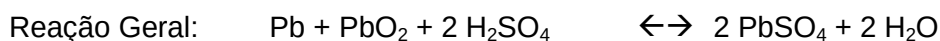
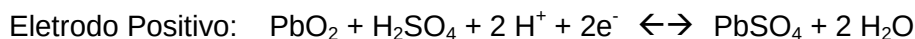
A bateria de chumbo ácido é uma das baterias secundárias mais utilizadas, representando entre 40 e 45% do valor de vendas de baterias no mundo, principalmente devido ao seu baixo custo, confiabilidade e ciclo de vida.[1]

O principal uso das baterias chumbo-ácido é em veículos automotores, para partida, ignição e iluminação, assim as baterias para esse fim são conhecidas como SLI (*Engine Start, Vehicle Lighting and Engine Ignition*), Estas baterias são otimizadas para ter o mínimo custo, mas possuem uma baixa expectativa de ciclos de vida, podendo ser completamente danificadas em 30 a 50 ciclos completos de carga e descarga. [3]

Existem também as baterias de ciclo profundo, usadas principalmente em veículos elétricos como empilhadeiras ou outros veículos industriais, preparadas para operar com descargas profundas sem serem danificadas, mas requerendo atenção à manutenção. E as baterias estacionárias, mais usadas em indústrias para armazenamento ou mais recentemente em sistemas fotovoltaicos, cuja principal característica em relação às outras é a baixa necessidade de manutenção.

Os elementos que compõe a célula da bateria de chumbo-ácido são: Dióxido de chumbo no catodo e Chumbo metálico numa estrutura porosa de grande área de contato como anodo e ácido sulfúrico como eletrólito.

As reações químicas que ocorrem na célula da bateria são descritas a seguir:



Sendo que a tensão nominal de equilíbrio da célula é $U^0 = 2,0\text{V}$ provenientes das reações de equilíbrio $U^0_{\text{PbO}_2/\text{PbSO}_4} = 1,7\text{V}$ e $U^0_{\text{Pb}/\text{PbSO}_4} = -0,3\text{V}$. [4]

2.3 - Características de desempenho de Baterias SLI

As baterias de chumbo ácido possuem uma boa característica de descarga, suportando altas correntes sem uma queda exagerada de sua tensão no final da carga, porém a capacidade da bateria é significativamente reduzida a altas taxas de descarga.[5]

A capacidade que a bateria fornece depende da taxa em que sua energia é consumida, altas taxas de descarga fazem com que o eletrólito seja consumido na estrutura porosa mais rápido que consegue se renovar com o eletrólito no ambiente da célula, assim a tensão cai rapidamente e a bateria não é capaz de sustentar a corrente constante.

Já em baixas taxas de consumo esse problema não acontece e a bateria consegue sustentar corrente por mais tempo.

Na Figura 2, pode ser analisado o perfil de tensão em uma célula para diversas taxas de descarga em termos do tempo que a bateria é integralmente consumida; A célula atinge a tensão de final de carga em menos tempo para taxas maiores de consumo.

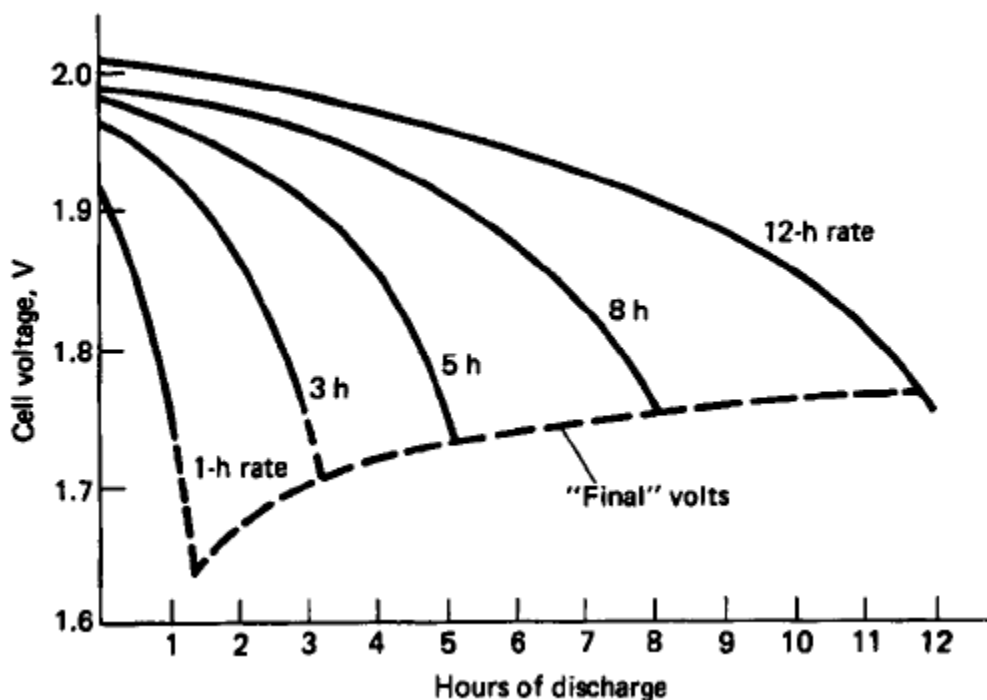


Figura 2 – Curvas de tensão e corrente na descarga da célula (adaptado de[1])

A capacidade das baterias de chumbo-ácido é uma medida fornecida pelos fabricantes, em Ampère×Hora da corrente constante que ela suporta manter num ciclo de 20h de descarga, mas mostrada em termos de uma hora de consumo.

Assim, uma bateria com capacidade de 40Ah pode fornecer uma corrente constante de 2A em um intervalo de 20h; uma corrente de 40A esgotaria a bateria em menos de uma hora pela característica não linear do fornecimento de corrente já visto. A capacidade é assim definida por C_t , sendo C a capacidade indicada e t o tempo de ciclo.

A capacidade C é um valor utilizado também para o cálculo da corrente máxima admissível de carga, geralmente de até 20% do valor C.

A temperatura também afeta o desempenho das baterias, influenciando diretamente na duração da bateria; para temperaturas mais baixas a bateria perde tensão mais rapidamente a um mesmo ritmo de descarga que com temperaturas maiores. Durante o processo de carga a temperatura afeta os níveis de tensão que devem ser observados e monitorados, com um fator de correção de $-0,033\text{V}/^{\circ}\text{C}$. [6]

O efeito da temperatura na descarga da bateria pode ser melhor visualizado na Figura 3; a tensão terminal diminui mais rapidamente em temperaturas mais baixas para a mesma taxa de descarga.

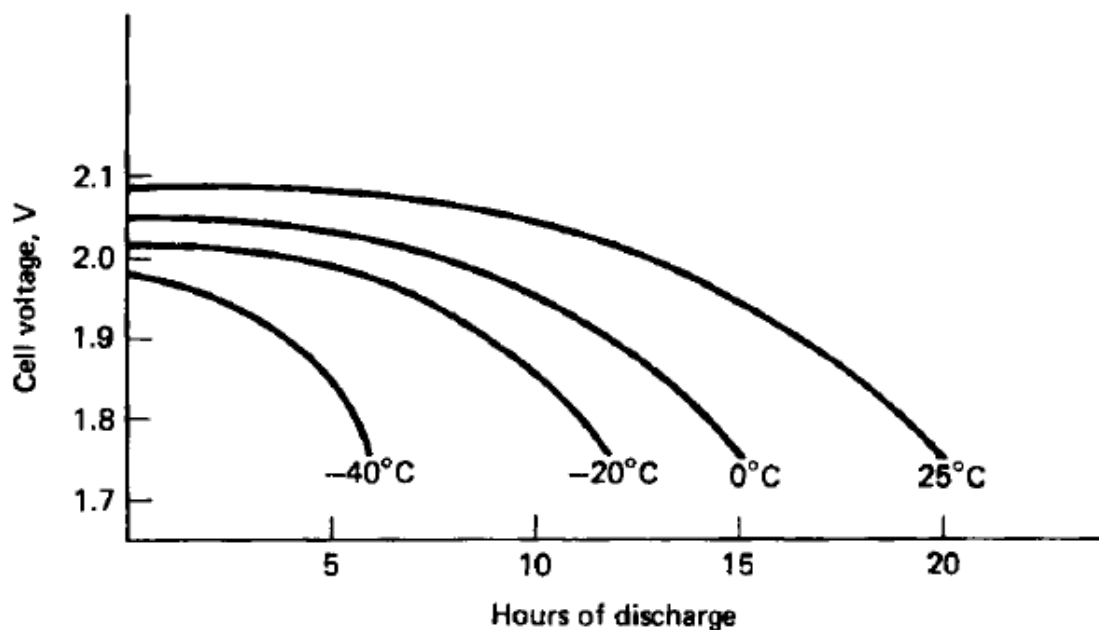


Figura 3 – Tensão da célula na descarga da bateria para diversas temperaturas (adaptado de[1])

2.4 - Métodos de Carga

Existem diversos métodos conhecidos para se carregar as baterias, envolvendo combinações de ciclos de corrente ou tensão constante, ou ainda ciclos de potência constante. Dois dos mais utilizados são os métodos a dois níveis de tensão e a dois níveis de corrente, que serão analisados posteriormente. Outro aspecto importante é também a carga para baterias em descarga profunda, que pode recuperar uma bateria aparentemente inutilizada, utilizando um processo de pré-carga.[1]

Durante o processo de carga alguns patamares de tensão importantes da bateria que devem ser observados; para cada célula e valores típicos, mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Patamares de Tensão na Bateria do Tipo Chumbo-Ácido

Patamar de Tensão	Tensão (V)
Nominal	2,0
Equalização	2,35 ~ 2,40
Flutuação	2,20
Final de Carga	1,75
Sobrecarga	2,65

A tensão de equalização é o patamar pouco abaixo do nível onde começam a ser gerados gases pela passagem de corrente na célula. A tensão de flutuação é o patamar utilizado para compensar a descarga natural da bateria em vazio. A tensão de final de carga indica o nível mínimo de tensão para o processo de carga com corrente elevada e a tensão de sobrecarga indica a tensão máxima admissível antes que a célula seja danificada pelo processo de carga.

Para o processo de carga é usualmente utilizada uma corrente de 10~20% da capacidade nominal da bateria, C , definido como I_{MAX} . Este dado é fornecido pelos fabricantes e pode chegar a valores maiores que C em casos especiais. A corrente de flutuação é usualmente 4% de I_{MAX} . O nível máximo de corrente permitida quando ultrapassada a tensão de formação de gases é de $0,12 \times C$, [4]

Para o processo de pré-carga é utilizada uma corrente de 20% de I_{MAX} . Essa corrente é mantida constante até que a bateria atinja o nível de tensão de final de carga (1,75V), e a partir deste estágio a bateria está pronta para ser carregada; se a bateria não responder a esta fase inicial ela pode ser considerada inutilizável. [7]

Método a dois níveis de tensão: consiste em aplicar na bateria um nível fixo de corrente I_{MAX} , até esta atingir o nível de tensão de equalização V_{eq} , e então manter este nível de tensão. Nesta fase a corrente começará a diminuir conforme a bateria for carregada até atingir a corrente de flutuação I_{FLT} . Então é mantido sobre a bateria um nível de tensão de flutuação V_{FLT} .

Método a dois níveis de corrente: consiste em aplicar na bateria um nível fixo de corrente I_{MAX} , até esta atingir o nível de tensão de equalização, assim como no

método a dois níveis de tensão, mas no próximo passo é mantida corrente pulsante mantendo o nível de tensão de flutuação constante.

3 – Conversores

Com a crescente necessidade de controle da energia elétrica para o acionamento de máquinas ou outros sistemas industriais de alta potência, de forma a converter a energia elétrica entregue pela rede para os mais diversos patamares necessários para o consumo, estabeleceu-se uma modalidade no estudo de engenharia elétrica conhecida por eletrônica de potência, que engloba eletrônica, controle e potência.[8]

3.1 - Retificadores monofásicos utilizando diodos

Os retificadores são circuitos que convertem corrente alternada em corrente contínua, são circuitos essenciais para aplicações em corrente contínua alimentadas pela rede elétrica.

3.1.1 - Retificador monofásico de meia onda

A forma mais simples de um retificador é o retificador monofásico de meia onda, constituído por apenas um diodo, um exemplo deste circuito é mostrado na Figura 4. Considerando uma alimentação com forma de onda senoidal sua operação se dá permitindo a passagem de corrente apenas no semiciclo positivo da onda da alimentação e bloqueando essa passagem durante o semiciclo negativo. O resultado é um sinal cuja tensão acompanha o semiciclo positivo do sinal de alimentação mas é zero durante o semiciclo negativo (para uma carga puramente resistiva), o que caracteriza um sinal de corrente contínua. As formas de onda de entrada e saída deste circuito para uma carga resistiva são mostradas na Figura 5.

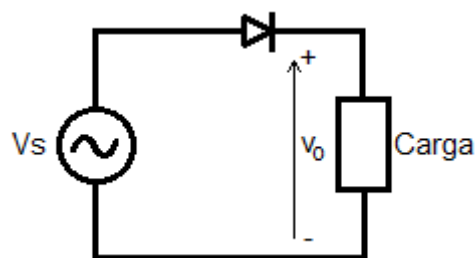


Figura 4 – Retificador monofásico de meia onda

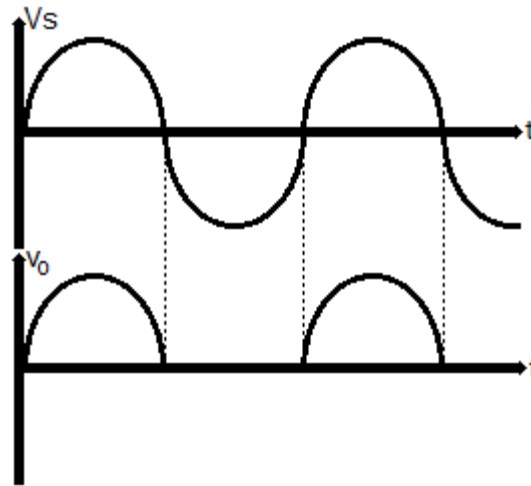


Figura 5 – Formas de onda de tensão de entrada e saída de retificador monofásico de meia-onda

Um grande problema apresentado por este circuito decorre da natureza descontínua da saída obtida, que implica não só em problemas para o circuito alimentado como também para a fonte de alimentação devido ao baixo fator de potência apresentado e aos harmônicos introduzidos, levando a problemas de qualidade de energia. Para se obter um sinal CC puro na saída, ou bastante próximo de um sinal puro é necessário o uso de capacitores grandes, o que torna este tipo de retificador inviável para aplicações de alta potência.

3.1.2 - Retificador monofásico de onda completa

O retificador monofásico de onda completa opera de forma semelhante ao retificador de meia onda, mas permitindo a passagem de corrente também no semiciclo negativo da onda de entrada e conformando-a com a polaridade da corrente de saída, novamente considerando um sinal de alimentação senoidal.

Este retificador pode ser construído de duas maneiras distintas que geram o mesmo resultado: a primeira forma se dá utilizando um transformador com terminação central e dois diodos, conectando um terminal da carga na terminação central, nas outras terminações é colocado um diodo que liga essa terminação ao outro terminal da carga, com o diodo permitindo a passagem da corrente no sentido da terminação à carga, de forma que em cada semiciclo um dos diodos atue como no retificador de meia onda. Um exemplo deste circuito é mostrado na Figura 6.

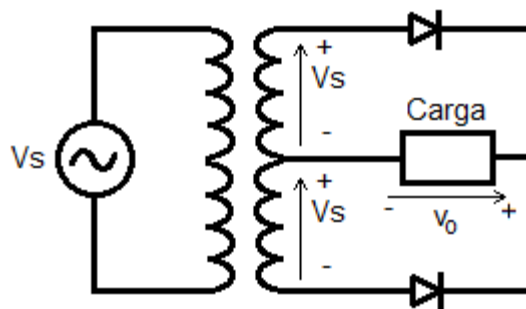


Figura 6 – Retificador monofásico de onda completa aplicando transformador com terminação central

A outra forma consiste em um arranjo de quatro diodos sem a necessidade de um transformador especial. Durante o semiciclo positivo os diodos D2 e D3 permitem a passagem de corrente, enquanto que D1 e D4 permanecem bloqueados.

Da mesma forma, durante o semiciclo negativo os diodos D1 e D4 permitem a passagem de corrente, enquanto que D2 e D3 permanecem bloqueados, desta forma a polaridade da corrente de saída se mantém, e o sinal de tensão obtido acompanha o sinal de entrada, mas com o semiciclo negativo invertido, apresentando a mesma polaridade do semiciclo positivo. Um exemplo deste circuito é mostrado na Figura 7.

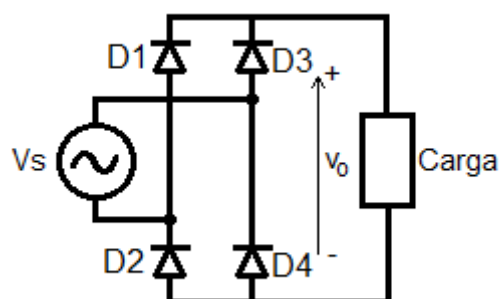


Figura 7 – Retificador monofásico de onda completa aplicando quatro diodos

As formas de onda de entrada e saída de corrente do retificador de onda completa para uma carga resistiva, semelhante para as duas formas de construção, são mostradas na Figura 8.

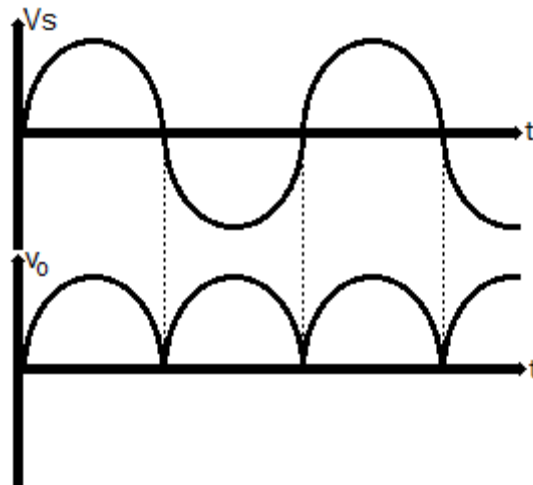


Figura 8 – Formas de onda de tensão de entrada e saída de um retificador monofásico de onda completa

Com este tipo de retificador, para cargas resistivas, o fator de potência visto pela rede é unitário. Para a carga a descontinuidade da corrente limita-se apenas aos pontos onde a tensão de alimentação do sistema cruza o zero na inversão da polaridade entre os semiciclos. É uma solução amplamente utilizada para as necessidades de conversão de corrente alternada em corrente contínua.

Para a obtenção de um sinal CC puro, ou próximo de um sinal puro usando o retificador de onda completa é necessário um filtro menor do que o utilizado no retificador de meia onda, para mesmo fator de ondulação da tensão de saída.

3.2 - Choppers

Os *Choppers* são circuitos conversores CC-CC, ou seja, transformam corrente contínua em corrente contínua, mas alterando o nível de tensão da saída em relação à entrada, através de um transistor que opera como chave.

O circuito do conversor pode variar conforme sua finalidade, que pode ser abaixador ou elevador, utilizando além das chaves semicondutoras, capacitores, indutores e diodos quando necessário. Uma das principais aplicações dos *choppers* é como regulador de tensão.

As topologias básicas de choppers sem o uso de transformadores são: *Buck*, *Boost*, *Buck-boost* e *Cúk*; O regulador *Buck* é um conversor abaixador, ou seja, a tensão média de saída é menor que a de entrada. O regulador *Boost* é um conversor elevador, ou seja, sua saída tem tensão média maior que a tensão de entrada. Os

reguladores *Buck-Boost* e *Cúk* podem ter sua tensão média de saída maior ou menor que a da entrada dependendo de como são operados.

3.2.1 - O *Chopper* Abaixador

Nesta modalidade o conversor atua de forma a diminuir a tensão de saída “recortando” a alimentação, assim a tensão média obtida é inferior à de entrada. Um exemplo de circuito de um *chopper* abaixador é mostrado na Figura 9.

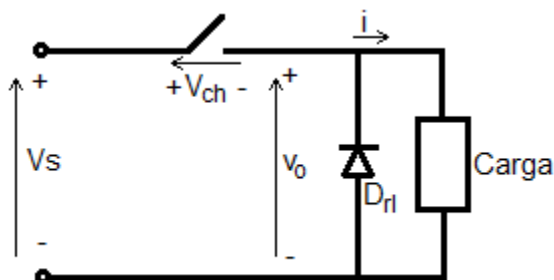


Figura 9 – Circuito de um *chopper* abaixador

Na Figura 10 pode ser analisada a forma de onda de saída e de entrada do conversor com uma carga puramente resistiva e considerando um *chopper* sem perdas. No intervalo $t_0 \rightarrow t_1$, a tensão da alimentação é aplicada na carga, e no intervalo $t_1 \rightarrow t_2$ a tensão na carga é zero. Definindo o intervalo $t_0 \rightarrow t_2$ como o período T , e o instante t_1 como $k.T$, sendo k a razão cíclica, a tensão média de saída V_a é calculada por meio da Equação (1).

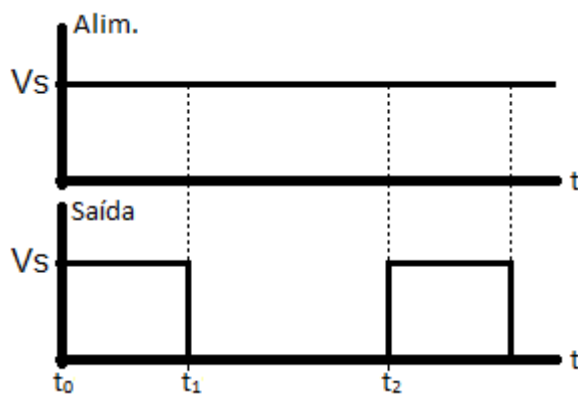


Figura 10 – Formas de onda de entrada e saída de um *chopper* abaixador com carga resistiva

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} V_s dt = \frac{t_1}{T} V_s = k V_s \quad (1)$$

A tensão eficaz de saída é calculada por meio da Equação (2).

$$V_o = \left(\frac{1}{T} \int_0^{kT} V_s^2 dt \right)^{1/2} = \sqrt{k} V_s \quad (2)$$

Para um sistema com perdas na chave, a tensão que deve ser usada para o cálculo nas Equações (1) e (2) deve considerar a queda de tensão v_{ch} na chave, utilizando assim $v_o = V_s - v_{ch}$ ao invés de V_s .

A potência é calculada pela equação (3). Em um sistema sem perdas a potência de saída é igual à potência de entrada, mas em um sistema com perdas essas potências serão diferentes e a eficiência do conversor pode ser calculada pela razão entre a potência de saída e a de entrada.

$$P_o = \frac{1}{T} \int_0^{kT} v_o i dt = k \frac{v_o^2}{R} \quad (3)$$

Para um *chopper* com carga RL devem ser considerados os modos de operação do circuito. No modo 1 a chave se encontra ligada e a fonte alimenta a carga, no modo 2 a chave se encontra aberta, a fonte não alimenta a carga e a corrente da carga flui pelo diodo de roda livre.

Admitindo que no início do intervalo de condução (Modo 1) a corrente na carga é $i_1(t=0) = I_1$, a corrente de carga é demonstrada pela equação (4), com E a tensão sobre o capacitor ou fonte de tensão na carga e corrente no final deste intervalo $i_1(t=k \cdot T) = I_2$.

$$i_1(t) = I_1 e^{-tR/L} + \frac{V_s - E}{R} (1 - e^{-tR/L}) \quad (4)$$

Para o segundo intervalo, com a chave aberta, a corrente na carga é descrita pela equação (5), sendo que no início deste intervalo a corrente é $i_2(t=k \cdot T) = I_2$, e ao final $i_2(t=T) = I_3$. O ciclo então recomeça com $I_1 = I_3$. Com isto a ondulação da corrente de pico a pico é dada por $\Delta I = I_2 - I_1$. [8]

$$i_2(t) = I_2 e^{-tR/L} - \frac{E}{R} (1 - e^{-tR/L}) \quad (5)$$

Se a corrente ao final do modo 2 chegar a zero é dito que o chopper está operando em condução descontínua, caso contrario opera em condução contínua. As formas de onda de corrente podem ser melhor compreendidas através da Figura 11.

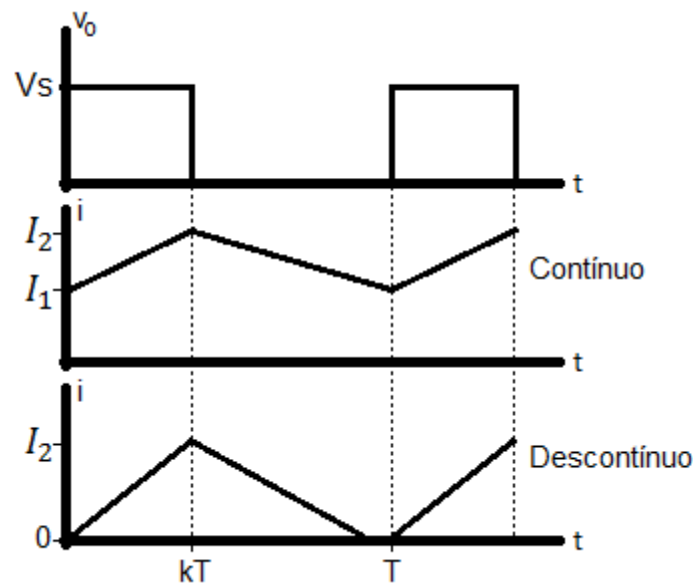


Figura 11 – Formas de onda de corrente em chopper com carga RL

3.2.2 - O Chopper Elevador

Nesta modalidade o conversor atua de forma que a tensão de saída seja maior que a tensão de entrada, para isso o chopper também opera com dois modos, no primeiro modo a chave é fechada e a fonte de alimentação é ligada apenas a um indutor que armazena energia, no segundo modo a chave é aberta e a fonte e o indutor em série alimentam a carga. Um exemplo de circuito de chopper elevador é mostrado na Figura 12.

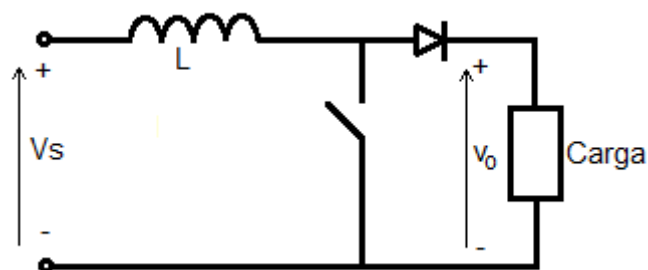


Figura 12 – Circuito de um chopper elevador

A alimentação da carga sempre se dá de forma descontínua, mas a alimentação do indutor pode ser contínua ou descontínua. No caso contínuo, quando a

chave conduz ($t_0 \rightarrow k.T$), a tensão sobre o indutor $v_L = V_s$, e quando o diodo conduz ($k.T \rightarrow T$) a tensão sobre o indutor é $v_L = -(V_o - V_s)$, assim a ondulação da corrente no indutor é calculada pela equação (6), e a tensão de saída é calculada pela equação (7).

$$\Delta I = \frac{V_o k T}{L} \quad (6)$$

$$V_o = \frac{V_s}{1 - k} \quad (7)$$

No caso descontínuo, a tensão sobre o indutor é igual ao caso contínuo, porém o tempo de condução do diodo é reduzido para $k.T \rightarrow t_x$, sendo t_x o instante em que a corrente chega a zero.

3.2.3 - A Modulação PWM

Para o controle da tensão de saída de um conversor, principalmente para os conversores onde a tensão de saída é variável conforme as necessidades do sistema, é necessário um método de controle que possa se ajustar à situação do conversor e à demanda da carga conforme as premissas do projeto. Uma das formas de controle mais conhecidas é a modulação por largura de pulso, PWM, que consiste em controlar a razão cíclica do período do acionamento da chave, de forma que a tensão de saída seja comandada por essa variação. Um exemplo do funcionamento dessa modulação é mostrado na Figura 13. A modulação por largura de pulso é amplamente utilizada em controles de motores para se obter velocidade constante mesmo com cargas variáveis para o motor.

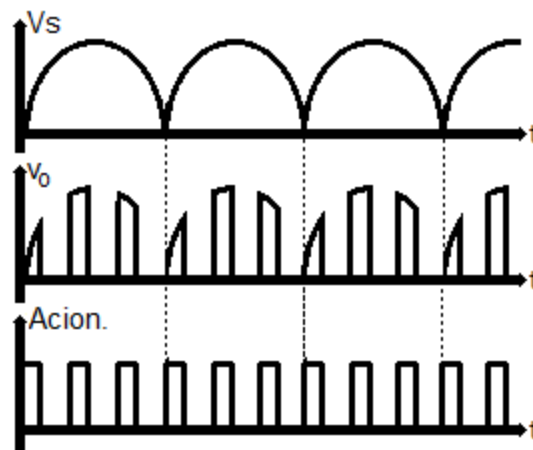


Figura 13 – Formas de onda de entrada e saída de tensão de um conversor com modulação por largura d pulso

A modulação por largura de pulso pode ainda ser manipulada para se obter a aproximação do sinal de saída a formas de onda desejáveis, é possível obter, por exemplo, formas de rampas ou semiciclos de senóide. Através dessa manipulação é possível obter, por exemplo, uma rampa de tensão para o *soft-start* de uma máquina CC. A obtenção de semiciclos de senóide é particularmente interessante em sistemas que atuam sobre retificadores ligados diretamente à rede, aproximando a forma de onda da corrente de entrada do sistema a uma senóide, o que afeta significativamente parâmetros de qualidade de energia do sistema. [8]

4 – Desenvolvimento do projeto

Após o estudo realizado sobre as baterias do tipo chumbo ácido é possível definir algumas das exigências do projeto e estabelecer alguns limites na sua operação.

Optou-se por utilizar o método de carga a dois níveis de tensão, não ultrapassando a tensão de equalização. Assim para o conjunto de seis baterias o carregador deve ser capaz de sustentar uma tensão de 90V ($2,4V/cel \times 6 \text{ cel/bat} \times 6bat = 86,4V$), com uma pequena margem. Implementando também a fase de pré-carga para baterias em estado de descarga profunda.

O sistema desenvolvido pode ser regulado de forma que possa carregar também arranjos com menos baterias, assim através do ajuste pelo software, o número de baterias no arranjo poderá ser regulado permitindo essa operação diferenciada. Isto é particularmente útil para transformar o carregador em um sistema de *backup* para carregamento de bateria de um carro, por exemplo.

Embora a corrente aplicada durante a fase de corrente constante do processo de carga possa atingir valores bastante elevados sem danificar as baterias, optou-se por trabalhar com um limite de corrente de 2,0A, por questões de segurança e simplicidade de projeto, que será regulado pelo software e poderá ser alterado para valores menores no caso de baterias com nível de corrente máxima inferior aos 2,0A.

Definidos os níveis de tensão e corrente máximos que devem ser sustentados pelo sistema é possível planejar o circuito de potência e o sistema de controle.

O circuito de potência será construído utilizando-se um retificador monofásico de onda completa ligado diretamente à rede elétrica, aplicando em seguida um conversor *buck* capaz de regular a corrente e tensão aplicado no conjunto de baterias. Um esboço inicial do sistema é mostrado na Figura 14.

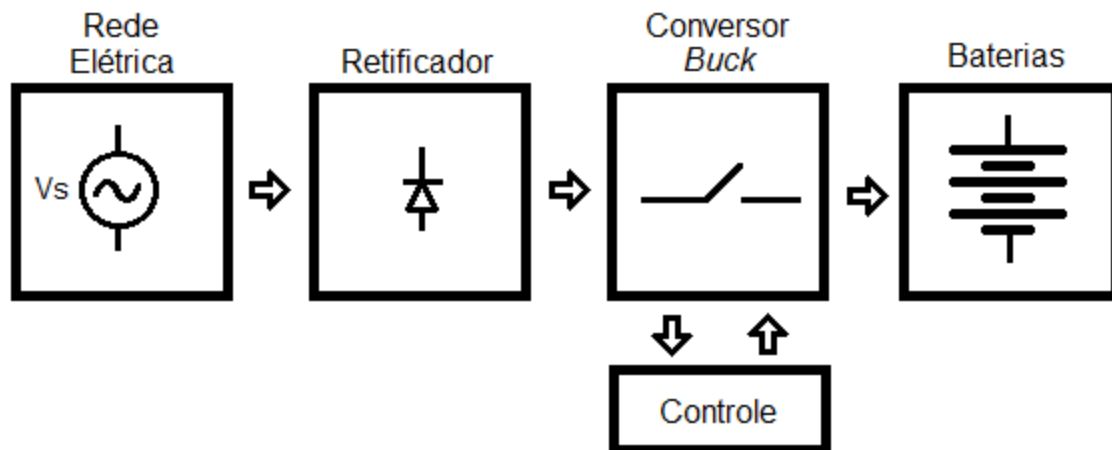


Figura 14 – Diagrama inicial do sistema do carregador

Há varias formas de se obter o resultado esperado através de arranjos diferentes utilizando outras topologias de conversores. A escolha dessa configuração se deu pela simplicidade de projeto e por não necessitar do uso de transformadores.

Para a configuração escolhida a entrada do conversor *buck* não é um sinal perfeitamente contínuo como abordado durante o estudo sobre os *choppers*, mas sim um sinal senoidal retificado, que não é estudado na bibliografia disponível, assim a análise de simulações nesta configuração é essencial para compreender seus aspectos funcionais.

Para o sistema de controle será necessário medir a tensão do conjunto de baterias e a corrente de carga aplicada sobre elas, monitorando também a temperatura das baterias, o que deve ser feito através dos conversores analógico-digital do microcontrolador, exigindo assim diversos cuidados de isolamento e adaptação dos níveis de tensão. Será necessário também desenvolver um *software* capaz de gerir o processo de carga através das medidas, aplicando o método de carga escolhido.

A configuração inicial planejada era composta de um arranjo com duas chaves na ponte retificadora, que para o caso monofásico tem o mesmo comportamento que uma chave apenas, colocada em seguida ao retificador, optando então pela segunda configuração. Os esboços iniciais estão exibidos na Figura 15, sendo (a) e (b) os arranjos inicial e final, respectivamente.

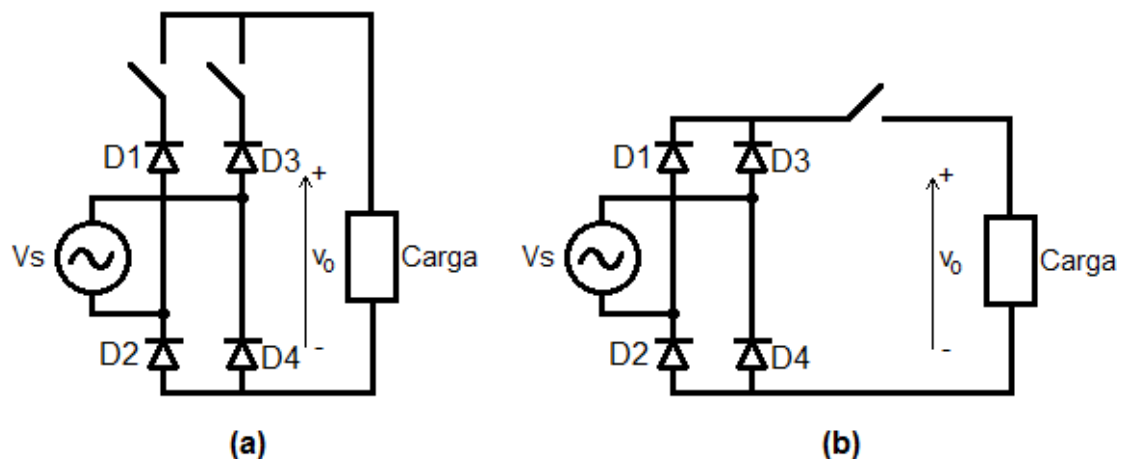


Figura 15 - Esboços iniciais para o arranjo do retificador com o *chopper*

4.1 - Sistema de potência

Inicialmente foram conduzidas algumas simulações para analisar o comportamento do conversor *buck* atuando sobre um sinal de corrente contínua com forma de semiciclos de senóide, utilizando o software LTSpice da Linear Technologies.

O circuito e os resultados obtidos pela simulação estão mostrados na Figura 16 e na Figura 17 respectivamente.

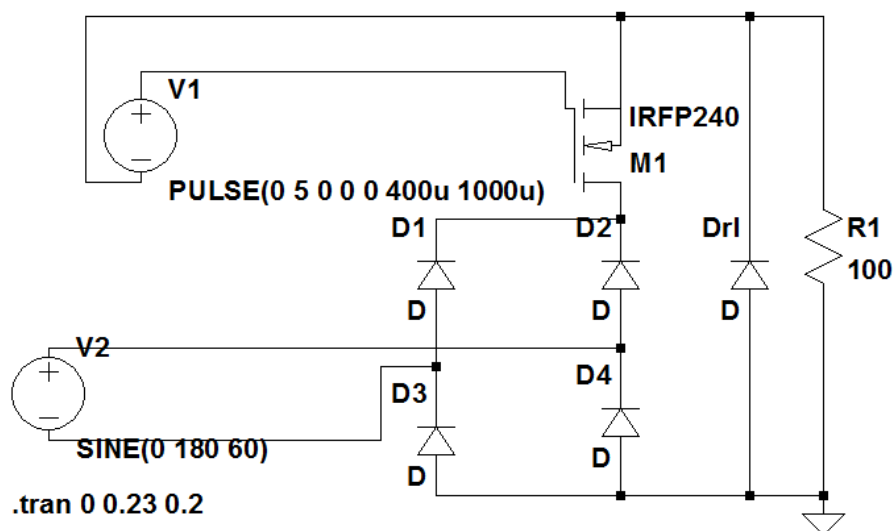


Figura 16 – Circuito para simulação do retificador com o conversor *buck* em seguida

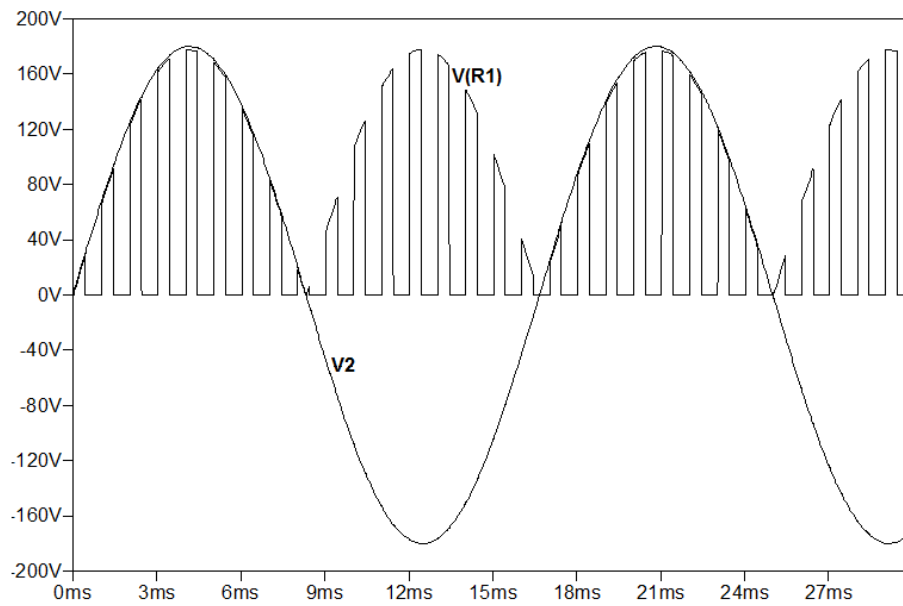


Figura 17 – Simulação do retificador com o conversor *buck* em seguida, mostrando os sinais de entrada e saída de tensão

Esta primeira simulação mostra que a forma de onda de saída apresentada pelo circuito acompanha o sinal da senoide de entrada retificada em onda completa, mas 'recortada' conforme o funcionamento do *chopper*, o que representa um sinal de corrente contínua e regulável.

Modelando o conjunto de baterias como uma fonte de tensão de 72V, com resistência interna de 10Ω , Figura 18, e usando esse arranjo como carga para o sistema utilizado anteriormente é possível analisar preliminarmente o comportamento do carregador, o circuito e o resultado desta simulação é mostrado na e na Figura 19.

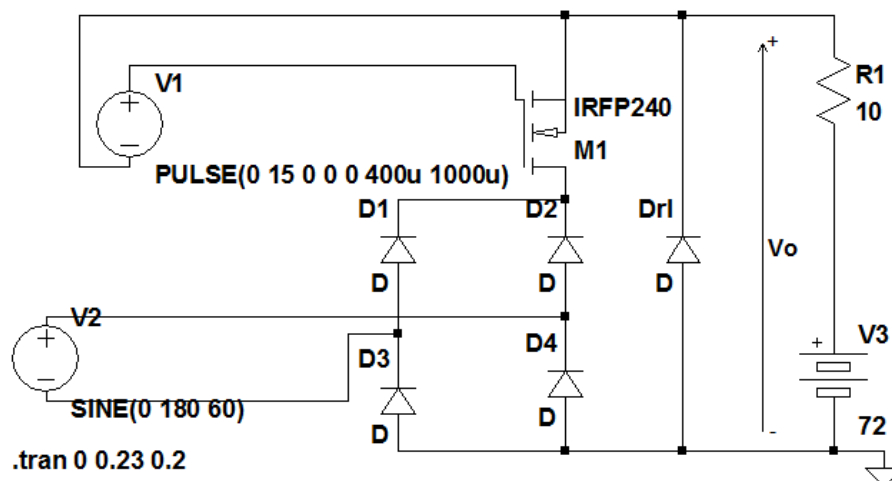


Figura 18 – Circuito para simulação do sistema aplicado sobre o banco de baterias

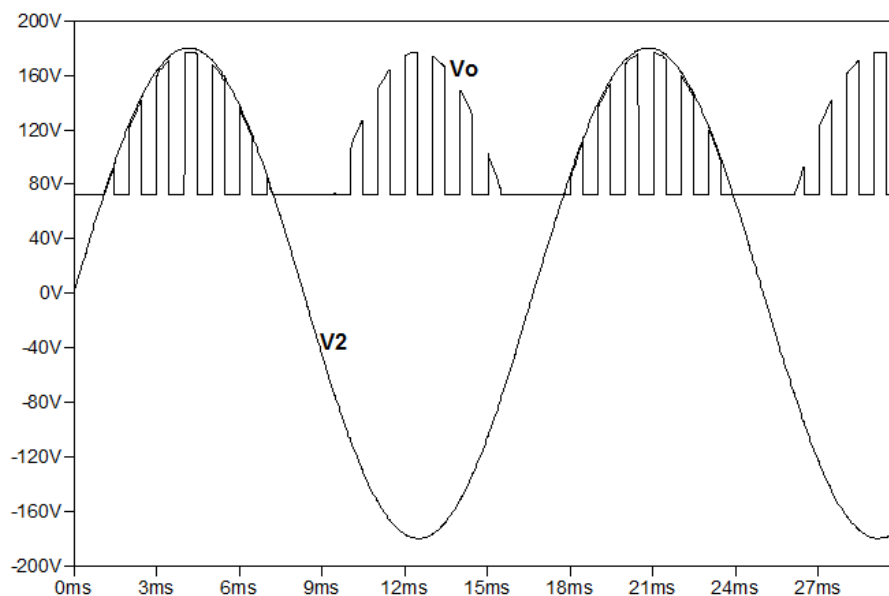


Figura 19 – Simulação do sistema aplicado sobre o banco de baterias, mostrando os sinais de entrada e saída de tensão.

A análise das formas de onda mostra que, como esperado, só há condução no intervalo em que a onda tem valor de tensão maior que o valor do conjunto de baterias. As formas de onda mostram claramente a necessidade de um filtro na saída, de forma a manter constante o nível de tensão aplicado sobre as baterias, e fazendo com que a corrente aplicada tenha um fator de ondulação bastante baixo.

Aplicando então um filtro na saída, um capacitor e um indutor com valores de $1000\mu\text{H}$ e 100mF respectivamente, é possível prever o comportamento do sistema mais próximo da situação real de funcionamento, o circuito é mostrado na Figura 20 e

as formas de onda de tensão apresentadas pela simulação são mostradas na Figura 21. Na Figura 22 são mostradas as formas de onda de corrente apresentadas por esse circuito, desta vez utilizando um período de $80\mu\text{s}$, mais próximo de uma situação real de chaveamento.

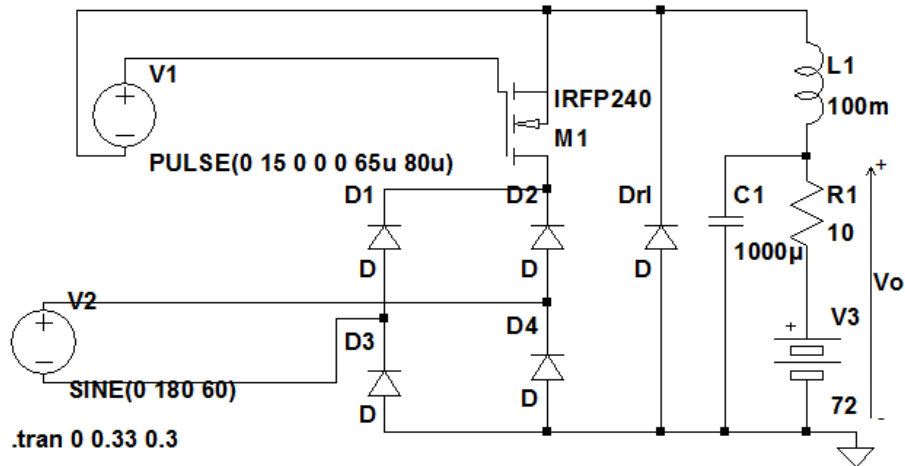


Figura 20 – Circuito para simulação do sistema com filtro

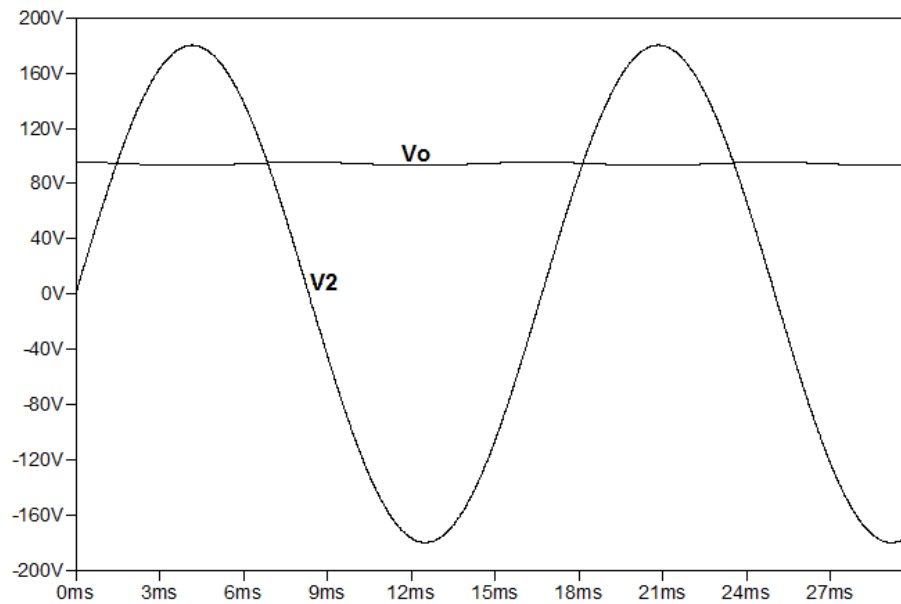


Figura 21 – Simulação do sistema com filtro, mostrando os sinais de entrada e saída de tensão.

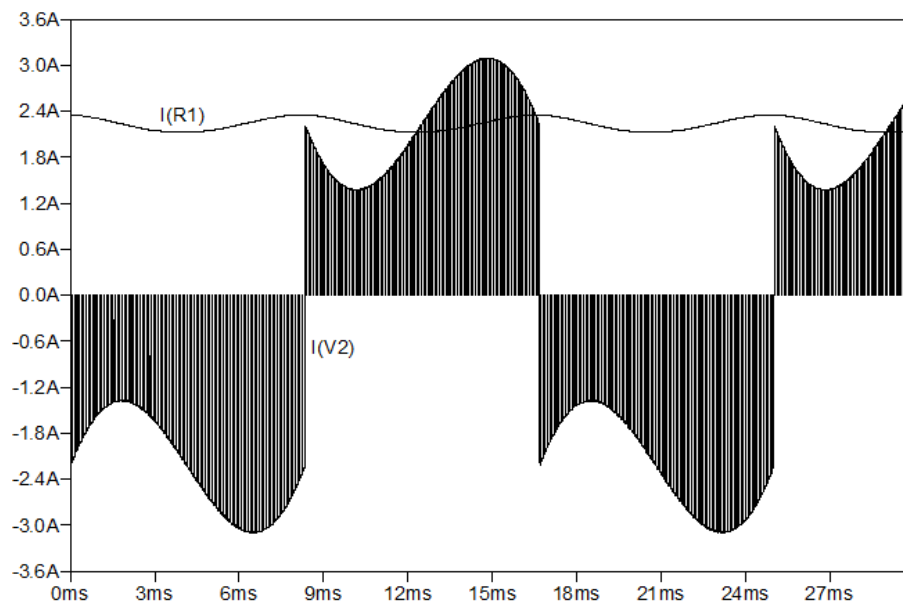


Figura 22 – Formas de onda de entrada e saída de corrente no sistema

Com esta configuração o nível de tensão de saída se mantém praticamente constante sobre o conjunto de baterias, a forma de onda da corrente de entrada mostra que o valor de indutância está bastante alto.

Ajustando para 15mH o valor da indutância a forma de onda de entrada fica menos defasada em relação à onda de tensão de entrada, mas aumenta a ondulação da corrente de saída como mostrado na Figura 23.

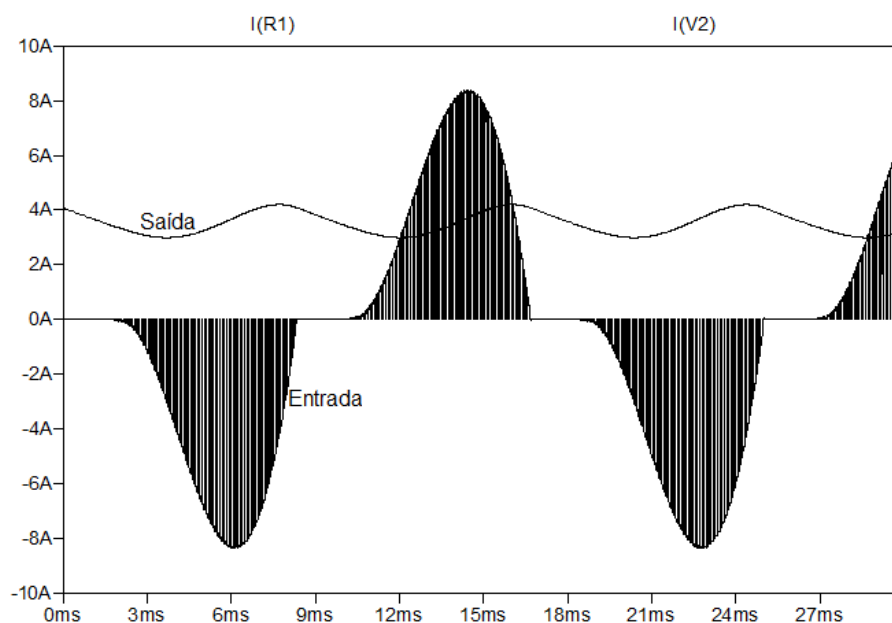


Figura 23 – Formas de onda de entrada e saída de corrente no sistema com indutor de 15mH

Ainda assim, para a configuração utilizada, a corrente de saída está acima dos 2A planejados para o sistema, desta forma pode-se considerar que um sistema que atenda às especificações desta simulação será capaz de atender as necessidades gerais do carregador proposto.

4.2 - Sistema de Controle

O sistema de controle deve obedecer ao método de carga planejado, aplicando sobre a bateria os níveis de corrente e tensão exigidos dentro de cada estágio do processo de carga. Para compreender o funcionamento esperado do sistema de controle foi elaborado um fluxograma, apresentado na Figura 24, que mostra passo a passo o comportamento esperado.

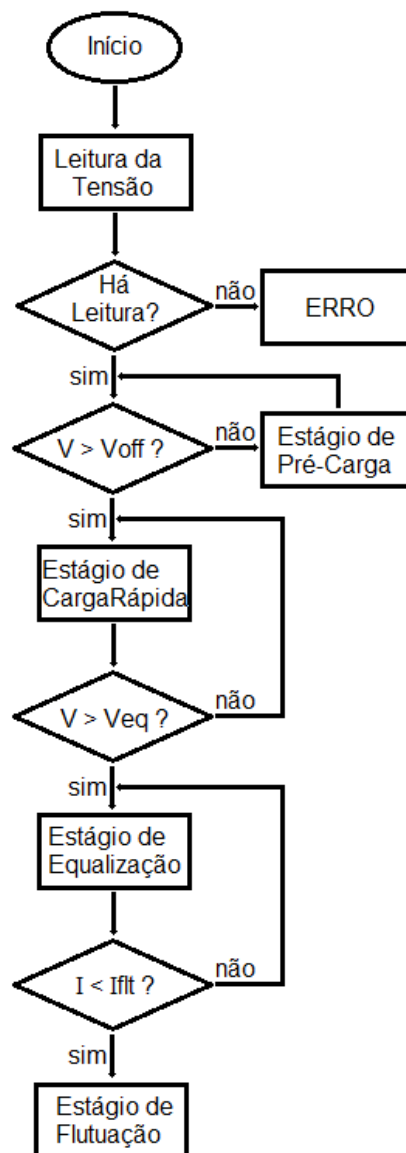


Figura 24 – Fluxograma básico da sequência de controle do processo de carga

Este método também é conhecido como método de quatro estágios, pois engloba o método a dois níveis de tensão com o estágio de pré-carga aplicado sobre baterias em descarga profunda, totalizando assim quatro estágios diferentes durante o processo de carga.

Todo o controle de tensão e corrente é feito pelo software, assim o desenvolvimento deve garantir a execução correta do método, caso contrario as baterias podem ser danificadas, assim o sistema deve ser capaz de detectar problemas durante o processo. O sistema deve ser capaz também de detectar a ausência das baterias quando for ligado, para evitar possíveis acidentes com o usuário ou danos ao próprio carregador; numa situação de curto-circuito da saída a corrente poderia atingir valores excessivamente altos e danificar os componentes.

Descrevendo sucintamente o processo, quando o sistema for iniciado deve garantir que a chave esteja aberta e então fazer a leitura da tensão do conjunto de baterias, caso não haja nenhum valor medido o usuário deve ser avisado da situação de erro, possivelmente as baterias não foram corretamente conectadas.

Garantindo a existência do conjunto de baterias a ser carregado, através do nível de tensão é possível definir se o conjunto se encontra em estado de descarga profunda ou não e o software deve prosseguir para o estágio de carga conveniente.

No processo de pré-carga deve ser mantida uma corrente constante de valor baixo, 20% da corrente máxima de carga sugerida pelo fabricante, sobre o conjunto de baterias até que se atinja o valor de tensão mínimo para o processo de carga, passando então para o estágio de carga rápida. Caso não haja reação favorável das baterias o processo deve ser encerrado e o usuário alertado de um provável problema com as baterias que não puderam ser recuperadas do estado de descarga profunda.

Durante o processo de carga rápida é mantida sobre o conjunto a corrente de carga máxima sugerida pelo fabricante, monitorando sua tensão, que subirá até o nível de tensão de equalização, de 2,4V/célula.

Atingindo este patamar o estágio de carga rápida é encerrado, partindo para o processo de equalização. Para o projeto deste carregador a corrente máxima permitida será de 2A, independente do nível máximo sugerido pelo fabricante desde que ele não seja ultrapassado, ou seja, para valores menores que 2A o controle deve ser ajustado para o valor ideal.

O processo de equalização carrega completamente as baterias. Isto se dá mantendo fixo o nível de tensão de equalização sobre as baterias e monitorando o nível da corrente, que diminuirá conforme as baterias forem carregando, até atingir um valor mínimo de corrente de flutuação, de 4% do valor máximo de corrente de carga permitido pelo fabricante. Terminando este estágio as baterias já estão carregadas, e serão mantidas num estado de flutuação apenas para compensar a perda natural das baterias.

Durante o estágio de flutuação a tensão sobre o conjunto deve ser mantido constante, com tensão de 2,2V/célula.

Ao mesmo tempo que o processo de carga ocorre, os níveis de tensão definidos devem ser ajustados em função da temperatura da bateria, com um fator de correção de $-0,033\text{V}/^{\circ}\text{C}$ por célula.

O processo todo é composto por um conjunto de fases de corrente ou tensão constantes, que é mostrado na Figura 25 apenas para ilustrar graficamente qual é o comportamento esperado.

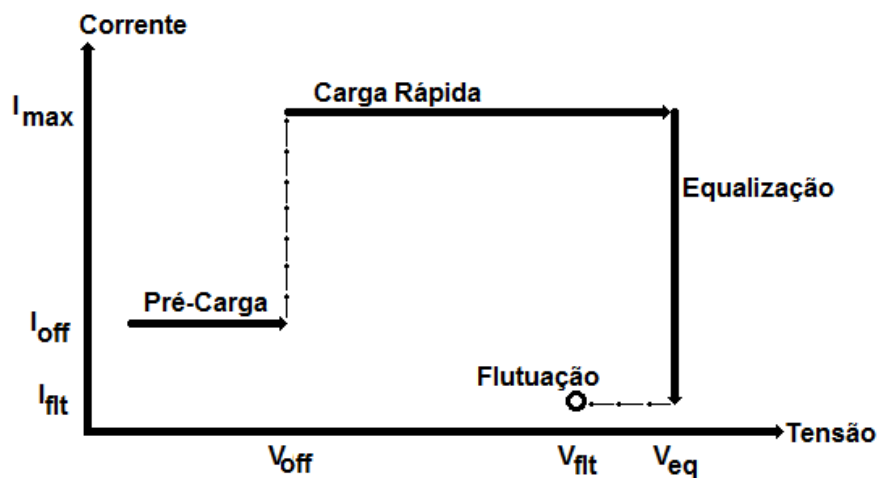


Figura 25 – Comportamento da tensão e da corrente durante os estágios de carga

O sistema de controle será gerenciado por um microcontrolador STM32H103, da família ARM Cortex-M3 [9]. O desenvolvimento do software para este microcontrolador é feito através do compilador arm-elf-gcc e da ferramenta para debugging OpenOCD.

As rotinas de controle para manter os patamares de tensão e corrente fixos foram desenvolvidas com um algoritmo de histerese regulando o ciclo de trabalho do chopper

4.3 - Projeto do Circuito

Definida a topologia básica do conversor, o circuito como um todo deve ser projetado, no intuito de desenvolver um protótipo que será utilizado para os testes práticos. Além do circuito de potência em si, composto pelos diodos, chave, e demais componentes, muitos subsistemas devem ser projetados para a elaboração do sistema, como o circuito de acionamento da chave, circuitos de condicionamento de sinais para interface com o microcontrolador e circuito de proteção.

Iniciando pelo sistema de potência, para o retificador monofásico de onda completa serão utilizados quatro diodos 6A8. A chave será um mosfet IRF740, e o diodo de roda-livre MUR1540, um capacitor de $1000\mu\text{F}/250\text{V}$ e um indutor de 15mF . Com isto o sistema pode ser ligado diretamente à rede elétrica.

O acionamento da chave é feito através de um circuito integrado IR2121, o método de conexão deste CI está mostrado na Figura 26, sendo que este componente será alimentado por uma fonte externa, independente e isolada do circuito; o transistor se encontra antes da carga em relação ao sentido da corrente, assim o emissor terá tensão variando acompanhando a tensão de saída do retificador em relação ao nível zero da carga.

O acionamento da porta do Mosfet deve ser feito com tensão acima da tensão do emissor, necessitando assim uma fonte de tensão que possa acompanhar essa variação. O IR2121 será acionado pelo microcontrolador através de um optoacoplador de alta velocidade.

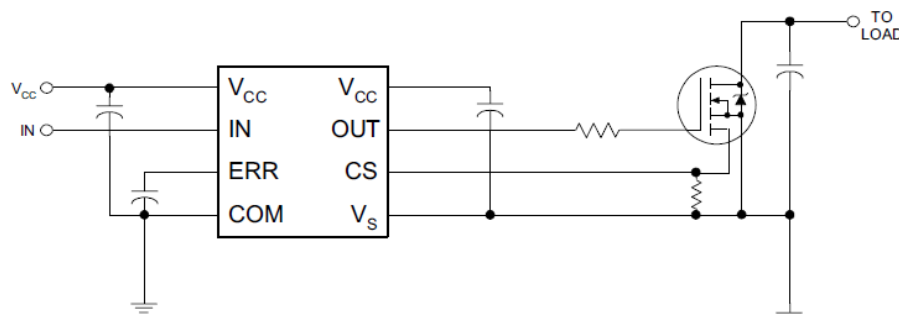


Figura 26 – Esquema de ligação do CI IR2121 [10]

O circuito de proteção de sobrecorrente é um sistema passivo, acionado pelo nível de tensão sobre um resistor *shunt* em série com a chave, utilizando um arranjo de transistores BC337 atuando como portas lógicas e também portas lógicas do tipo *schmitt-trigger* acionando o pino de entrada de erro do IR2121 e bloqueando o acionamento da chave, utilizando também um optoacoplador para enviar ao microcontrolador um sinal de status de falta. O esquema deste circuito é mostrado na Figura 27.

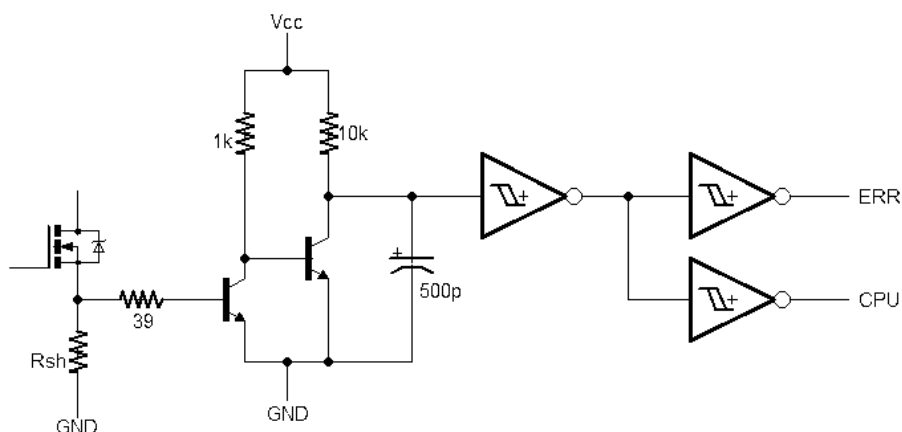


Figura 27 - Esquema de ligação do sistema de proteção

O nível de tensão sobre a bateria a ser medido deve ser adaptado ao nível de leitura do microcontrolador, que é de 3,3V. Para isto é utilizado um amplificador operacional no modo diferencial, com um ganho de 0,01. Assim o nível máximo de leitura não é ultrapassado mesmo num momento de falta com uma tensão de pico de 311V atingida se a chave estiver fechada, sem carga e com o sistema ligado à rede de 220Vrms. O diagrama esquemático desta configuração é mostrado na Figura 28. A corrente será mensurada por um sensor de efeito hall, ACS712T.

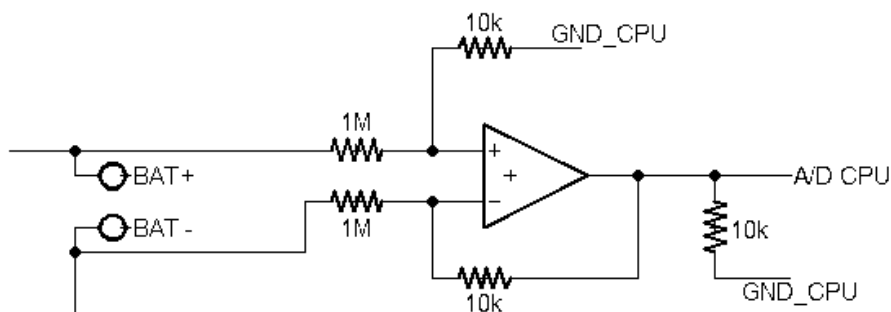


Figura 28 - Amplificador para leitura da tensão da bateria

Todo o sistema de controle será feito utilizando a placa de interface desenvolvida no laboratório, com um microcontrolador STM32H103 da família ARM cortex-M3. A placa de interface dispõe de um conector multifuncional de entradas e saída digitais e analógicas, capaz de atender às necessidades do carregador, assim a placa do carregador possuirá um conector semelhante, utilizando as conexões necessárias. Na Figura 29 é mostrada uma foto da placa de interface com o microcontrolador acoplado, mostrando também o diagrama de pinos do conector.

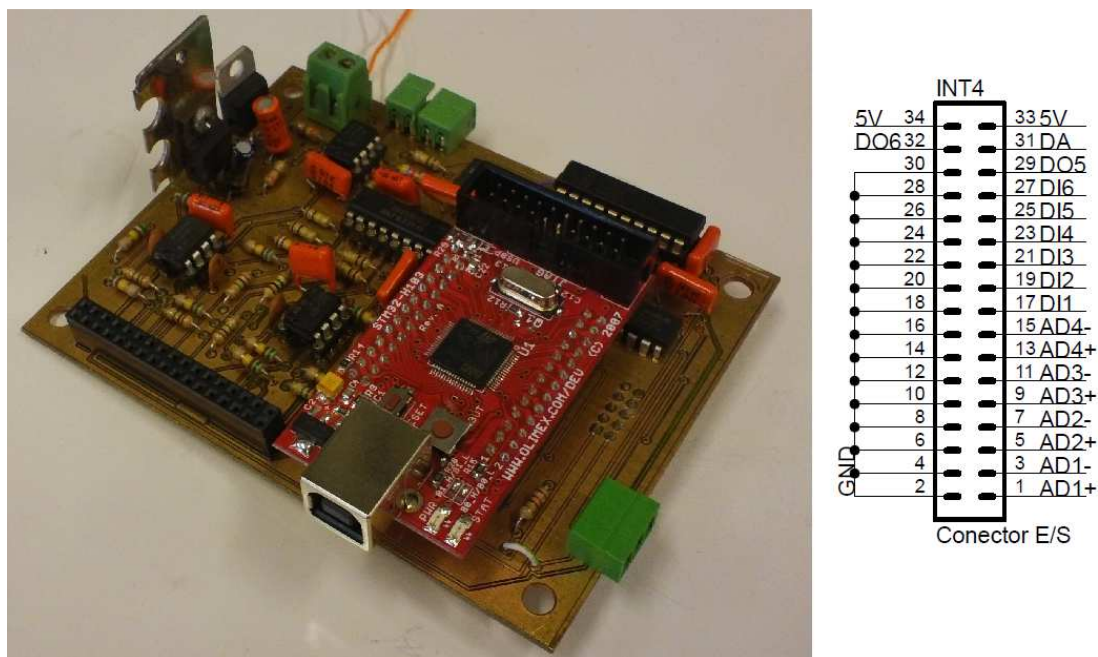


Figura 29 - Foto da placa de interface utilizada, com diagrama de pinos do conector

Para a placa do carregador de baterias os canais do conector multifuncional necessários serão dois canais de entrada de sinal analógico, para as medidas de tensão sobre as baterias e de corrente aplicada, um canal de saída digital para o sinal de acionamento da chave e um canal de entrada digital para leitura da condição de atuação da proteção contra sobrecorrente.

O diagrama esquemático final do carregador e algumas fotos do protótipo são mostrados no Apêndice A. O desenvolvimento da placa do carregador foi feito com o software EAGLE da Cadsoft.

O diagrama esquemático da placa de interface é mostrado no Apêndice B.

5 – Resultados

Neste capítulo serão demonstrados os resultados obtidos nos testes utilizando o protótipo construído, bem como os resultados finais do seu uso como carregador de baterias.

Inicialmente foram conduzidos alguns testes com a placa do carregador antes de acoplá-la à placa de interface com o microcontrolador, para garantir que todas as funções esperadas estão funcionando como esperado.

5.1 – Testes de Acionamento

O primeiro ensaio teve por objetivo verificar o funcionamento do sistema de acionamento da chave, através do optoacoplador e do circuito integrado IR2121, utilizando o microcontrolador com um sinal fixo de PWM, com frequência do sinal de 20kHz, e alimentando a placa através de uma fonte externa independente. Este primeiro teste foi realizado sem alimentação para a carga.

Na Figura 30 são mostradas as formas de onda obtidas no osciloscópio na entrada da placa através do microcontrolador, do sinal de saída do optoacoplador e do sinal na porta do MOSFET. Esse teste demonstra que o sistema de acionamento funciona como esperado e a chave é acionada de acordo com o sinal de entrada; o microcontrolador será então capaz de comandar a chave e assim ajustar a corrente e tensão de saída do conversor.

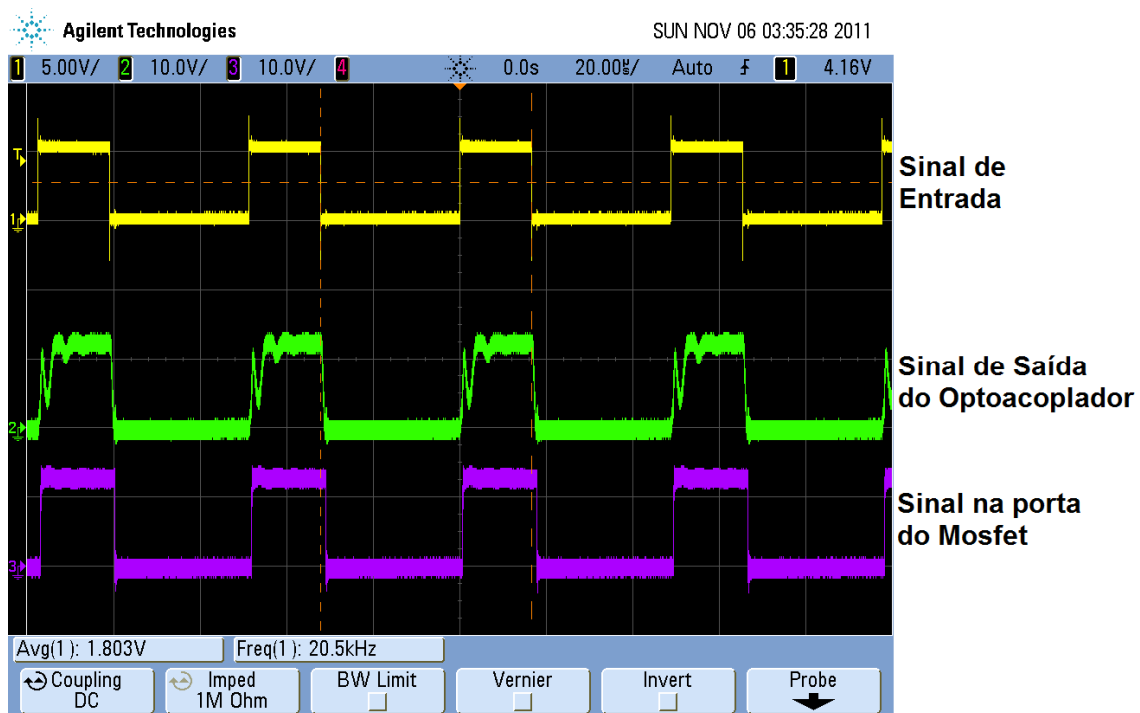


Figura 30 - Sinais do sistema de acionamento da chave

Por meio desse ensaio foi também possível analisar o atraso na saída do optoacoplador em relação à excitação e também o atraso da saída do CI IR2121 em relação à excitação, como mostrado na Figura 31, o que demonstra a importância de se utilizar um optoacoplador de alta velocidade para este tipo de aplicação. O atraso registrado foi de $1,2\mu\text{s}$.

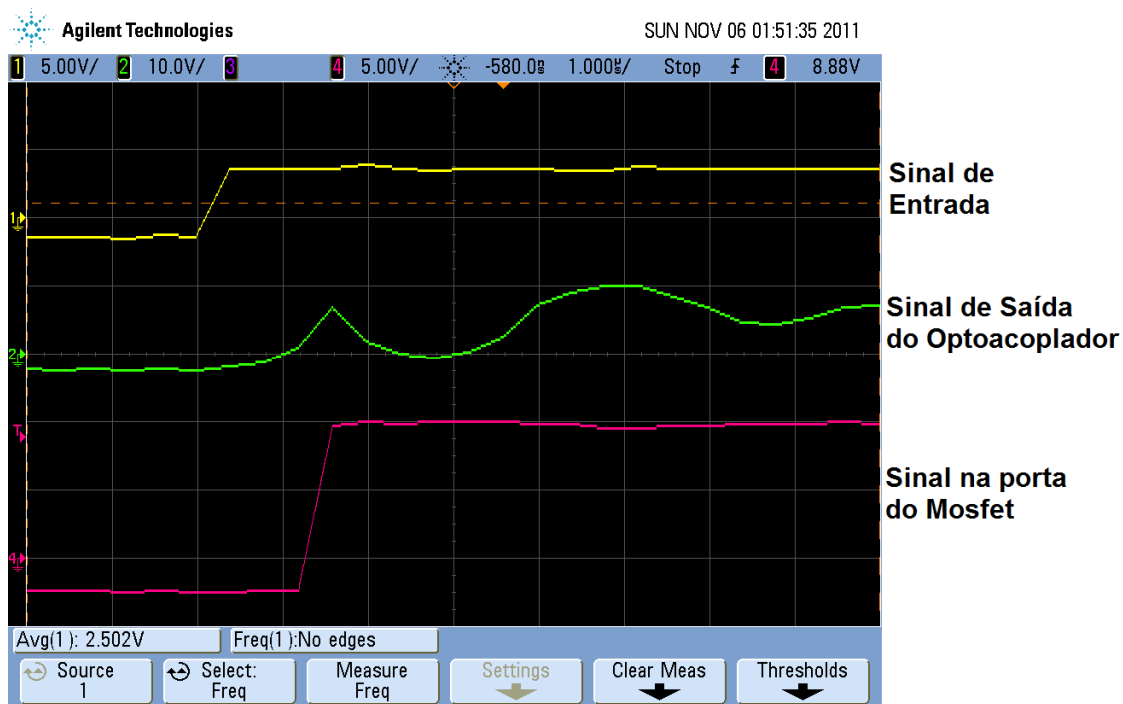


Figura 31 - Atraso no acionamento da porta em relação à excitação

5.2 – Testes do Sistema de Proteção

O segundo ensaio realizado tem por objetivo verificar o funcionamento do sistema de proteção contra sobrecorrente, planejado para 2,5A. Para realizar este teste a chave foi mantida em condução, utilizando como carga um resistor de $6,7\Omega$ de alta potência, aplicando para a alimentação da carga uma fonte regulável de corrente contínua. Mediante a regulação da tensão de alimentação do sistema e por consequência sobre a carga, puramente resistiva, a corrente acompanha o nível de tensão aplicado.

Com este teste é possível também verificar o funcionamento do sensor de corrente ACS712T. Analisando assim, através do osciloscópio o sinal de saída do sensor de corrente enquanto a tensão de entrada da carga é lentamente regulada até se atingir a corrente limite para o corte da condução, acompanhando também a tensão sobre a carga para comparar a resposta do sensor ao valor real. O resultado obtido é mostrado na Figura 32. Atingindo o nível de sobrecorrente a chave deixa de conduzir.

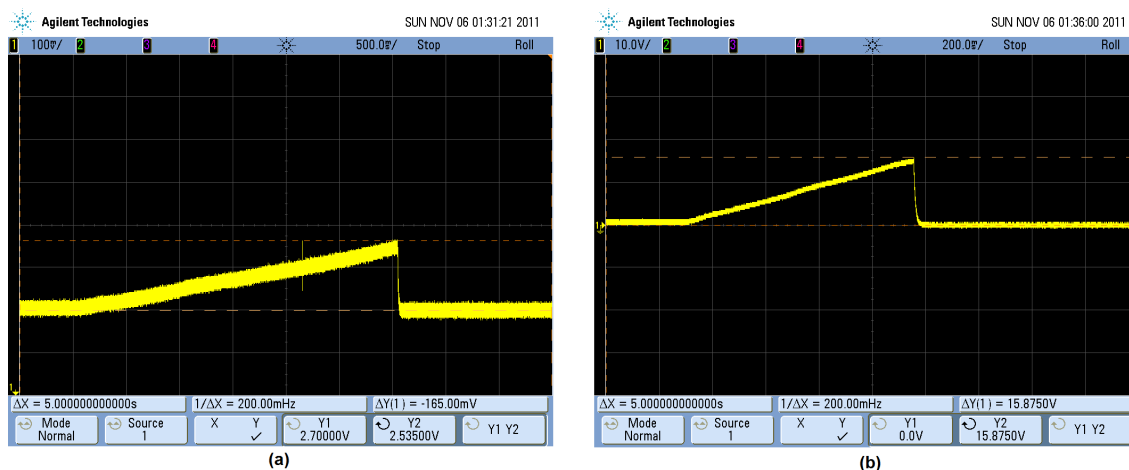


Figura 32 - Análise do comportamento do sistema de proteção contra sobrecorrente; (a) saída do sensor, (b) tensão sobre a carga

Através da análise pelo osciloscópio a tensão de saída do sensor de corrente é de 2,70V no momento do corte, e de 2,535V quando a corrente de carga é zero. O sensor ACS712T tem a resposta para a corrente mensurada, positiva ou negativa, simétrica em relação à metade do valor de tensão de sua alimentação, com relação de 66mV/A, assim para este caso a corrente medida foi de 2,50A $((2700\text{mV}-2535\text{mV}) / 66\text{mV/A} = 2,5\text{A})$. Analisando a tensão sobre o resistor, a tensão máxima é de 15,875V portanto a corrente real sobre o resistor foi de 2,37A. Isto demonstra que há um pequeno erro de leitura, mas aceitável.

É necessário também testar o corte da corrente durante o acionamento do transistor; o comportamento esperado do sistema é de desativar a condução assim que a falha for detectada. Novamente aplicando tensão regulada e uma carga resistiva, e mantendo fixo o sinal de acionamento, a condução deve ser interrompida mesmo enquanto perdure o sinal de entrada, até o sinal ser removido e reativado. O resultado deste teste é mostrado na Figura 33.



Figura 33 - Corte na condução pelo sistema de proteção contra sobrecorrente

Estes testes demonstraram que o sistema de proteção contra sobrecorrente foi capaz de desativar a condução da chave em uma situação de passagem de corrente acima do devido, mesmo enquanto o sistema ainda é requisitado a acionar o transistor. O nível de corrente em que ocorre o corte é um pouco inferior ao planejado, 2,37A contra 2,5A, mas mesmo o nível mais baixo está acima da corrente máxima planejada para o processo de carga, de 2,0A, o que não representa um problema.

5.3 – Sensor de tensão

É necessário testar também o sensor de tensão sobre as baterias, planejado para apresentar a tensão no conector da placa de interface com um fator de multiplicação de 0,01. O teste foi realizado sobre carga com tensão de saída de 17,4V medida com um multímetro sobre a saída. O resultado é mostrado na Figura 34.

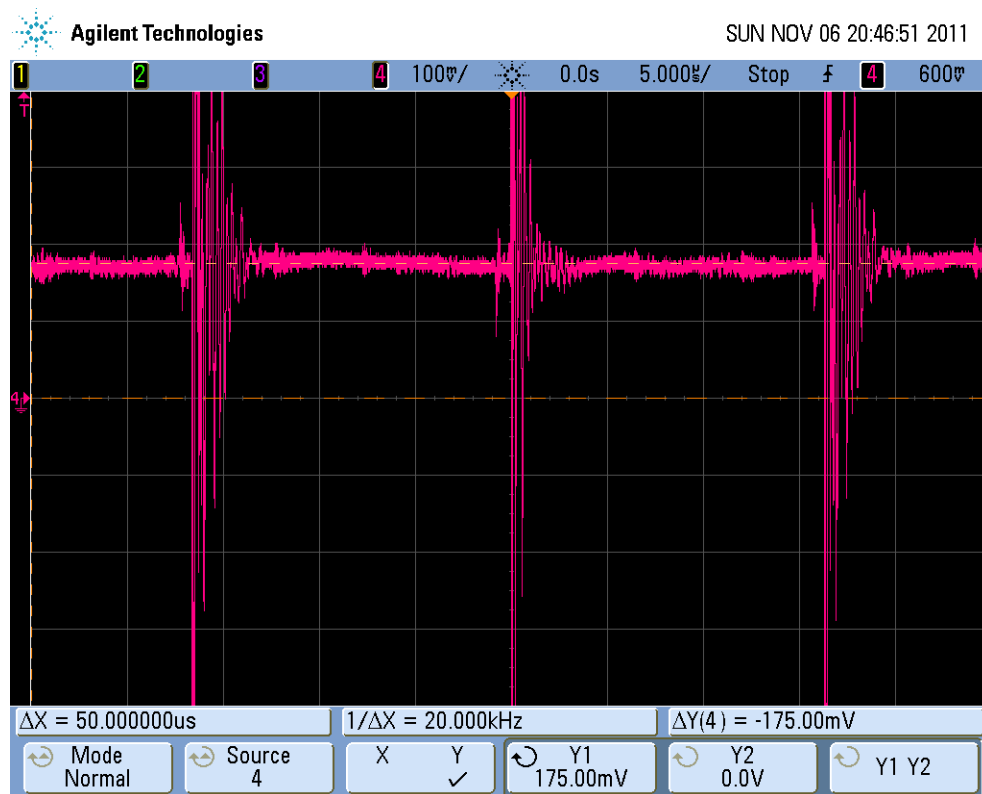


Figura 34 - Sinal de saída do sensor de tensão sobre a carga

O sinal medido foi de 175mV, o que representa 17,5V sobre a carga, a diferença entre o valor medido e o real demonstra um pequeno erro de medida, mas perfeitamente aceitável. É possível visualizar também o erro de medição no momento do chaveamento, o que indica claramente que não se deve fazer a leitura próxima ao momento do chaveamento para evitar medidas equivocadas.

5.4 – Testes com alimentação pela rede elétrica

Com o sistema alimentado pela rede em corrente alternada foram feitos alguns testes a fim de se demonstrar o funcionamento do retificador em onda completa e do conversor *buck* atuando sobre a saída do retificador. Utilizando um *Variac* para reduzir a amplitude do sinal de entrada, e reduzindo a frequência do PWM para melhor demonstrar o funcionamento, utilizando um resistor como carga, os sinais obtidos são mostrados na Figura 35.

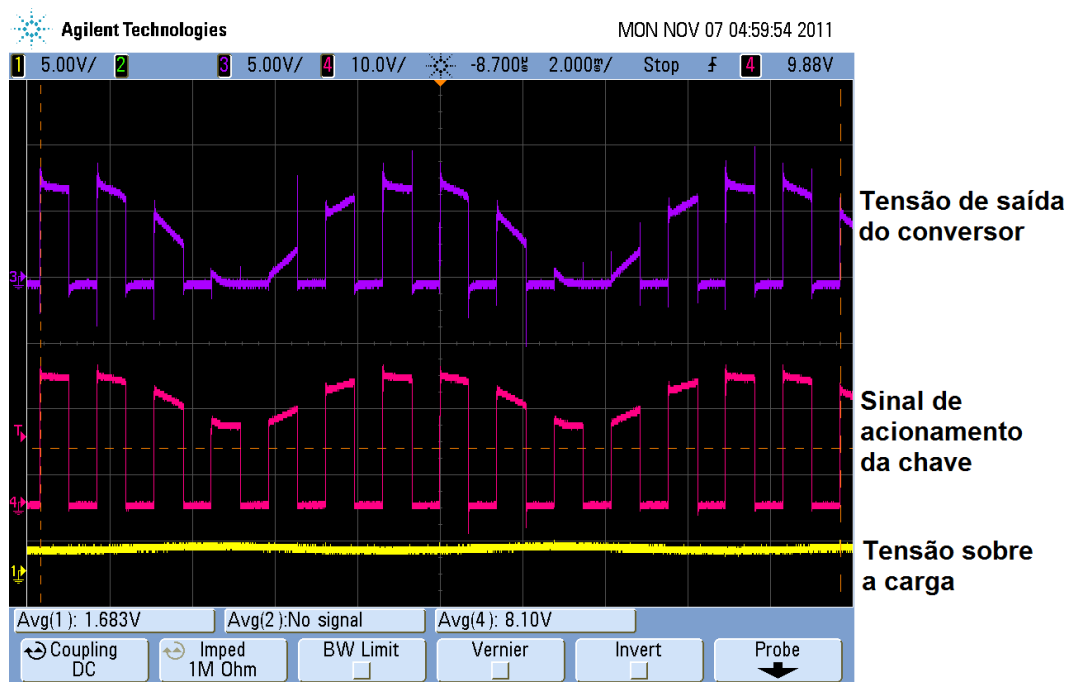


Figura 35 - Conversor atuando sobre corrente alternada, com frequência de chaveamento reduzida.

O mesmo teste foi realizado para a frequência de 20kHz, que é a frequência definida para a atuação do carregador, mostrando o resultado na Figura 36.

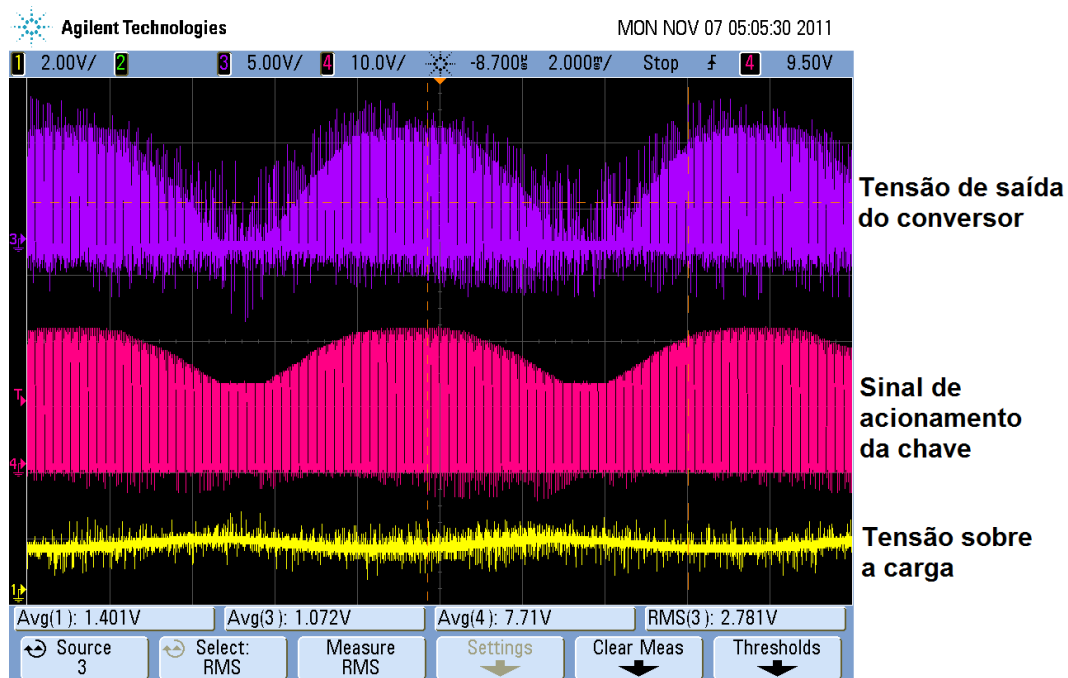


Figura 36 - Conversor atuando sobre corrente alternada, com frequência de chaveamento de 20kHz

É notável que o filtro faz com que a tensão sobre a carga se mantenha constante mesmo com um sinal descontínuo e variável proveniente do conversor.

A Figura 35 em muito se assemelha à Figura 17 obtida através da simulação, o que demonstra que o protótipo está de acordo com o sistema simulado sobre as mesmas condições

Através de todos estes testes foi possível analisar o comportamento do protótipo, e assegurar que estão de acordo com o planejado.

5.5 – Testes de carga

Partindo então para os testes utilizando de fato uma bateria como carga, no intuito de carregá-la para testar a funcionalidade do sistema como um todo, a primeira fase consiste de ajustar o software para carregar uma bateria apenas, e verificar então o comportamento do protótipo para esta condição.

Na Figura 37 é mostrada uma foto da montagem do sistema em laboratório para a carga de uma bateria pequena, ajustando o limite máximo de corrente de carga em 1,0A.

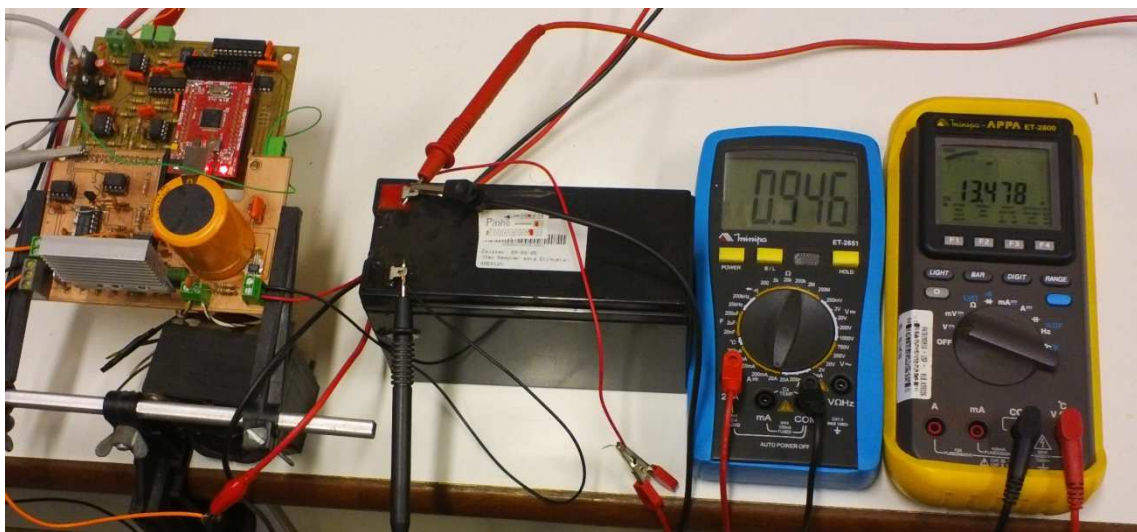


Figura 37 - Protótipo montado em laboratório carregando uma bateria

No momento da foto exibida na Figura 37 o processo de carga se encontra no estágio de carga rápida, com o sistema mantendo a corrente de 1,0A sobre a bateria, até que esta atinja o valor de tensão de equalização. Os valores lidos foram de 0,946A de corrente e 13,478V de tensão sobre a bateria. A análise através do osciloscópio dos sinais que são lidos pelo microcontrolador é mostrada na Figura 38.

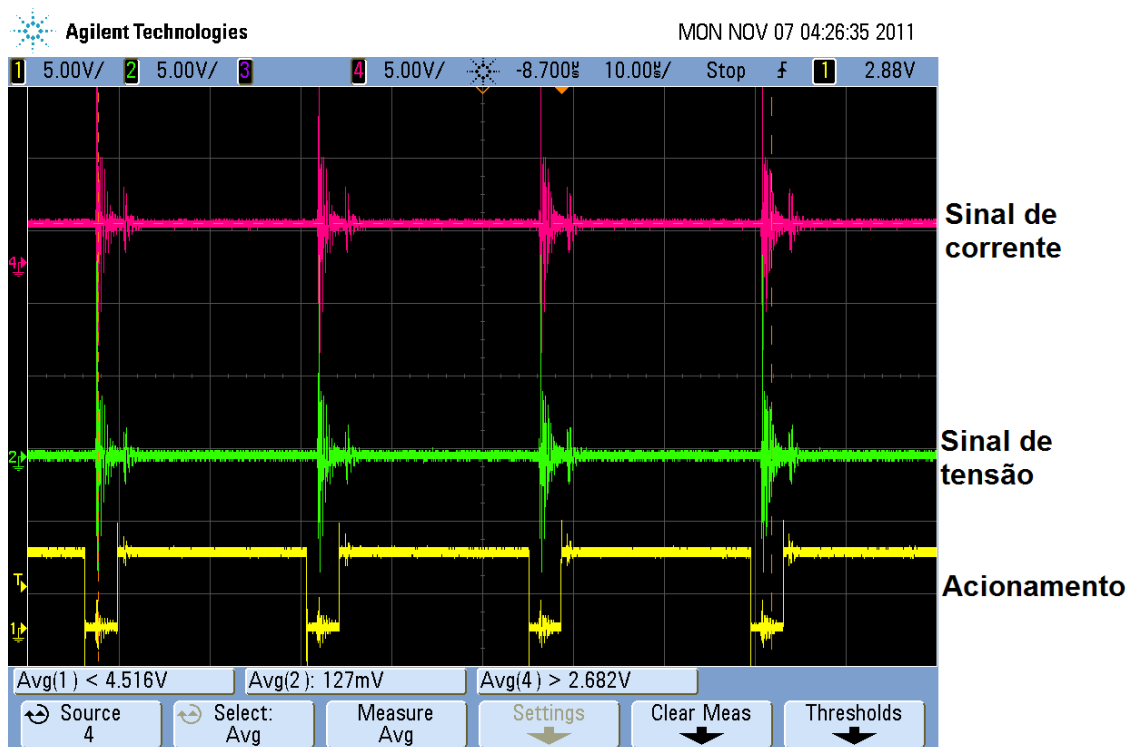


Figura 38 - Sinais na interface com o microcontrolador

Descrevendo sucintamente o processo de carga, o estado inicial da bateria necessitava do estágio de pré-carga e o protótipo efetuou corretamente esta fase, mantendo a corrente em 200mA até a bateria atingir a tensão mínima para a carga rápida.

Durante o processo de carga rápida a corrente se manteve próxima a 1,0A, conforme planejado, até se atingir a tensão de equalização, 14,4V, passando então para o estágio de equalização, onde a tensão se manteve constante enquanto a corrente diminuiu lentamente até a corrente mínima de 50mA, encerrando o processo de carga e partindo para o estágio de flutuação, mantendo a tensão constante de 13,2V sobre a bateria.

Através do teste de carga de uma bateria é possível comprovar o funcionamento do sistema; o protótipo é capaz de regular a saída de corrente a fim de se obter um nível fixo, ou então de manter um nível fixo de tensão na saída enquanto monitora o nível de corrente.

5.6 - Eficiência

A eficiência do sistema é obtida por meio da simulação do circuito final, o circuito utilizado para a simulação é apresentado na Figura 39, no circuito foram

consideradas as resistências parasitas dos elementos, por exemplo a resistência do enrolamento do indutor.

Calculando a eficiência para diversos patamares de corrente de saída do conversor é possível construir um gráfico com a curva de eficiência para toda a faixa de operação durante o processo de carga, de uma e seis baterias.

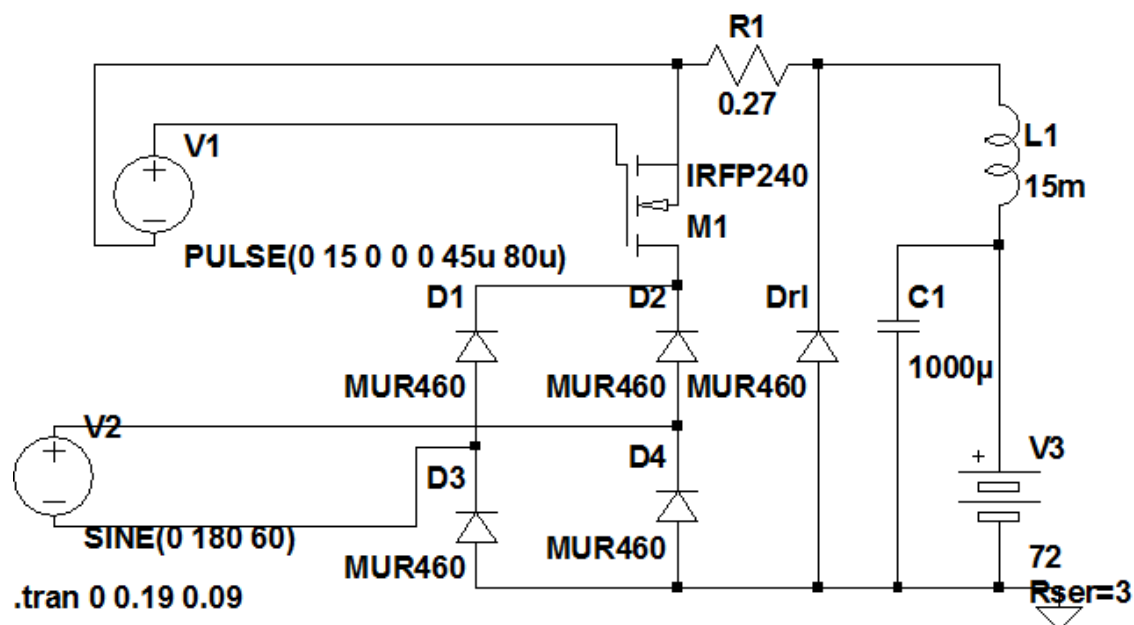


Figura 39 – Circuito para Simulação do Sistema Final

Os valores obtidos na simulação do processo de carga de um banco com 6 baterias são mostrados na Tabela 2, com os quais é construída a curva de eficiência da Figura 40.

Tabela 2 – Simulação de Carga com 6 Baterias para Cálculo de Eficiência

Duty Cycle (%)	Corrente média (A)	Potência de Saída (W)	Potência de Entrada (W)	Eficiência (%)
56,25	2,40	192,57	204,13	94,34
55,00	2,23	177,93	188,24	94,52
53,75	2,07	163,70	172,87	94,70
52,50	1,90	149,89	157,99	94,87
51,25	1,75	136,53	143,62	95,06
50,00	1,59	123,61	129,77	95,25
48,75	1,39	107,20	112,24	95,51
47,50	1,20	91,64	95,68	95,78
45,00	0,84	63,25	65,67	96,31
42,50	0,52	39,04	40,31	96,85
40,00	0,27	19,95	20,49	97,36
37,50	0,10	7,40	7,60	97,37

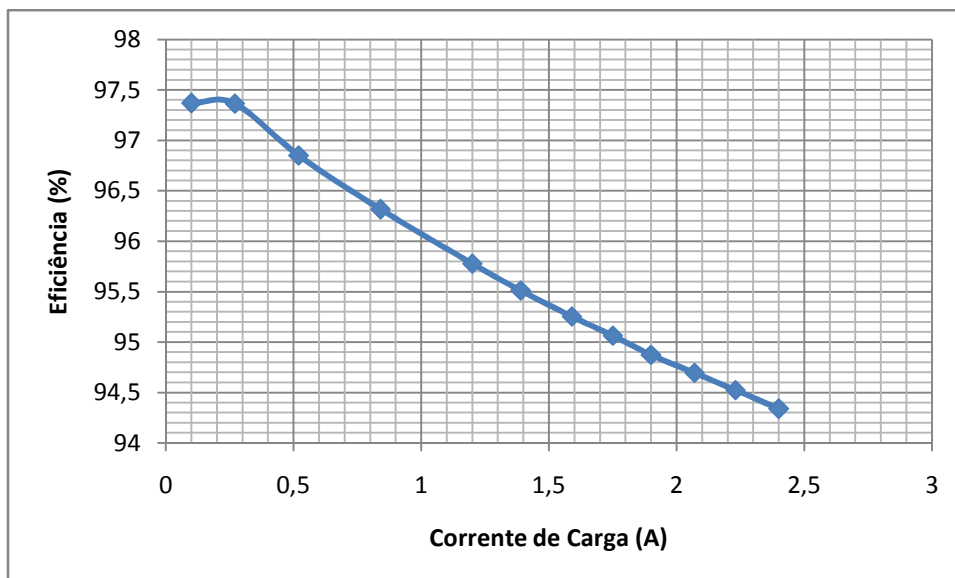


Figura 40 – Curva de Eficiência com 6 Baterias

Da mesma forma o circuito é simulado para o processo de carga de apenas uma bateria, apresentando os valores obtidos na Tabela 3 e a curva de eficiência na Figura 41.

Tabela 3 – Simulação de Carga com uma Bateria para Cálculo de Eficiência

<i>Duty Cycle (%)</i>	Corrente média (A)	Potência de Saída (W)	Potência de Entrada (W)	Eficiência (%)
11,79	2,49	33,23	39,18	84,81
11,69	2,37	31,42	36,92	85,10
11,56	2,21	29,17	34,14	85,44
11,44	2,05	26,95	31,41	85,80
11,31	1,89	24,77	28,74	86,19
11,06	1,59	20,49	23,59	86,86
10,81	1,28	16,40	18,73	87,56
10,56	1,00	12,66	14,36	88,16
10,31	0,82	10,37	11,71	88,56
9,81	0,67	8,38	9,42	88,96
9,31	0,53	6,63	7,41	89,47
8,81	0,41	5,07	5,64	89,89
8,31	0,30	3,70	4,10	90,24
7,81	0,20	2,52	2,79	90,32
7,31	0,13	1,57	1,74	90,23

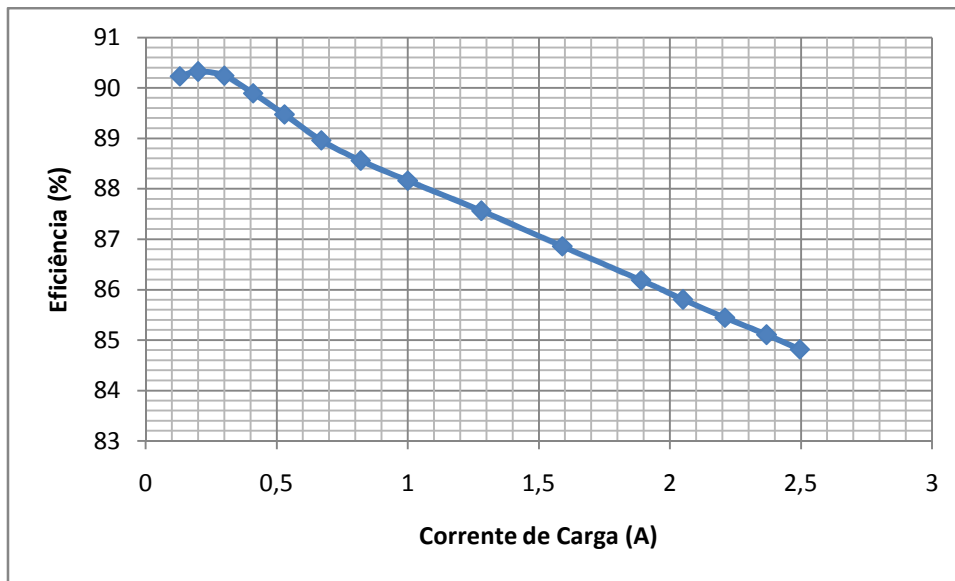


Figura 41 – Curva de Eficiência com Uma Bateria

6 – Conclusão

O conhecimento das características de funcionamento e do comportamento das baterias durante o processo de carga, dos patamares de tensão e corrente envolvidos é essencial para projetar um sistema capaz de atender as necessidades do processo de carga. Com o estudo aprofundado das baterias foi possível estabelecer as diretrizes para se criar um sistema para carregar as baterias do tipo chumbo-ácido, e também o método de carga a ser aplicado.

Definida a necessidade de um sistema com saída em corrente contínua com nível de tensão regulável, sendo a alimentação do circuito a rede elétrica em corrente alternada, a solução para o conversor foi encontrada aplicando as técnicas da eletrônica de potência, dos estudos sobre os circuitos conversores CA-CC e CC-CC para aumentar a eficiência do carregador.

Através de um arranjo com um retificador em onda completa e um conversor *buck*, cujo funcionamento foi demonstrado através de simulações e também na prática com o protótipo desenvolvido, aplicando ainda um filtro na saída para conformar o sinal, é possível atender às necessidades do carregador, sendo necessário o desenvolvimento de um sistema de controle para gerenciar o processo de carga.

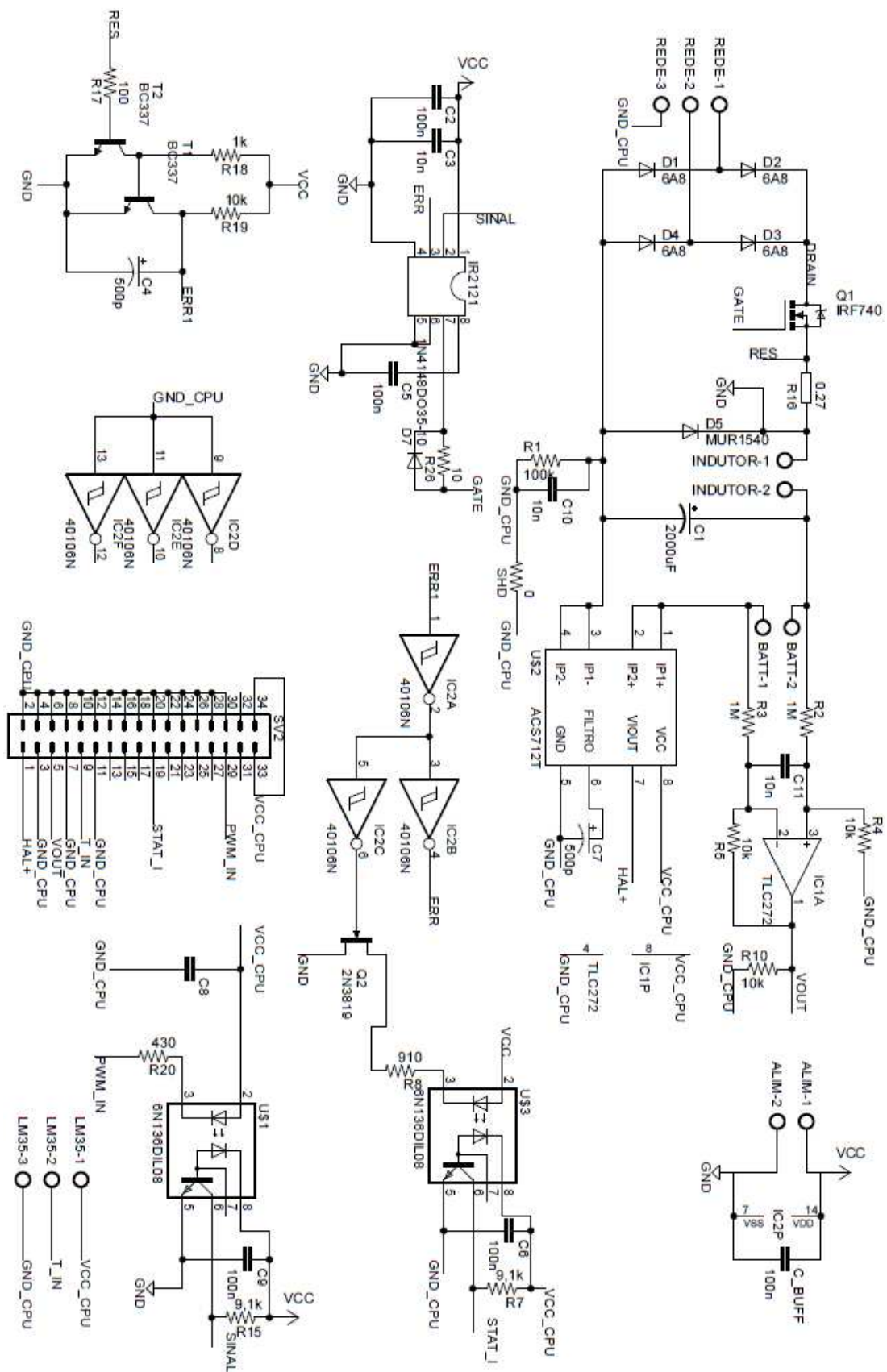
O sistema de controle foi desenvolvido utilizando um microcontrolador da família ARM Cortex-M3, ligado ao sistema através de uma placa de interface desenvolvida no laboratório, que executa o software desenvolvido interagindo com os sinais de entrada.

O protótipo construído foi capaz de atender às premissas do projeto, efetuando corretamente o processo de carga. As simulações mostraram que o projeto é capaz de operar com baixas perdas, tendo a eficiência mínima em 85% para o processo de carga de apenas uma bateria, e eficiência maior que 94% para o processo de carga de um banco de seis baterias.

Bibliografia

1. LINDEN, D.; REDDY, T. B. **Handbook of Batteries**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
2. MAMMANO, B. **Portable Power - A Designer's Guide to Battery Managment**. Texas Instruments Incorporated. Dallas, Texas. 2001.
3. JUNIOR, E. M. S. **Sistema Fotovoltáico para Iluminação Pública em Horário de Ponta**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2004.
4. KIEHNE, H. A. **Battery Technology Handbook**. 2. ed. Breckerfeld, Germany: Marcel Dekker, Inc, 2003.
5. LAZZARIN, T. B. **Estudo e Implementação de um Carregador de Baterias com uma Técnica de Avaliação de sua Vida Útil**. Universidade federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2006.
6. ACUMULADORES MOURA S.A. **Manual Técnico**. Moura Clean Baterias Estacionarias. Jabotão dos Guararapes, PE.
7. UNITRODE CORPORATION. **U-510 Using the bq2031 to Charge Lead-Acid Batteries**. Texas Instruments Incorporated. Dallas. 1999.
8. RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Makron Books Ltda., 1999.
9. YIU, J. **The Definitive Guide to the ARM Cortex-M3**. 2. ed. Kidlington, Oxford: Newnes, 2010.
10. INTERNATIONAL RECTIFIER. **IR2121 Current limiting Low Side Driver**. IR. El Segundo, Kansas, p. 15. 2003.
11. COELHO, K. D. **Estudo de uma fonte ininterrupta de corrente contínua de baixa potência gerenciada por um microcontrolador**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2001.
12. POMILIO, J. A. **Eletrônica de Potência**. 1. ed. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002.

Apêndice A – Projeto do Protótipo



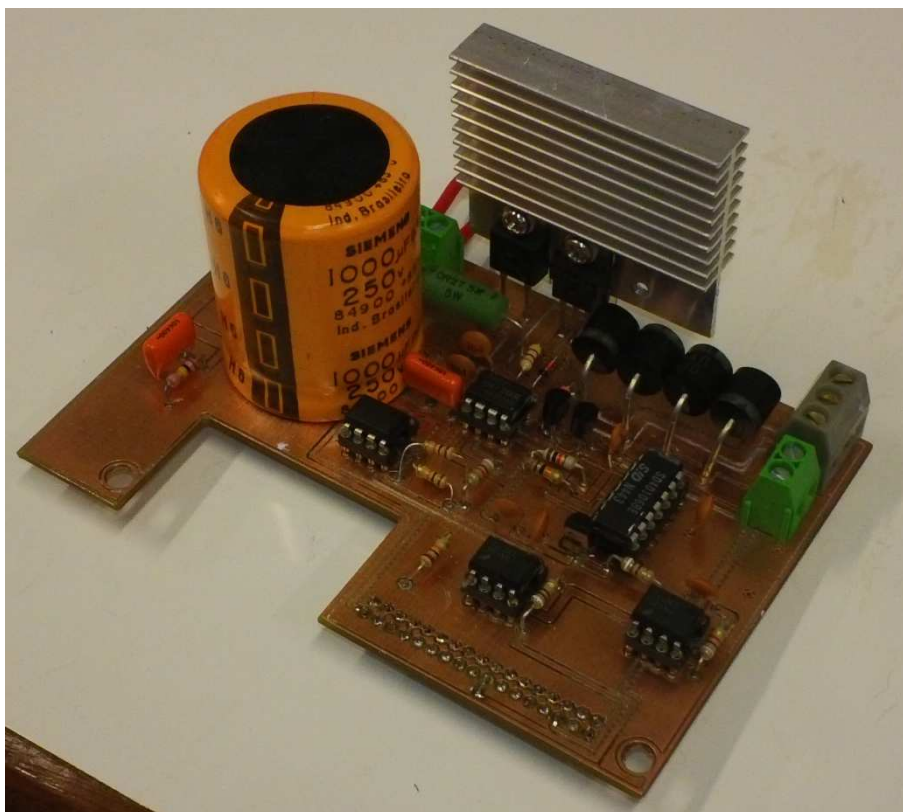


Foto do protótipo desenvolvido

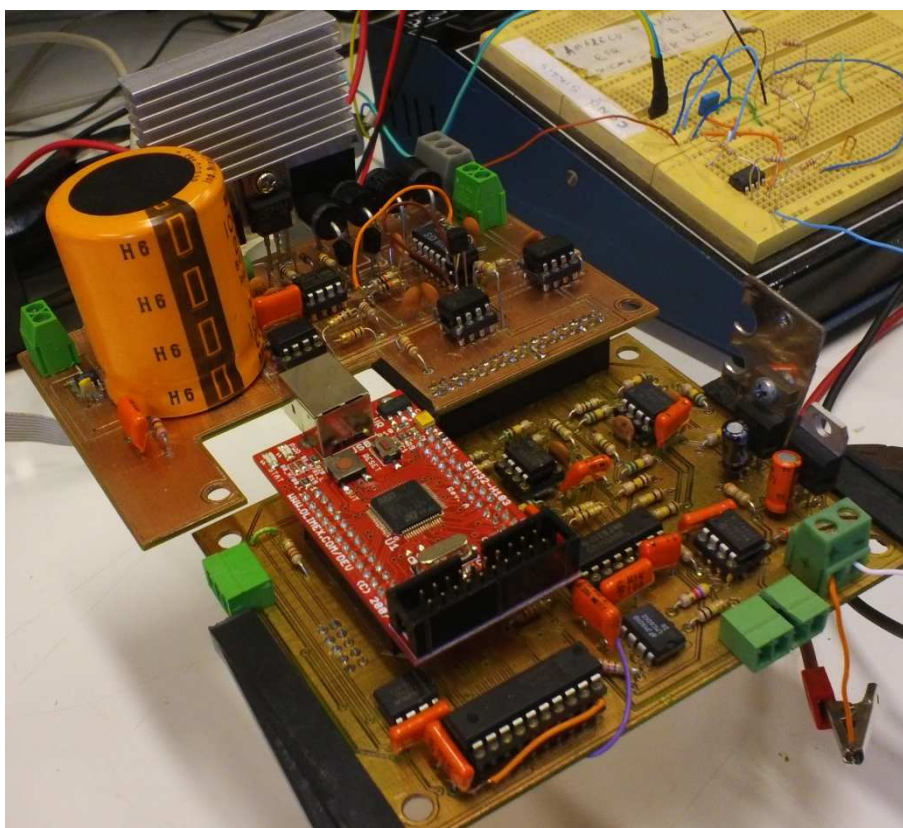


Foto do protótipo acoplado à placa de interface

Apêndice B – Placa de interface

