

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
WESLEY DE SOUZA MOTTA

CIRCUITO DE POTÊNCIA PARA CARGA DE CAPACITORES E ACIONAMENTO
DE SOLENOIDES PARA SISTEMA DE CHUTE EM FUTEBOL DE ROBÔS

São Paulo
2019

WESLEY DE SOUZA MOTTA

CIRCUITO DE POTÊNCIA PARA CARGA DE CAPACITORES E ACIONAMENTO
DE SOLENOIDES PARA SISTEMA DE CHUTE EM FUTEBOL DE ROBÔS

Relatório Final de Iniciação Científica
apresentado ao Centro Universitário FEI,
como parte dos requisitos para obtenção
de bolsa do Programa PIBIC-FEI.
Orientado pelo Prof. Dr. Flavio
Tonidandel

São Paulo

2019

RESUMO

Este projeto busca implementar um circuito de potência para carregamento de capacitores. Esses capacitores são descarregados em uma bobina que acionam um êmbolo, ou seja, um solenóide.

O solenóide possui uma lingueta que atinge uma bola realizando um chute, este dispositivo é aplicado nos robôs da categoria SSL, *Small Size League*, que faz parte da RoboCup, onde a equipe RoboFEI participa ativamente.

Os robôs utilizados nessa categoria são autônomos e utilizam baterias como fonte de alimentação, assim sendo indispensável a implantação de uma topologia com a finalidade de elevar os valores de tensão para serem usados no solenóide. A definição deste circuito é um dos quesitos chave que irá acarretar em um melhor rendimento, onde será medido pela relação entre a maior força aplicada e a corrente consumida.

Ao elevar a tensão é obtido um alto nível de corrente, além de gerar ruídos. Com base nisso este tipo de circuito necessita estar em um módulo separado e acoplado, protegendo o circuito de controle. A placa principal é responsável pelo controle dos robôs, para isso recebe as instruções via rádio e a partir dos comandos aciona seus periféricos. O circuito de carregamento desse projeto poder ser generalizado para várias aplicações, porém é indispensável desenvolver um sistema de controle específico para receber e trabalhar em cima dos comandos já utilizados pela placa principal. Assim o RoboFEI possui necessidades a serem atendidas como o número de solenóides, variação no tempo de acionamento e acionamento simultâneo. Todas as particularidades resultando em um circuito específico para a equipe.

Palavras-chave: RoboCup. Small Size League. Kick Board. Circuito de potência. Conversão DC-DC. Solenoide.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Small Size League	9
Figura 2 - Solenoide comum	9
Figura 3 - Modelo chute direcional	10
Figura 4 - Circuito Boost	11
Figura 5 - Circuito Flyback	11
Figura 6 – Circuito Charge-Pump	12
Figura 7- Proteção DRC	13
Figura 8 - Placa em modelo 3D	15
Figura 9 – Circuito experimental boost	18
Figura 10 – Montagem boost	18
Figura 11- Vd Mosfet boost	19
Figura 12 - Vcap e Vin boost	19
Figura 13 - Vcap simulação boost	20
Figura 14- Circuito simulado boost	20
Figura 15 - Vd Mosfet Simulação boost	21
Figura 17 – Circuito experimental flyback	22
Figura 16 – Montagem flyback	22
Figura 18 - Vcap e Vin flyback	23
Figura 19 – Vd e Vg Mosfet flyback	23
Figura 20 - Circuito simulado flyback	24
Figura 21 - Vcap simulação flyback	24
Figura 22 - Vd Mosfet Simulação flyback	25
Figura 23- Análise da corrente de disparo	29
Figura 24 - Circuito esquemático	29
Figura 25 - Configuração das camadas da PCB	30
Figura 26 - Trilhas do prototipo	31
Figura 27- Visão 3D do protótipo	31
Figura 28 - Novo Esquemático	32
Figura 29 - Novo Layout	33
Figura 30 - Orçamento	34
Figura 31 - PCB Soldada	35
Figura 32- PCB Produzida	35

Figura 33 - Tensão de chaveamento prototipo	36
Figura 34 - Tempo de carga prototipo	36
Figura 35 - Lógica de controle	37
Figura 36 - Código VHDL	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cálculo da largura de trilha.....	14
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 OBJETIVO	7
1.2 JUSTIFICATIVA	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 ROBOCUP	8
2.1.1 Small Size League	8
2.2 SOLENOIDE.....	9
2.3 CHUTE DIRECIONAL	10
2.4 CONVERSORES DC-DC.....	10
2.4.1 Topologia Boost.....	10
2.4.2 Topologia Flyback	11
2.4.3 Topologia Charge-Pump	12
2.4.4 Topologias Mistas	12
2.5 SNUBBER.....	12
2.5.1 Proteção RC	13
2.5.2 Proteção DRC	13
2.6 IPC-2221.....	13
2.7 LTSPICE	14
3 PLACA DE CHUTE.....	15
3.1 PROJETO ATUAL.....	15
3.2 PROBLEMAS ENFRENTADOS	16
4 DESENVOLVIMENTO.....	17
4.1 AQUISIÇÃO BOOST	17
4.1.1 Levantamento experimental	18
4.1.2 Levantamento simulado	20

4.2 AQUISIÇÃO FLYBACK.....	21
4.2.1 Levantamento experimental	22
4.2.2 Levantamento simulado	24
4.3 ANÁLISE.....	25
4.4 CIRCUITO ESQUEMÁTICO.....	26
4.4.1 CI Flyback.....	26
4.4.2 Transformador 750032051.....	26
4.4.3 Dimensionamento LT3751.....	26
4.4.4 Sinais de controle	28
4.4.5 Disparo dos solenoides.....	28
4.4.6 Circuito elaborado	29
4.5 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	30
4.5.1 Características da PCB	30
4.5.1 Design do protótipo	30
5 FINALIZAÇÃO.....	32
5.1 ALTERAÇÕES	32
5.1.1 Esquemático	32
5.1.2 Layout PCB.....	33
5.2 CUSTO.....	33
5.3 SOLDAGEM E MEDIDAS	35
5.3.1 Soldagem.....	35
5.3.2 Medições	36
5.4 SOFTWARE.....	37
6 METODOLOGIA.....	39
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
8 BIBLIOGRAFIA	41

1 INTRODUÇÃO

A RoboCup, através de competições, busca estimular o desenvolvimento da robótica e inteligência artificial, para isso frequentemente ocorrem atualizações nas regras, essas incrementam a complexidade da competição, conseqüentemente gerando uma evolução em todas as equipes que participam do cenário competitivo (ROBOCUP, 2016). Essas competições movem várias instituições por todo o mundo onde seus alunos buscam implementar novas ideias e pesquisas de forma a alcançar o desenvolvimento contínuo de seus robôs assim alcançando uma boa colocação.

A equipe RoboFEI tornou-se referência no cenário Latino-Americano e busca uma ascensão no âmbito mundial, para isso são necessárias grandes evoluções em todas as áreas, sendo a eletrônica uma das primordiais. Os circuitos utilizados atualmente foram projetados em 2010, passando por várias versões de ajustes e melhorias ao longo desses anos, a equipe está chegando a um limite em sua evolução (ROBOFEI, 2010).

Para o acionamento do solenoide é necessário aplicar altos níveis de corrente, assim obtendo um chute significativo. Como os robôs são alimentados por baterias tem-se um valor limite de tensão e corrente que podem ser drenados (HALLIDAY, 2012). Esse problema é contornado com a utilização de circuitos elevadores de tensão em conjunto de capacitores. Com o armazenamento de energia obtêm-se uma alta corrente quando descarregados em um curto período. Existem diversas topologias para esse objetivo, assim a escolha e adaptação desse circuito se torna um dos principais pontos a serem estudados.

O projeto pretende utilizar dois sistemas de chutes. O chute alto é ativado com um solenoide independente e o chute reto é acionando através de um conjunto de dois solenoides onde deve ser possível aplicar um atraso entre eles caso necessário (BRAGA, 2017). O controle é realizado por uma placa principal que através de um acoplamento envia um pulso indicando o momento em que os capacitores devem ser descarregados e quais solenoides serão acionados (GUALTER, 2013). Outra necessidade é um mecanismo para descarga dos capacitores que deve ser ativado quando a placa principal não estiver ligada, assim tornando as manutenções do sistema mais seguras.

A partir desses levantamentos, será estudado e desenvolvido uma nova placa de chute, levando em consideração as tecnologias mais usadas pelas equipes que são referência nas competições da RoboCup.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como propósito desenvolver um circuito (placa de chute) para carga de capacitores até altos níveis de tensão e descarga dos mesmos em solenoides. Para isso será realizado uma comparação entre as principais topologias de conversão como Boost, Flyback, Charge-pump e mistas (TOMASZUK, 2011). Ao fim este circuito será implementado para equipe RoboFEI utilizar na categoria *Small Size League*.

1.2 JUSTIFICATIVA

Com o progresso em ascensão dos circuitos integrados alguns componentes do projeto inicial estão obsoletos e saindo de linha, sendo produzidos por poucos fabricantes dificultando a acessibilidade e aumentando o custo das manutenções (SEDRA, 2007).

A partir desses avanços é possível aplicar uma topologia de conversão mais robusta que detenha melhor rendimento, assim aumentando a autonomia das baterias utilizadas pelo RoboFEI. Espera-se proporcionar o fim das excessivas manutenções, pois a placa atual apresenta muitas falhas como trilhas se rompendo, estresse de componentes, conectores frágeis entre outras, que são causadas devidos alguns dimensionamentos não serem de acordo aos níveis de corrente dos circuitos utilizados.

Pesquisas realizadas pelo RoboFEI proporcionaram um novo sistema de chute que requer um solenoide adicional (BRAGA, 2017), porém para sua aplicação é necessário que a placa de chute suporte o solenoide extra. Além dessa adaptação será implementado uma melhora no sistema de controle no momento da descarga, assim possibilitando domínio sobre a velocidade e direção de saída da bola após um chute, permitindo a realizações de passes e cruzamentos mais precisos durante as partidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RoboCup

A ideia de robôs jogando futebol foi mencionada pela primeira vez na história pelo professor Alan Mackworth em um artigo apresentado em 1992, nos anos seguintes vários pesquisadores iniciavam o uso do futebol como desafio para suas pesquisas, principalmente no âmbito computacional. Com essa tendência se disseminando foram criados e publicados simuladores dedicados para jogos de futebol, pouco tempo depois se tornando ferramenta de vários estudos sobre inteligência artificial (ROBOCUP, 2016).

Devido essas movimentações, a RoboCup foi idealizada em 1995 durante a conferência internacional conjunta sobre inteligência artificial, com o intuito de reunir esses esforços em uma competição de robótica. A primeira versão oficial foi realizada em 1997 com mais de 40 equipes entre ligas reais e simuladas (ROBOCUP, 2016).

Atualmente, o cenário competitivo é disputado por instituições de ensino superior de todo o mundo, as partidas são divididas por ligas, onde cada liga tem como foco estimular uma área em específico, sendo elas nomeadas como *RoboCupSoccer*, *RoboCupRescue*, *RoboCup@Home*, *RoboCupIndustrial*, *RoboCupJunior*.

Nutrido seu principal objetivo na busca por promover pesquisas e divulgações para as áreas de robótica e inteligência artificial, anualmente as equipes que desejam participar precisam submeter um documento relatando os avanços realizados pelas mesmas, chamado *Team Description Paper* (TDP) (ROBOCUP, 2016).

2.1.1 Small Size League

É a liga mais antiga da RoboCupSoccer, onde os parâmetros fundamentais estão ligados a cooperação entre os robôs e a alta velocidade em que o jogo ocorre em comparação com as outras ligas. As partidas são realizadas entre equipes utilizando seis ou onze robôs, onde devem se movimentar, trocar passes, realizar defesas e ataques de forma estratégica e em conjunto, todos controlado por meio de programação sendo proibido qualquer influência humana durante o andamento do tempo de jogo (ROBOCUP, 2017).



Figura 1- Small Size League Fonte: (ROBOCUP, 2016)

2.2 SOLENOIDE

O solenoide é composto por um enrolado de espiras de um fio formando uma bobina. Ao ser submetido por uma corrente elétrica esse fio gera um campo magnético, devido a presença de várias espiras a influência de cada uma se soma no interior do solenoide e se neutraliza na parte externa. Somente em seu núcleo é possível obter uma forte presença de campo magnético, onde sua orientação, norte e sul, depende do sentido da corrente em seus terminais (HALLIDAY, 2012).

O êmbolo é a peça responsável por receber a força magnética realizando um deslocamento, nesse projeto o embole é responsável por impulsionar a bola realizando um chute. A utilização de uma mola de retorno é comum na maioria das aplicações, assim o solenoide mantém a sua posição inicial após a ativação, esse sistema é necessário visto que o solenoide tem um único sentido de acionamento (HALLIDAY, 2012).

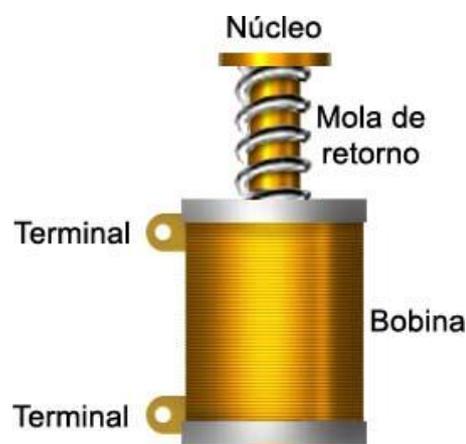


Figura 2 - Solenoide comum Fonte: (INSTITUTO NEWTON C BRAGA, 2016)

2.3 CHUTE DIRECIONAL

O sistema atual de chute é baseado em um único solenoide. Pesquisas anteriores do RoboFEI chegaram a um sistema de chute direcionado em que dois êmbolos são ligados em uma mesma chapa, assim conforme a sequência de ativação e tempo de atraso entre os solenoides é possível controlar o ângulo de saída da bola gerando mais opções de jogadas e maior imprevisibilidade durante as partidas (BRAGA, 2017).

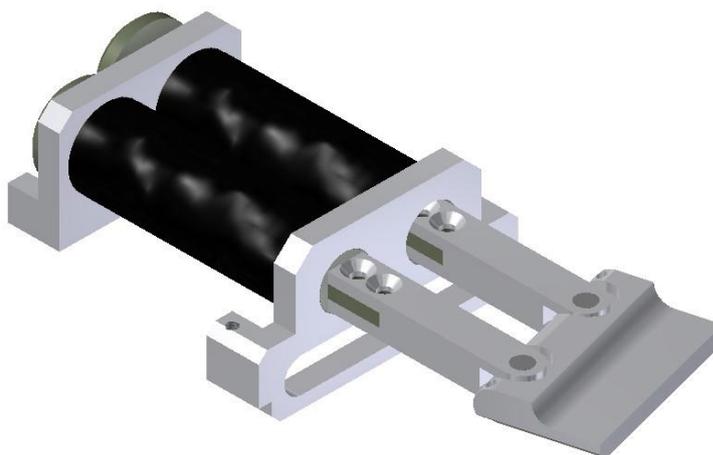


Figura 3 - Modelo chute direcional Fonte: (BRAGA, 2017)

2.4 CONVERSORES DC-DC

Também conhecidos como choppers, são usados para obter uma tensão DC variável através de um chaveamento de alta frequência. Quando combinado com um indutor e/ou capacitor geram uma alteração no valor DC de saída podendo ser aumentado (Step-up) ou reduzido (Step-down) de acordo com a configuração do circuito (AHMED, 2000).

As topologias mais utilizadas que proporcionam um ganho positivo são Boost, Flyback, Charge-Pump e mistas, sendo que as mais comuns entre as equipes de robótica são os circuitos Boost ou Flyback.

2.4.1 Topologia Boost

Boost é um método de conversão que visa a elevação da tensão de saída. Seu circuito fundamental, Figura 4, tem como principal característica o chaveamento de S, onde de acordo com a relação que se tem entre o indutor e a frequência, que a manipulação de S resulta, tem-se uma alteração na saída V_o devido a capacidade do indutor de armazenar energia. Com V_o sempre sendo um valor superior a V_s se S estiver chaveando, assim

alimentando a carga com elevados valores de tensão ao controlar esses procedimentos (AHMED, 2000).

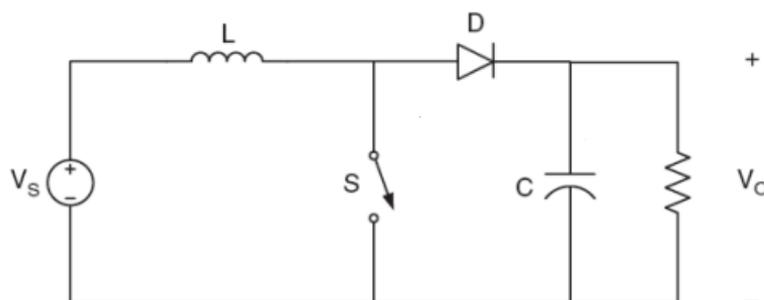


Figura 4 - Circuito Boost Fonte: (AHMED, 2000)

2.4.2 Topologia Flyback

Com o mesmo objetivo do Boost de elevar os valores de tensão, o circuito Flyback tem como característica a utilização de um transformador em meio ao circuito. Onde semelhante ao Boost tem-se um capacitor para armazenar tensão e apesar de um indutor não estar presente nesse circuito o transformador também se comporta como um indutor atrasando e armazenando corrente. O circuito de saída é isolado fisicamente do circuito de entrada devido a ligação do transformador sendo uma vantagem em relação ao circuito ligado no primário estar protegido de possíveis curtos que possam ocorrer no secundário (DINWOODIE, 2016).

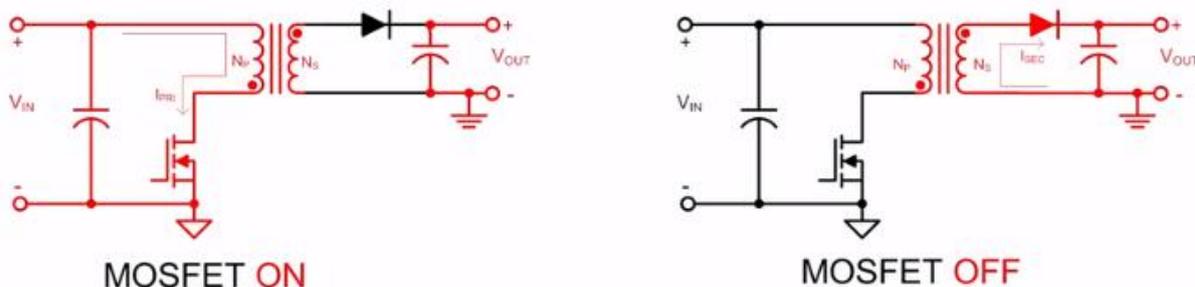


Figura 5 - Circuito Flyback Fonte: (DINWOODIE, 2016)

O funcionamento é baseado no chaveamento do primário, Figura 5. No estado do mosfet ligado tem-se passagem de corrente pelo circuito do primário e armazenamento de energia no enrolamento do transformador. Com o mosfet desligado o circuito do primário se abre e com isso tem-se a passagem de energia do enrolamento do primário para o secundário do transformador resultando em corrente no circuito do secundário,

alimentando o capacitor de saída com altos níveis de tensão ao repetir esse ciclo. (DINWOODIE, 2016).

2.4.3 Topologia Charge-Pump

Esta topologia não necessita de indutores em seu circuito. As chaves S_1 , S_3 possuem o mesmo chaveamento enquanto S_2 , S_4 seguem o inverso de S_1 , S_3 assim esses dois blocos sempre possuem estados alternados. O circuito pode funcionar tanto como um inversor ou como dobrador de tensão. Normalmente é aplicado em conjunto de outros choppers obtendo maiores valores de tensão para as respectivas frequências de chaveamento (MAXIM, 2009).

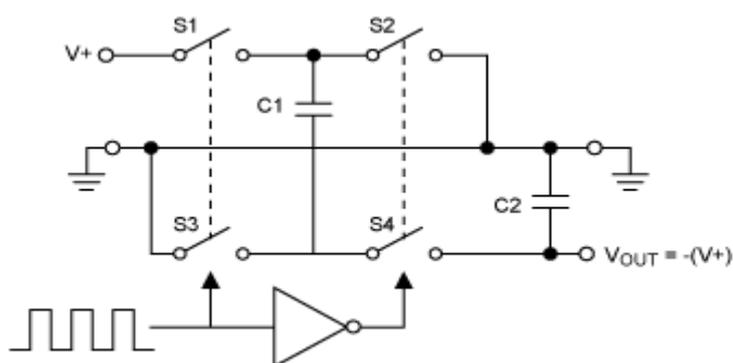


Figura 6 – Circuito Charge-Pump Fonte: (MAXIM, 2009)

2.4.4 Topologias Mistas

A aplicação de topologias mistas é uma opção para aumentar o rendimento dos conversores, onde em um mesmo circuito podem ser utilizadas características do Boost, Flyback, Charge-Pump entre outras. O desenvolvimento desses circuitos implica em muitas complicações devido as ressonâncias e comportamentos que podem aparecer entre a tensão e corrente devido as combinações RCL (TOMASZUK, 2011).

2.5 SNUBBER

Durante o processo de chaveamento realizado para o funcionamento dos choppers surge um aumento na dissipação de potência necessária devido a variação abrupta dos níveis de tensão e corrente sobre o mosfet. Para evitar o desgaste dos componentes são utilizados circuitos snubber que são responsáveis por reduzir os picos de tensão indesejados e oscilações causadas por efeitos parasitas devido a presença de indutores. (DOKIC, 2015).

2.5.1 Proteção RC

Em paralelo ao componente a ser protegido é realizado a montagem de um sistema criticamente amortecido formado por um resistor e um capacitor em série. O capacitor é responsável por absorver os picos de tensões e o resistor por dissipar essa energia em forma de calor. A desvantagem desta topologia é que em ambos os ciclos do chaveamento o filtro está em funcionamento, com isso temos uma perda no desempenho do circuito a ser protegido (TODD, 1993).

2.5.2 Proteção DRC

Com o acréscimo de um diodo ao circuito RC cria-se um segundo caminho para a corrente dependendo do sentido da mesma. Com o chaveamento comutando para o estado aberto temos a corrente do indutor se dividindo e circulando através do circuito do diodo, assim carregando o capacitor. Após a comutação para o estado fechado o capacitor descarrega a energia acumula pelo resistor em forma de calor, dessa forma a relação entre RC deve permitir que a descarga ocorra antes de iniciar um novo período (TODD, 1993).

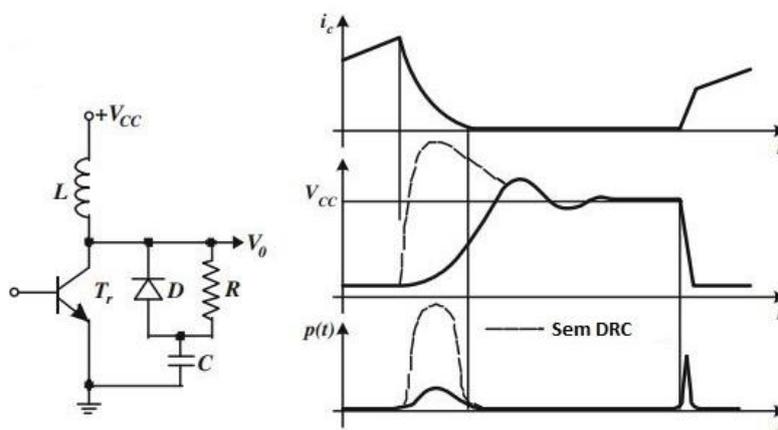


Figura 7- Proteção DRC Fonte: (DOKIC, 2015)

2.6 IPC-2221

Conjunto de normas com o intuito de oferecer informações focadas nos requisitos para manter uma alta qualidade no desenvolvimento de placas de circuito impresso. Os documentos do IPC são divididos de acordo com sua numeração, onde a série 2221 trata de pontos genérico sobre o design das placas e as outras séries 22XX descrevem pontos específicos, como comportamento em alta frequência, cabos, conectores entre outros (IPC, 1998).

Visando garantir a integridade e durabilidade do projeto de PCB que será desenvolvido é necessário que as trilhas de cobre tenham as dimensões mínimas de forma a suportar a corrente que pode circular por cada trecho. Para encontrar esses valores as normas do IPC-2221 fornecem a equação 2.61 que descreve o tamanho das trilhas em função da corrente máxima e variação de temperatura (IPC, 1998).

$$I = k \cdot \Delta T^{0,44} \cdot A^{0,725} \quad \text{Eq. 2.61}$$

Para facilitar a utilização dessa relação durante o desenvolvimento da placa será utilizado a tabela 1 obtida através dos resultados da equação 2.61 para os valores mais comuns de variação de temperatura e área de cobre.

Tabela 1 – Cálculo da largura de trilha

Var. Temp.	10°C			20°C			30°C		
Cobre	1/2oz.	1oz.	2oz.	1/2oz.	1oz.	2oz.	1/2oz.	1oz.	2oz.
Trilha	Máxima corrente (A)								
0,01"	0,5	1,0	1,4	0,6	1,2	1,6	0,7	1,5	2,2
0,015"	0,7	1,2	1,6	0,8	1,3	2,4	1,0	1,6	3,0
0,02"	0,7	1,3	2,1	1,0	1,7	3,0	1,2	2,4	3,6
0,025"	0,9	1,7	2,5	1,2	2,2	3,3	1,5	2,8	4,0
0,03"	1,1	1,9	3,0	1,4	2,5	4,0	1,7	3,2	5,0
0,05"	1,5	2,6	4,0	2,0	3,6	6,0	2,6	4,4	7,3
0,075"	2,0	3,5	5,7	2,8	4,5	7,8	3,5	6,0	10,0
0,1"	2,6	4,2	6,9	3,5	6,0	9,9	4,3	7,5	12,5
0,2"	4,2	7,0	11,5	6,0	10,0	11,0	7,5	13,0	20,5
0,25"	5,0	8,3	12,3	7,2	12,3	20,0	9,0	15,0	24,0

2.7 LTSPICE

Software para simulação de circuitos analógicos baseado no SPICE com o objetivo de apresentar alta performance durante a utilização de modelos baseados nos circuitos integrados desenvolvidos pela própria linear technology (LINEAR TECHNOLOGY, 2019).

2.8 DEMAIS EQUIPES

Entre as equipes referenciadas durante as competições da RoboCup é possível perceber uma tendência de utilizar a topologia flyback. Para o controle do chaveamento usam o circuito integrado LT3751 e com a utilização de um circuito auxiliar para suprir as necessidades do LT3751. Entre as equipes que utilizam essas tecnologias estão presentes a TIGERS (TIGERS, 2017), AIS (AIS, 2017), entre outras.

Mesmo com a utilização de um mesmo chopper, é incomum encontrar parâmetros iguais entre as equipes. Estão presentes solenoides e tensão que costumam ter as mais diversas variações, entre as descrições de várias equipes estudadas foi possível encontrar uma faixa de tensão de 100V até 360V em conjunto de solenoides particulares.

Assim concluindo que os parâmetros são particulares às necessidades atuais de cada equipe, não sendo possível encontrar uma tendência. Tendo em mente que um projeto novo deve ser planejado de forma a obter uma placa que crie o maior potencial de mudança e evolução para as estruturas do projeto, como mecanismos de chute e solenoides utilizados, não se limitando a atender os dispostos atualmente pela equipe RoboFEI.

3 PLACA DE CHUTE

3.1 PROJETO ATUAL

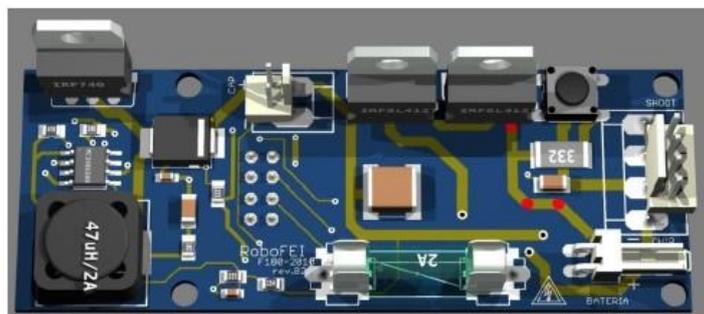


Figura 8 - Placa em modelo 3D Fonte: (RoboFEI, 2010)

O objetivo da placa de chute é carregar os capacitores para um elevado valor de tensão, por volta de 160 V, até que a estratégia envie um comando, assim realizando a descarga completa ou parcial dos mesmos para o acionamento dos solenoides. Por se tratar de um circuito de alta potência, utiliza-se essa placa auxiliar opto-acoplada na placa principal mantendo o circuito de controle isolado (ROBOFEI, 2010).

Atualmente, a equipe trabalha com a topologia Boost como método de carregamento, energizando dois capacitores ligados em paralelo resultando em uma capacitância equivalente de 5400 uF. A carga acumulada é liberada através do MOSFET de ativação TC427, acionando as bobinas que movimentaram o embolo para realizar o chute. Nessa configuração a recarga completa do conjunto de capacitores, após um chute, é efetuada em aproximadamente dez segundos, tempo que se torna crítico durante as partidas (ROBOFEI, 2010).

3.2 PROBLEMAS ENFRENTADOS

Com o objetivo de obter uma placa de chute que ocupasse o menor espaço possível do robô, algumas trilhas que passam próximas das bordas da placa utilizam larguras menores do que o necessário. Assim durante a carga e descarga dos capacitores é comum que essas trilhas comecem a romper devido ao estresse causado pelos altos valores de corrente. Esses rompimentos além de danificarem componentes no momento que acontecem, costumam exigir uma ligação através de cabos para compensar as trilhas perdidas ou muitas vezes resultam na inutilização de uma placa.

Durante a operação, o circuito mantém o capacitor sempre carregado, porém após ser desligado o mesmo não conta com um sistema para drenar a energia armazenada, deste modo ao desmontar e retirar a placa os conectores continuam energizados pelos capacitores, gerando riscos de choque.

Ambos os conectores de duas vias utilizados na placa, Figura 7, não possuem uma trava que impeça que a ligação seja feita ao contrário do necessário para o circuito, assim sendo possível que por alguma desatenção a bateria ou capacitor sejam ligados com a polaridade invertida causando danos na maioria dos componentes e trilhas do circuito.

Para interromper o funcionamento da placa é necessário retirar o conector da bateria, pois não possui um sistema ou botão para cortar a alimentação, dificultando a utilização da mesma.

4 DESENVOLVIMENTO

Inicialmente será descrito o processo de testes realizado sobre cada conversor com o intuito de verificar os princípios de funcionamento, a adequação com o circuito a ser desenvolvido, além das vantagens e desvantagens.

Para validar os valores e ondas obtidos experimentalmente, serão comparados com simulações realizadas através do LTspice. Os resultados obtidos serão aplicados na construção do circuito esquemático do projeto.

4.1 AQUISIÇÃO BOOST

Para verificar o desempenho do circuito foi utilizado a tensão de entrada de 12V, um gerador de função fornecendo uma onda quadrada de 6V com offset de 3V, duty cycle de 50% e 200Khz. Uma resistência de saída de 15 Ohm foi considerada como a máxima, assim sendo utilizado nos cálculos dos valores mínimos de capacitância e indutância, como a única resistência de saída são as resistências geradas devido os filamentos que não ultrapassam a ordem de grandeza de unidades de ohms esse valor arbitrário não será um problema para o dimensionamento.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad \text{Eq. 4.11}$$

$$V_o = \frac{12}{1-0,5} \rightarrow V_o = 24V$$

Cálculo da indutância para manter modo de condução contínua (MCC):

$$L > L_b$$

$$L_b = \frac{(1-D)^2 DR}{2F} \quad \text{Eq. 4.12}$$

$$L_b = \frac{(1-0,5)^2 \cdot 0,5 \cdot 15}{2 \cdot 200K} \rightarrow L_b = 4,6\mu H$$

Indutância utilizada de 47uH devido disponibilidade. A capacitância mínima para manter o MCC não será calculada, pois é necessário somente nos circuitos de regulação onde buscam um V_o fixo. Devido objetivo ser um circuito para elevadas cargas de capacitância não é necessário se preocupar com valores mínimos.

4.1.1 Levantamento experimental

Na figura 9 é apresentado o circuito utilizado durante os testes de bancada, os capacitores C1 e C2 foram adicionados para eliminar ruídos que possam surgir em V1. Os componentes D1 e C3 são próprios para altas frequências e tensões superiores a 250V.

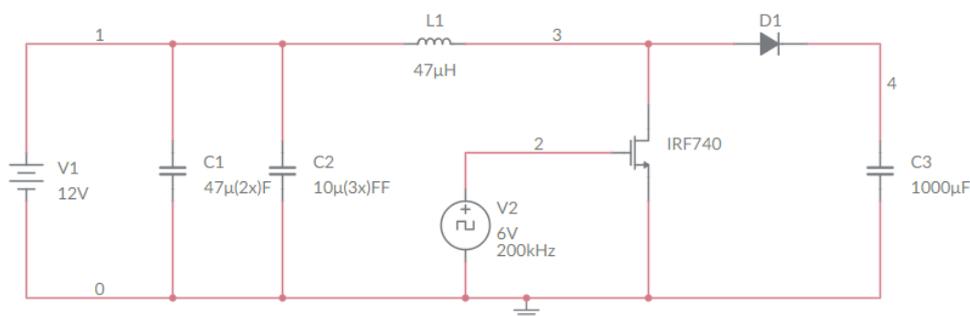


Figura 9 – Circuito experimental boost Fonte: (Autor)

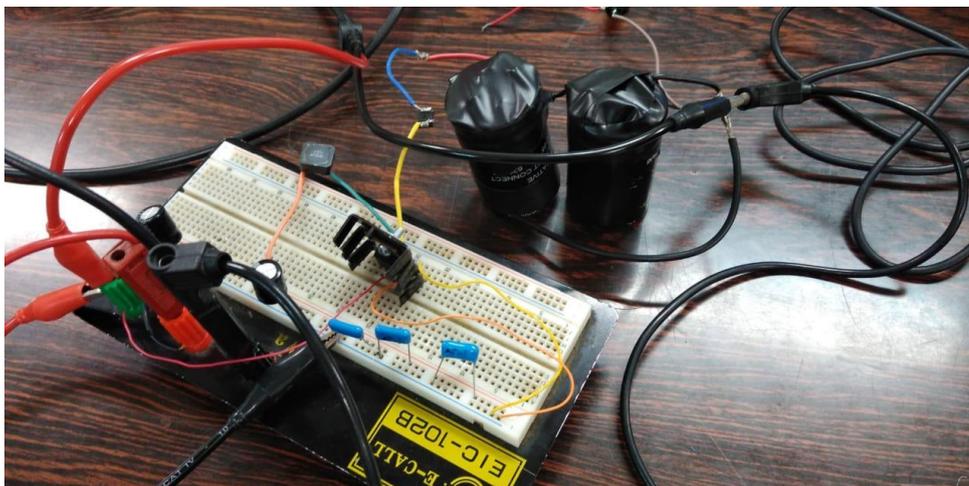


Figura 10 – Montagem boost Fonte: (Autor)

Analisando a figura 11 temos no canal 1 a tensão em cima do capacitor de saída C3 e no canal 2 a tensão na fonte de entrada V1. O chaveamento utilizado de 200KHz foi que resultou no menor tempo de carregamento, onde a saída variou de 0V até 160V em aproximadamente 4,5 segundos. A tensão de entrada apresentou alguns ruídos significativos na ordem de $\pm 5V$ durante o carregamento.

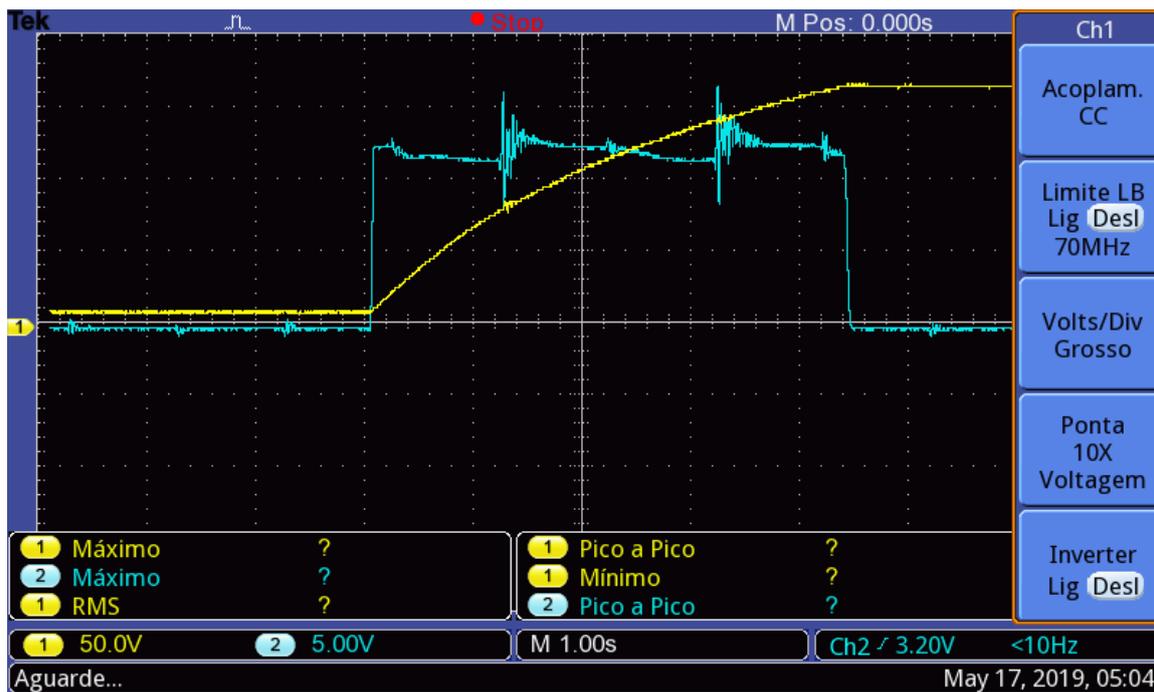


Figura 12 - V_{cap} e V_{in} boost Fonte: (Autor)

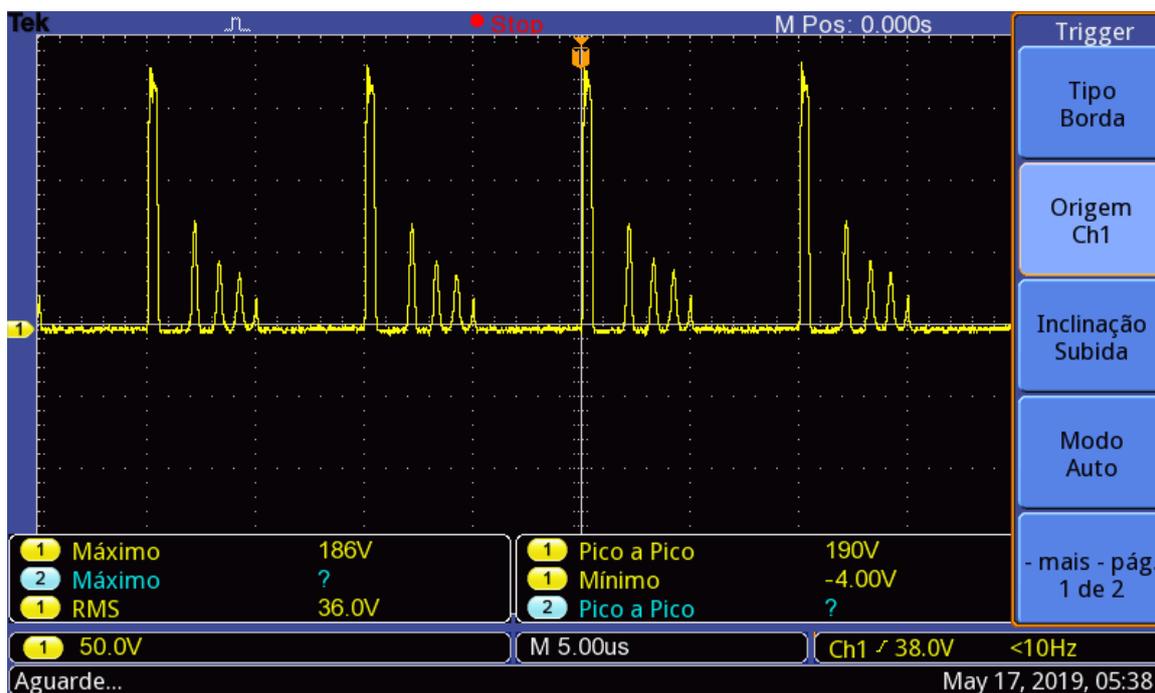


Figura 11- V_d Mosfet boost Fonte: (Autor)

A tensão V_d sobre o mosfet aumenta conforme o aumento da tensão no capacitor de saída C3, a figura 12 apresenta os valores máximos de V_d durante o carregamento, sendo que nos últimos instantes antes de atingir a tensão de 160V indicada na figura 11, vemos um pico de aproximadamente 180V em seguida de oscilações indesejadas na ordem de 50V.

4.1.2 Levantamento simulado

Para o circuito simulado foi utilizado como base a placa de chute atual da equipe RoboFEI, o qual é baseado no controlador MC34063 disponível nas bibliotecas do LTspice. O circuito integrado será responsável por controlar o PWM do mosfet, assim através do circuito do pino Cinv, figura 13, o carregamento do capacitor é finalizado ao chegar em 160V.

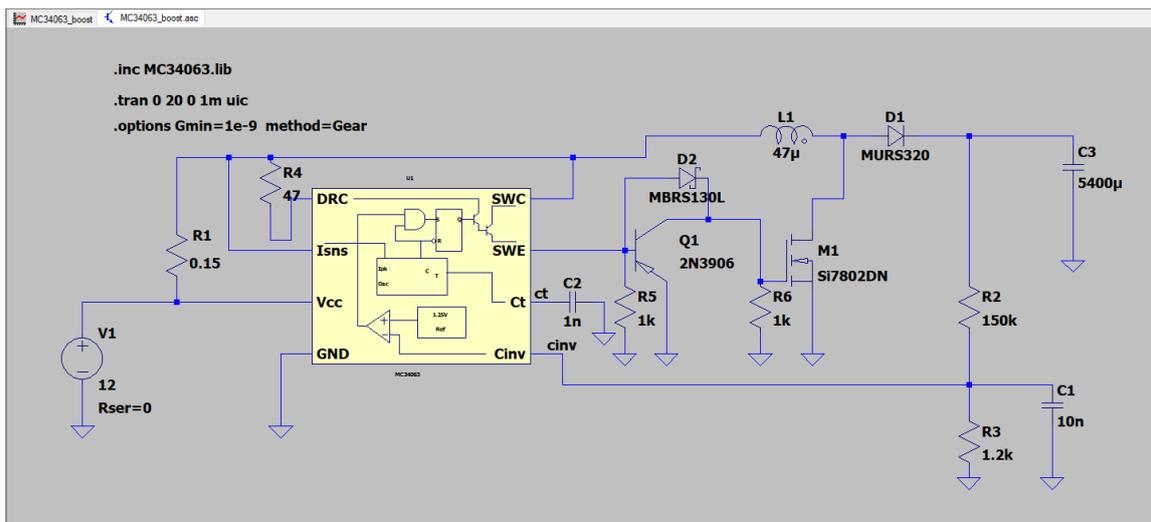


Figura 14- Circuito simulado boost Fonte: (Autor)

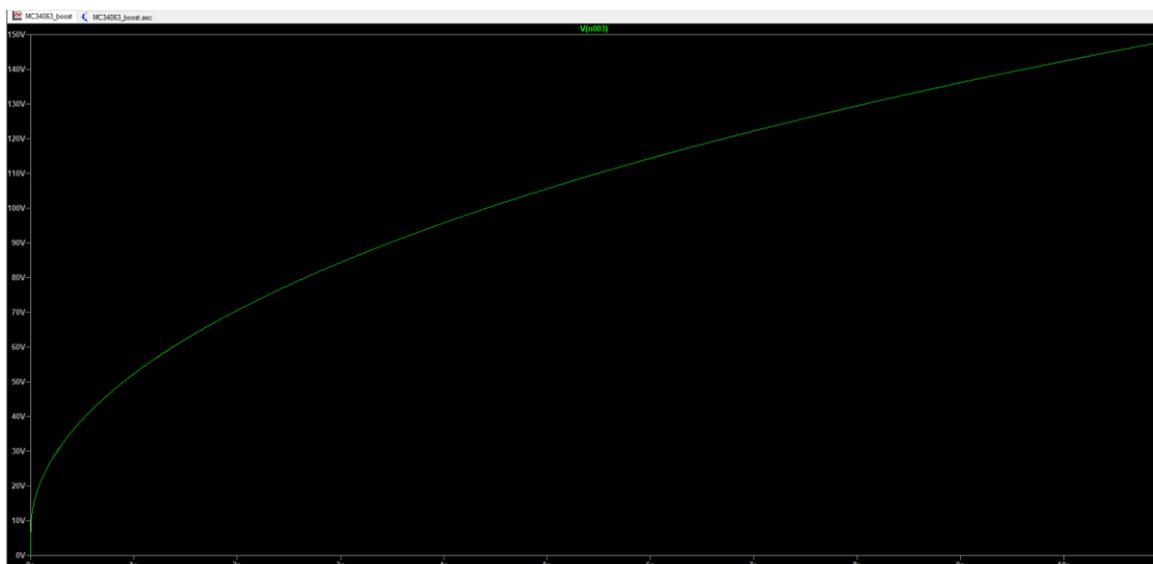


Figura 13 - Vcap simulação boost Fonte: (Autor)

A tensão em verde, presente na figura 14, indica a curva de carregamento do capacitor de saída, neste caso foi necessário um tempo superior devido a utilização de 5400 uF para a simulação assim sendo necessário aproximadamente 11 segundos para uma carga completa.

Nos últimos instantes da simulação, figura 15, temos a tensão V_d em cima do mosfet, esta tensão apresenta valores de pico na faixa de 140 V seguidos de uma oscilação por volta de 30V. Valores um pouco inferiores aos encontrados experimentalmente, porém o mesmo comportamento oscilatório é observado.

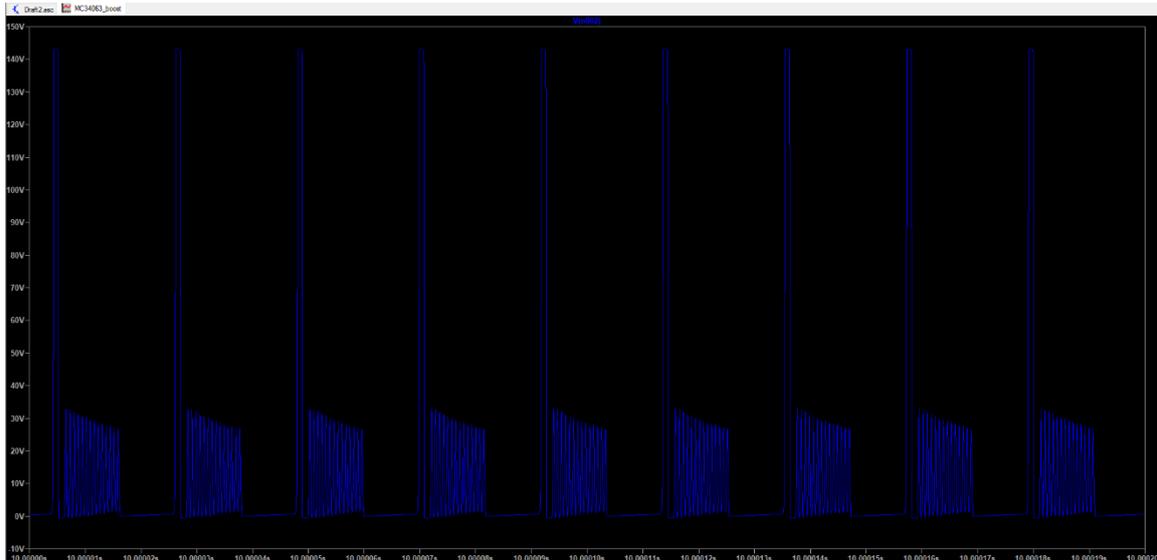


Figura 15 - V_d Mosfet Simulação boost Fonte: (Autor)

4.2 AQUISIÇÃO FLYBACK

Para a análise do Flyback foi utilizado um transformador de relação 1:10 substituindo o indutor necessário para o boost. Os parâmetros de entradas e de frequência foram mantidos os mesmos utilizados na topologia anterior, com essas definições temos:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{n(1-D)} \quad \text{Eq. 4.21}$$

$$n = N_1 / N_2 \rightarrow n = \frac{1}{10}$$

$$V_o = \frac{0,5 \cdot 12}{\frac{1}{10}(1-0,5)} \rightarrow V_o = 120V$$

Cálculo da Indutância mínima para operar no MCC:

$$L_{mb} = \frac{n^2(1-D)^2 R}{2F} \quad \text{Eq. 4.22}$$

$$L_{mb} = \frac{\left(\frac{1}{10}\right)^2 \cdot (1-0,5)^2 \cdot 15}{2 \cdot 200K} \rightarrow L_{mb} = 0,1\mu H$$

4.2.1 Levantamento experimental

O valor de indutância encontrado através da Eq. 4.22 é suprido pelo primário do transformador T1 da figura 16. Os outros parâmetros são os mesmos utilizado durante a topologia anterior.

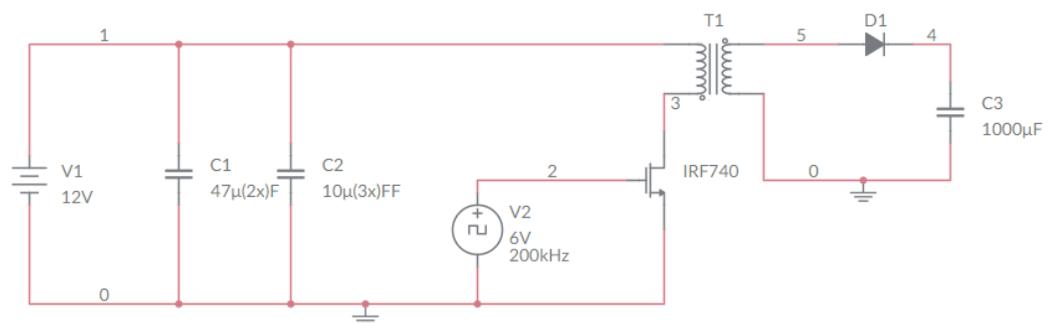


Figura 17 – Circuito experimental flyback Fonte: (Autor)

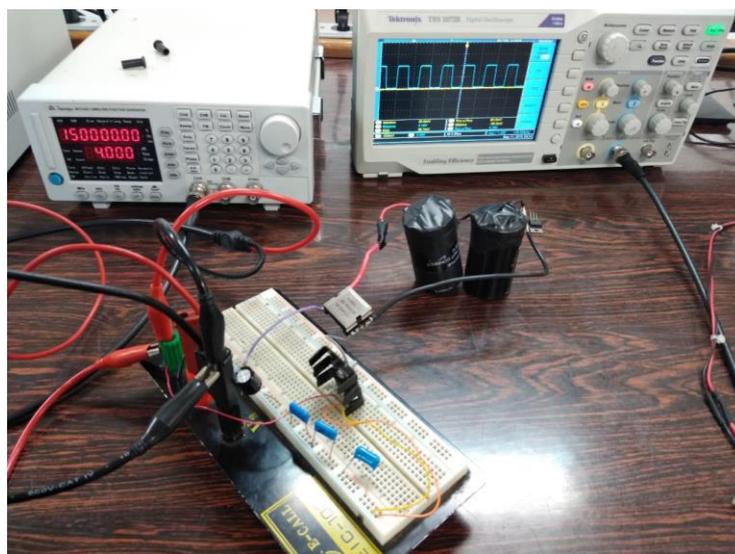


Figura 16 – Montagem flyback Fonte: (Autor)

Na figura 18 temos a tensão no capacitor de saída C3 pelo canal 1 e a tensão de entrada pelo canal 2 do osciloscópio. A tensão de saída varia de 0V até 160V por volta de 4,2 segundos, praticamente o mesmo tempo da topologia boost. Este circuito também apresenta ruído na entrada na ordem de $\pm 5V$.

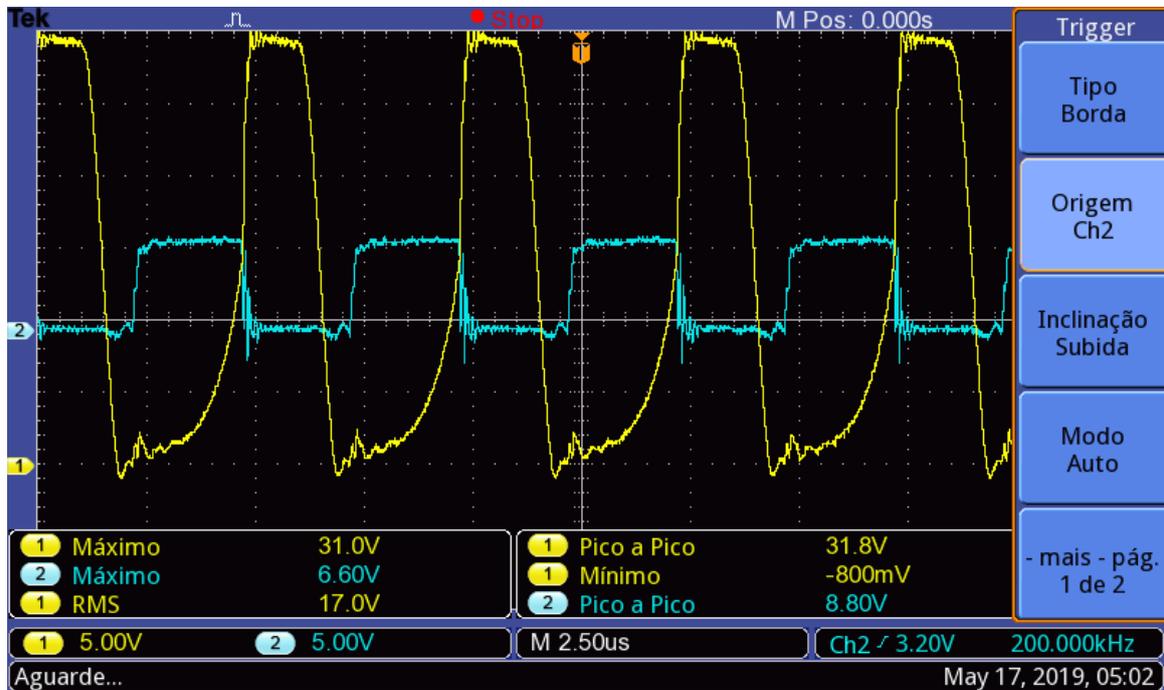


Figura 18 - Vcap e Vin flyback Fonte: (Autor)

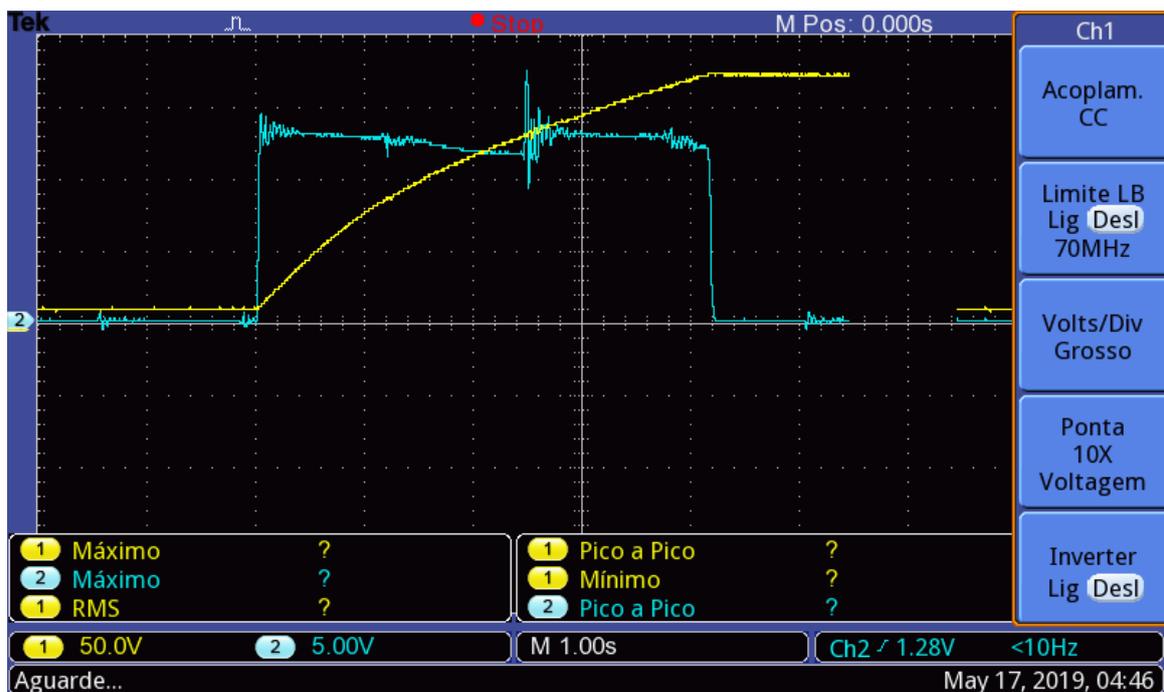


Figura 19 – Vd e Vg Mosfet flyback Fonte: (Autor)

Durante a análise do V_d , tensão sobre o mosfet, que fica evidente a maior diferença entre as topologias. Na figura 19 temos V_d pelo canal 1 e V_g , tensão no gate do mosfet, pelo canal 2. As medidas foram realizadas durante os últimos instantes do carregamento com a tensão do capacitor próxima de 160V, para essa situação temos um pico de 31V seguido de uma oscilação na ordem de 2V.

4.2.2 Levantamento simulado

Para a simulação foi utilizado o circuito integrado LT3751 como forma de controle do PWM de forma que através do circuito do pino RVout, figura 20, o sinal para o carregando é finalizado quando a tensão no capacitor de saída atingir 160V.

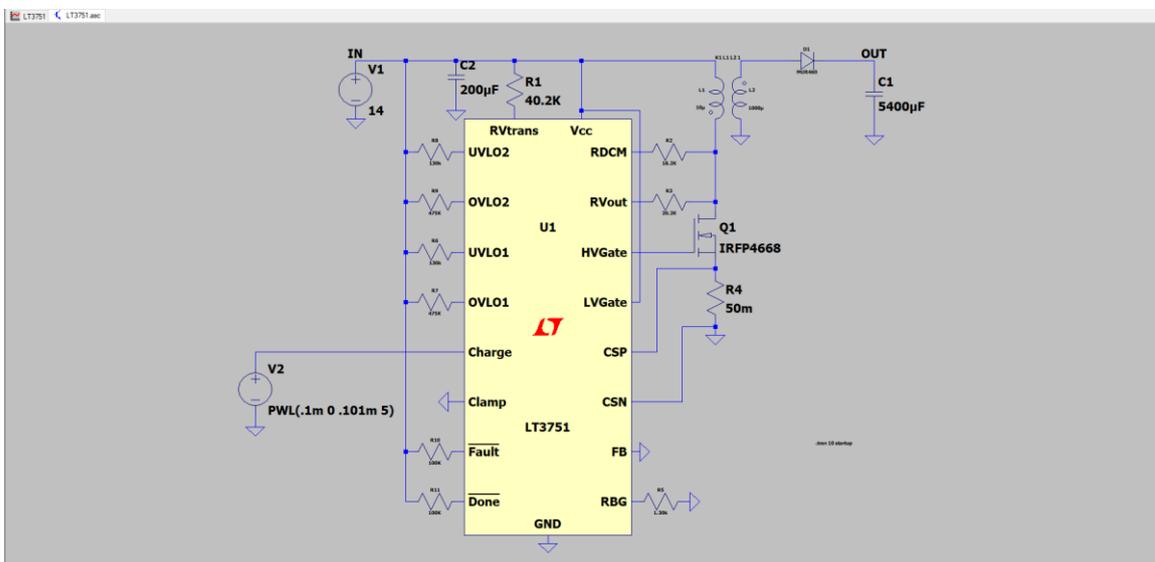


Figura 20 - Circuito simulado flyback Fonte: (Autor)

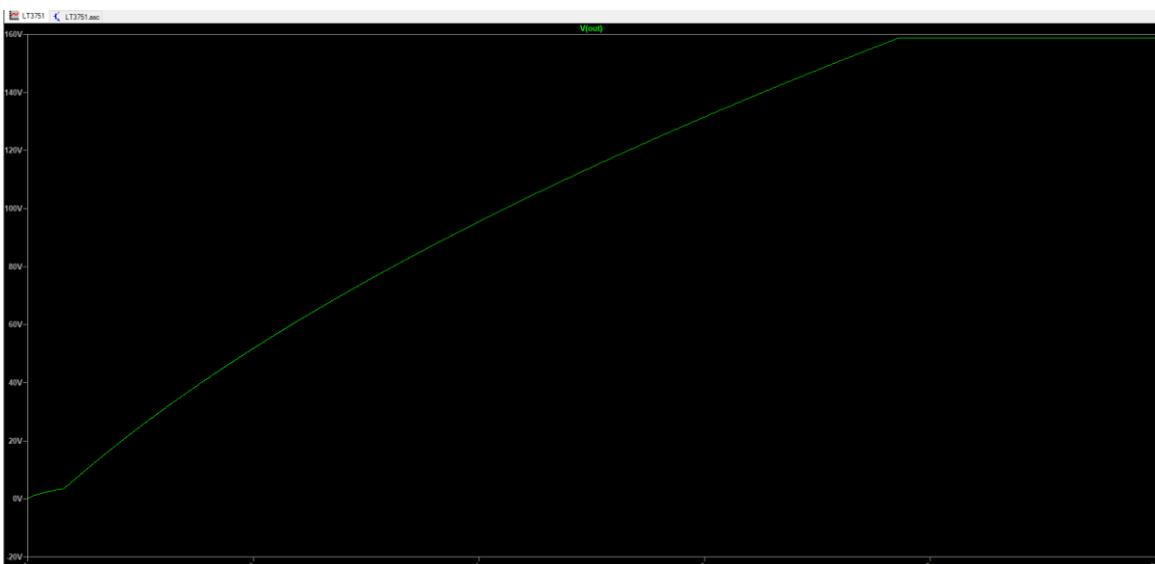


Figura 21 - Vcap simulação flyback Fonte: (Autor)

A curva de carregamento para o capacitor de 5400uF, figura 21, apresenta uma melhora significativa no tempo necessário, com a utilização de menos do que 8 segundos foi possível alcançar os 160V dimensionados para o circuito.

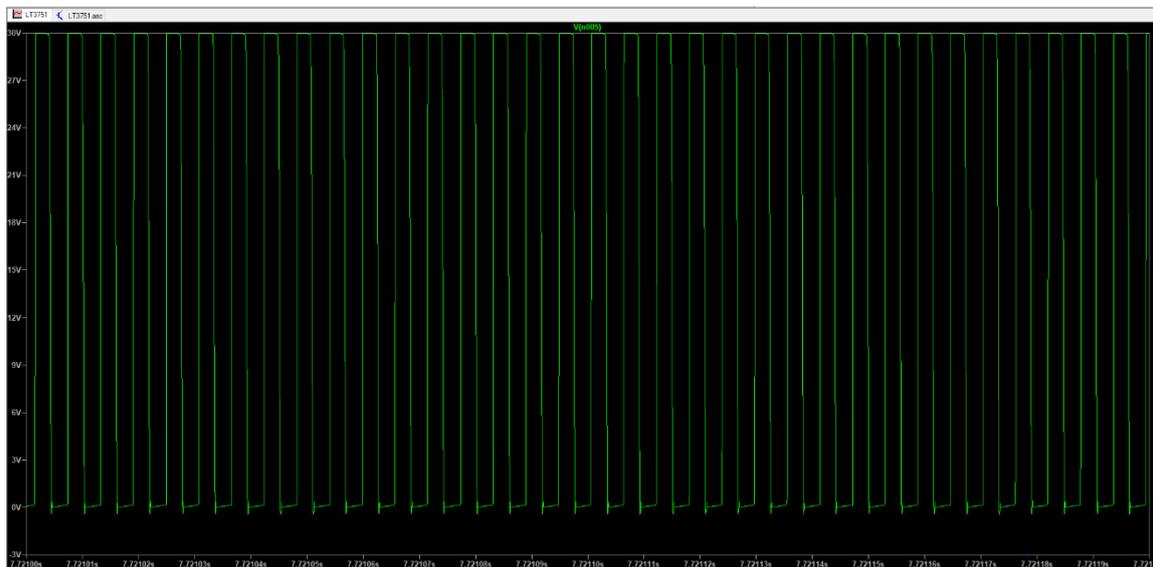


Figura 22 - Vd Mosfet Simulação flyback Fonte: (Autor)

O resultado da figura 22 é muito próximo do obtido experimentalmente, assim reforçando a queda na tensão de pico que o mosfet precisa suportar.

4.3 ANÁLISE

Durante as tentativas de dimensionar um circuito misto para teste e simulação foram encontrados vários desafios que não permitiram a elaboração dos testes neste projeto. As equações encontradas nos livros apresentam muitos parâmetros arbitrários a serem definidos. Quando se trata de topologias mistas temos a utilização do dobro de componentes, com isso durante as tentativas de dimensionamento os circuitos apresentam comportamentos instáveis devido as relações RCL resultando em um rendimento baixo ou a não realização do carregamento do capacitor de saída.

A topologia Flyback apresentou resultados mais atrativos durante os testes, além da redução no tempo de carregamento temos uma redução nas tensões em cima do mosfet, mudança que resulta na possibilidade de utilização de modelos de mosfet mais comuns de serem encontrados. A utilização de um transformador mantém uma isolação entre o circuito que irá manter a alta tensão do circuito responsável pelo controle do chaveamento, resultando em uma maior segurança para os circuitos integrados e de controle.

4.4 CIRCUITO ESQUEMÁTICO

O circuito final, figura 24, pode ser dividido em 4 blocos responsáveis pelas principais funções necessárias para a placa de chute, onde todos funcionam em conjunto, porém suas características podem ser analisadas de forma individual.

4.4.1 CI Flyback

Existem vários controladores de PWM dedicados aos circuitos Flyback, porém a grande maioria é especializada no controle orientado aos reguladores de tensão, estes modelos não são as opções mais otimizadas quando se deseja controlar um circuito de carregamento.

Entre os modelos analisados temos o LT3468, LT3750, LT3751, MP3351. O CI que mais se destaca é o LT3751 por se tratar de chip mais completo, entre suas funções temos a possibilidade de limitar as tensões máximas e mínimas de entrada em que o circuito pode trabalhar, com isso facilitando a utilização de baterias LiPo. A realimentação é realizada no primário do transformador em oposição a outros modelos que possui realimentação ligada no capacitor de saída, além de fornecer um pino para habilitação do carregamento.

4.4.2 Transformador 750032051

O datasheet do LT3751 apresenta algumas recomendações de circuitos e transformadores, ao analisar temos o HA4060-AL para aplicações com alta tensão na entrada de 100V a 400V e o GA3460-BL para aplicações com baixa tensão de entrada de 5V a 25V, este modelo é composto por quatro enrolamentos no primário e um no secundário, porém o modelo escolhido foi o 750032051 devido as suas dimensões mais compactas com apenas dois enrolamentos de entrada e um de saída e a presença de uma blindagem para reduzir a interferência eletromagnética.

Analisando os dados do 750032051, temos que seu dielétrico suporta uma tensão de até 1 KV contínuo entre o enrolamento de entrada e saída, sua indutância no primário é de 10 uH e relação de transmissão de 1-10 com temperatura de operação de -40°C a +125°C.

4.4.3 Dimensionamento LT3751

Através do datasheet do componente foi obtido todas as equações para o dimensionamento do circuito de cada pino de forma a obter as características desejadas para o projeto. O CI suporta tensão de entrada de 5V até 24V e fornece a possibilidade de

utilizar fontes de alimentação independentes entre o circuito do chaveamento e do chip, porém para essa aplicação terá uma única fonte de entrada.

CSP (Pino 12) – Responsável por determinar um limite para a corrente:

$$I_{\max} = \frac{106mV}{R_{sense}} \rightarrow R_{sense} = \frac{106mV}{2A} \rightarrow R_{sense} = 53m\Omega$$

RVout (Pino 16) – Realimentação de controle relacionada a tensão de saída no capacitor, como a equação característica depende de R_{BG} será adotado um valor arbitrário de $1K\Omega$:

$$V_{out} = 0,98N \left(\frac{RV_{out}}{R_{BG}} \right) - V_{diodo}$$

$$160 = 0,98 \cdot 10 \left(\frac{RV_{out}}{1K} \right) - 0,5 \rightarrow RV_{out} \cong 16K5\Omega$$

As resistências RV_{trans} , RV_{out} e R_{DCM} são definidas através da tabela fornecida pelo datasheet, foi considerado um ΔV_{drain} de 5V até 80V resultando em um RV_{trans} de $40K2\Omega$, um RV_{out} de $40K2\Omega$ e um R_{DCM} de $18K2\Omega$.

Para limitar a tensão mínima, de 11V, em que o circuito deve operar temos UVL01 e UVL02, ambos de mesmo valor devido alimentação única:

$$V_{UVL} = 1,225 + 50\mu A \cdot R_{UVL}$$

$$R_{UVL} = \frac{11V - 1,225}{50\mu A} \rightarrow R_{UVL} \cong 195,5K\Omega$$

Para limitar a tensão máxima, de 20V, em que o circuito deve operar temos OVL01 e OVL02, ambos de mesmo valor devido alimentação única:

$$V_{OVL} = 1,225 + 50\mu A \cdot R_{OVL}$$

$$R_{OVL} = \frac{20V - 1,225}{50\mu A} \rightarrow R_{OVL} = 375,5K\Omega$$

4.4.4 Sinais de controle

O circuito de controle deve ser capaz de enviar seus comandos de acionamento para a placa de chute e ao mesmo tempo manter um isolamento para evitar possíveis danos devido os altos níveis de potência. Para suprir essa necessidade são usados opto-acopladores onde os sinais são transmitidos através da luz, porém as saídas dos acopladores não mantem um nível de tensão estável, assim sendo necessário um CI responsável por receber esse sinal e retornar o mesmo sinal com valores de tensões bem definidos para os níveis lógicos alto e baixo. Nessa aplicação foi escolhido o TC4426 que além de regular o nível do sinal é um inversor lógico. O modelo do opto-acoplador será o PC817X1NIP1B que apresenta uma isolação máxima de 5 KV alternado, informações retiradas do datasheet do fabricante.

4.4.5 Disparo dos solenoides

O sistema de chute possui 3 solenoides que podem ser acionados simultaneamente caso necessário. Para cada sinal temos um mosfet de potência (Q3, Q4 e Q5) que controla a descarga do capacitor em uma bobina específica, o disparo é realizado pelo gate que está ligado nas saídas do TC4426. Em paralelo com cada uma das bobinas temos os diodos responsáveis por eliminar possíveis correntes parasitas que possam surgir quando o mosfet abre o circuito.

O único PMOS do circuito é o Q2, ele é utilizado em conjunto do resistor R24 de forma a dissipar a energia armazenada pelo capacitor, diminuindo os riscos de choque elétrico ao manusear o circuito após a utilização. Para o Q5 conduzir é necessário que a saída do TC4426 esteja em zero, isso ocorre quando a tensão proveniente da placa de controle é desligada.

Para definir o modelo do mosfet que será utilizado foi realizado uma simulação para chegar na corrente máxima que pode ocorrer durante um chute. Analisando o caso mais problemático em que dois solenoides são ativados ao mesmo tempo, temos a indutância e resistência equivalente utilizadas no circuito da figura 23 ligadas em serie com o capacitor carregado com 160V, após a comutação da chave a corrente chega em um pico de 26A e começa a decair.

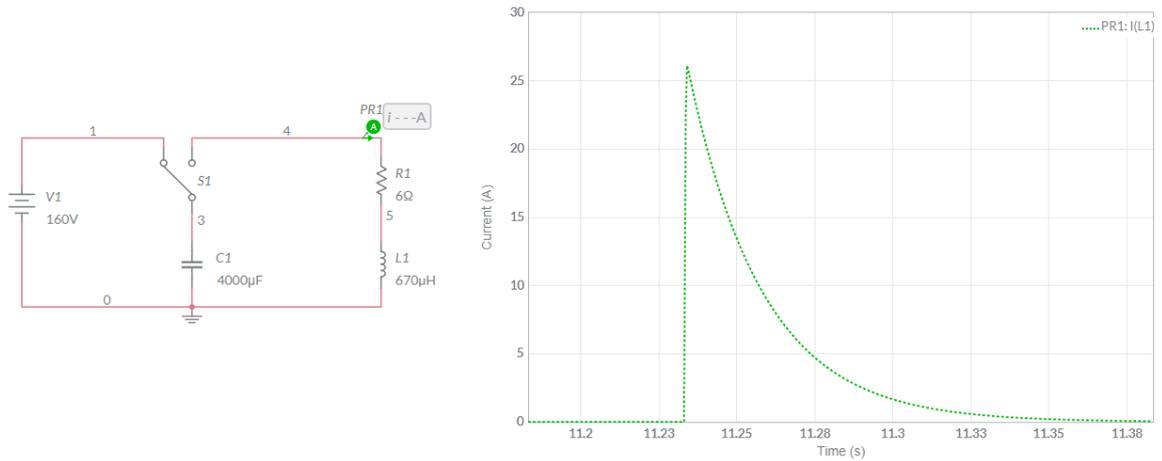


Figura 23- Análise da corrente de disparo Fonte: (Autor)

Baseado na corrente máxima foi escolhido o modelo IXFA56N30X3 para os NMOS, este modelo suporta uma tensão de 300V e corrente de 56A. Para o PMOS temos o modelo FQP9P25 com tensão de 250V e corrente de 9,4A, devido a função do PMOS de descarregar o capacitor quando a placa principal for desligada e sua resistência em serie ser alta comparada com as dos indutores temos essa diferenciação nas escolhas.

4.4.6 Circuito elaborado

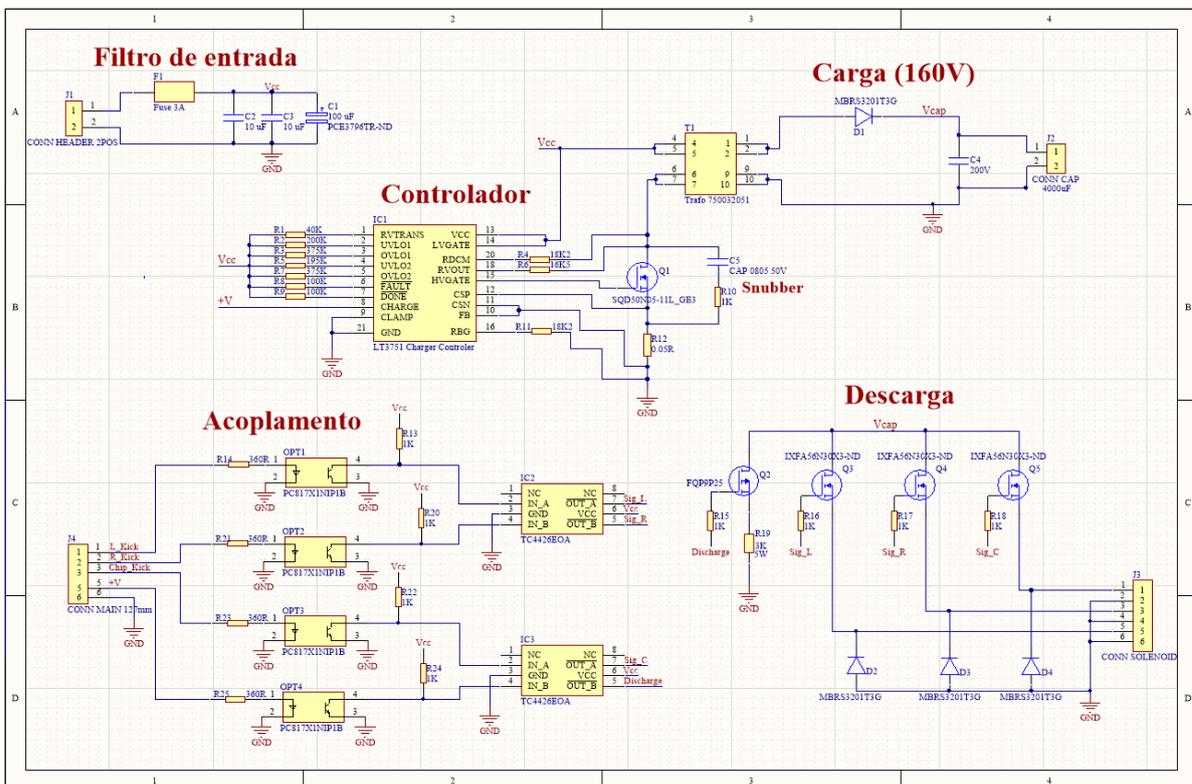


Figura 24 - Circuito esquemático Fonte: (Autor)

Com a junção dos 4 blocos principais foram adicionados os conectores necessários para a alimentação, ligação dos capacitores, solenoides e sinais de controle. No conector J1 estão ligados 3 capacitores para filtrar ruídos que possam ser gerados na tensão de entrada, sendo que C2, C3 são de cerâmica enquanto C1 é eletrolítico.

O dimensionamento do circuito de snubber para auxílio do Q1 será realizado durante os testes do protótipo, de forma a eliminar a maior parte das tensões parasitas.

4.5 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Finalizado o circuito esquemático é necessário iniciar o desenvolvimento do protótipo da PCB para a realização de testes e confirmação do funcionamento completo do circuito, assim permitindo chegar em uma versão final para a placa.

4.5.1 Características da PCB

Devido ao espaço disponível atualmente as dimensões da placa não podem ultrapassar 35mm de largura e 85mm de comprimento. Para as trilhas suportarem os níveis de correntes mais facilmente foi escolhido a espessura de cobre com 2oz, o ideal seria a utilização de 3oz, porém o fabricante utilizado pela equipe trabalha até 2oz.

Existem outras limitações devido ao fabricante que precisam ser seguidas, como a dimensão mínima das vias de 0,2mm, a distância mínima entre a borda da placa e os condutores de 0,2mm, a largura mínima de anel ao redor dos furos de 0,2mm e a máscara de solda que deve manter uma distância mínima de 2,5 mil dos pads e ilhas.

#	Name	Material	Type	Thickness	Dk	Df	Weight
✓	Top Overlay		Overlay				
✓	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask	0,01mm	3,5		
1	Top Layer		Signal	0,071mm			2oz
✓	Dielectric 1	FR-4	Dielectric	0,6mm	4,8		
2	Bottom Layer		Signal	0,071mm			2oz
✓	Bottom Solder	Solder Resist	Solder Mask	0,01mm	3,5		
✓	Bottom Overlay		Overlay				

Figura 25 - Configuração das camadas da PCB Fonte: (Autor)

4.5.1 Design do protótipo

Durante a realização das montagens foi utilizado a tabela 1 baseada na formula do IPC-2221, assim os pontos do circuito de maior corrente foram mantidos com uma largura mínima para as trilhas de 0,25 polegadas chegando no resultado da figura 26.

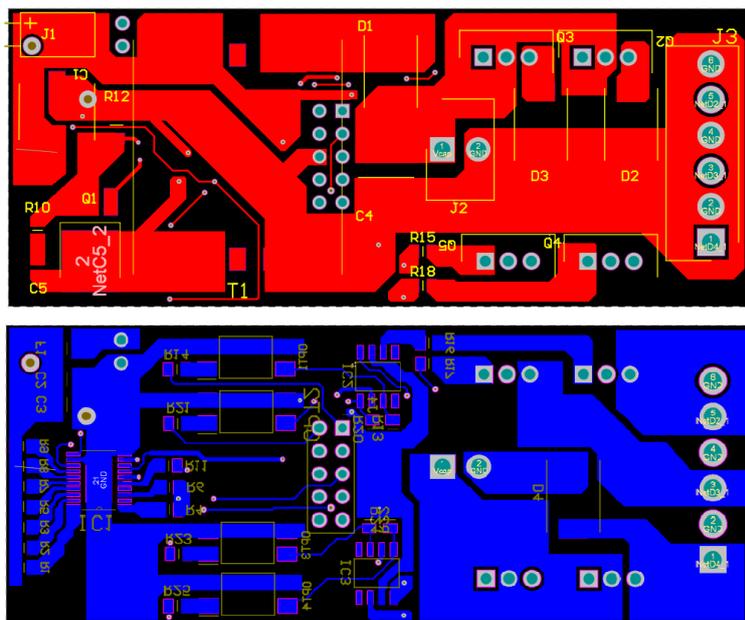


Figura 26 - Trilhas do protótipo Fonte: (Autor)

Alguns posicionamentos dos nomes dos componentes precisam ser rearranjados, porém para facilitar a impressão do protótipo essas informações não serão incluídas no processo.

O software Altium possibilita a visualização do modelo em três dimensões da placa, figura 27, facilitando o acompanhamento do resultado final e a verificação da ocorrência de colisão entre os encapsulamentos de componentes próximos.

Atualmente o protótipo já foi confeccionado e está em processo de soldagem, assim que concluído será iniciado os testes e medições.

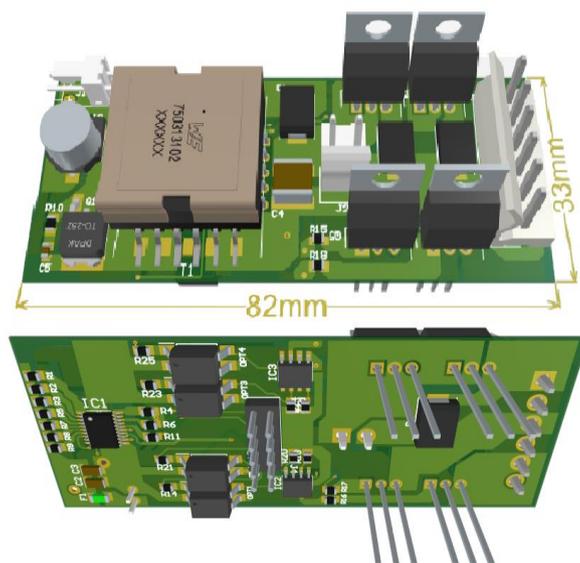


Figura 27- Visão 3D do protótipo Fonte: (Autor)

5 FINALIZAÇÃO

Devido a tecnologia de impressão disponíveis para o protótipo na faculdade foram encontrados problemas para soldar e acertar as trilhas do LT3751, IC responsável pelo controle do sistema, pois suas dimensões não são suportadas pela CNC utilizada. Desta forma não foi possível testar o carregamento dos capacitores, em alguns momentos chegou a funcionar, mas com muito mal contato devido as trilhas não estarem com as dimensões de acordo com o necessário. Os outros blocos foram testados sem problemas.

5.1 ALTERAÇÕES

Através do protótipo verificou-se a necessidade de algumas alterações no circuito e na posição de algumas trilhas, além do posicionamento dos nomes e indicação de cada componente.

5.1.1 Esquemático

A maior mudança ocorreu no circuito de controle, principalmente na lógica de funcionamento dos opto-acopladores. Os sinais que os blocos recebem são ativos em nível lógico baixo e o circuito antigo não considerava esta característica. Outra alteração foi a adição de alguns capacitores como filtros e a utilização do pino FAULT como um sinal de saída, responsável por indicar o estado do circuito de carregamento onde em nível lógico alto o circuito está operando corretamente.

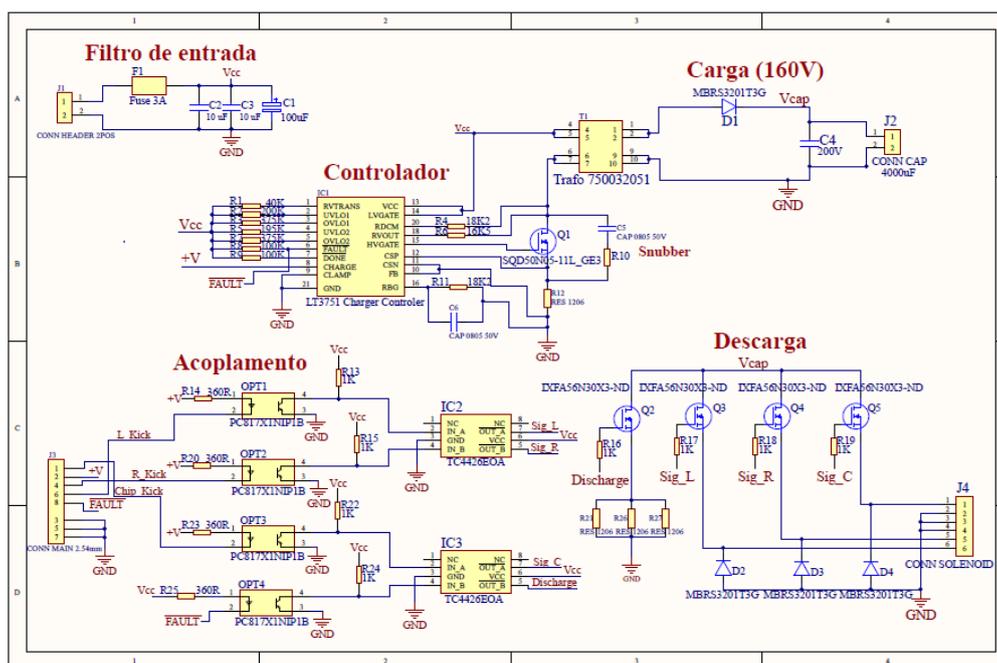


Figura 28 - Novo Esquemático

Fonte: (Autor)

5.1.2 Layout PCB

As indicações de cada componente foram reajustadas, além de algumas trilhas do conector do solenoide que tiveram suas posições alteradas para resultar em uma melhor condução durante a descarga. O símbolo da equipe e a versão da placa foi adicionado para manter o controle das alterações.

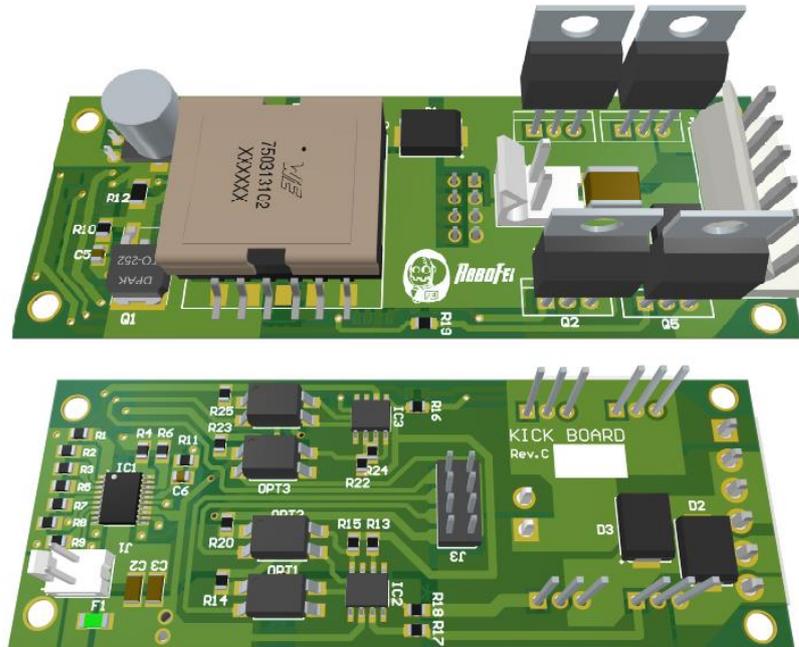


Figura 29 - Novo Layout Fonte: (Autor)

5.2 CUSTO

Para facilitar o trabalho e evitar erros o Altium é capaz de exportar uma tabela no formato Excel com a lista de componentes do projeto. Com base na lista foi orçado o custo de uma placa durante o segundo semestre de 2019 através da compra dos itens pela Digi-Key e confecção da PCB pela Griffus. A escolha das empresas resulta de serem as principais fornecedoras da equipe RoboFEI nos últimos anos.

Realizando um comparativo com a placa atual temos um mesmo custo de produção da PCB devido as dimensões de ambas as placas serem iguais. Ao analisar o custo em componentes temos 36,59 Dollars, Figura 30, para a placa desenvolvida neste projeto e 28,87 Dollars para a placa atual. A diferença entre os preços é baixa possibilitando a produção e utilização nos robôs. Parte desta diferente é devido a capacidade de utilização de um solenoide adicional em vista da placa atual, o resto fica a cargo da diferença entre as topologias implementadas.

Lista de Componentes								Lista de Materiais do Documento PCB [Kick_PCB.PcbDoc]	
Source Data From:		Kick_PCB.PcbDoc							
Project:		Kick_Board_Final.PrjPcb							
Variant:		RevC							
Report Date:		17/11/2019		11:07					
Comment	Manufacturer_Part_Number	Description	Designator	Quantity	Preço Un	Preço Item			
CONN HEADER	22-05-3021	CONN HEADER R/A 2POS 2.54MM	J1	1	0,340	0,34			
1 UF	08055A101JAT2A	Capacitor 0805 50V	C5, C6	2	0,160	0,320			
1 UF 200V	2225HC103KAZ1A	CAP CER 1UF 200V X7R 2225	C4	1	2,000	2,000			
100uF	UCD1H101MNL1GS	100µF 50V Aluminum Electrolytic	C1	1	0,730	0,730			
10 uF	C3216COG1H103J060AA	Capacitor C3216COG1H103J060AA	C2, C3	2	0,440	0,880			
CONN CAP	09-65-2028	Connector CONN HEADER VERT 2POS 3.96MM	J2	1	0,220	0,220			
CONN MAIN 2.54mm	20021311-00010T4LF	Connector	J3	1	0,880	0,880			
CONN SOLENOID	640445-6	Connector CONN HEADER VERT 6POS 3.96MM	J4	1	0,430	0,430			
DIODE SCHOTTKY 200V	MBRS3201T3G	Diode MBRS3201T3G	D1, D2, D3, D4	4	0,620	2,480			
Fuse 3A ou 5A	0685T3000-01	Fuse FUSE 3.0A 63VAC/DC SLOW 1206	F1	1	0,310	0,310			
LT3751 Charger Controler	LT3751EFEPBF	Integrated Circuit	IC1	1	9,260	9,260			
Mosfet N 50V 50A	SQD50N05-11L_GE3	MOSFET (N-Channel) N-Channel 50V 50A (Tc) 75W (Tc)	Q1	1	1,520	1,520			
Mosfet N Disparo	IXFA56N30X3-ND	MOSFET (N-Channel) N-Channel 300V 56A (Tc) 320W (Tc)	Q2, Q3, Q4, Q5	4	6,310	25,240			
Res Snubber	CPF0805B105RE1	Resistor 0805	R10	1	0,100	0,100			
1K	CPF0805B105RE1	Resistor 0805	R13, R15, R16, R17, R18, R19	8	0,100	0,800			
16K5	CPF0805B105RE1	Resistor 0805	R6	1	0,100	0,100			
18K2	CPF0805B105RE1	Resistor 0805	R4, R11	2	0,100	0,200			
40K	CPF0805B105RE1	Resistor 0805	R1	1	0,100	0,100			
100K	CPF0805B105RE1	Resistor 0805	R8, R9	2	0,100	0,200			
195K	CPF0805B105RE1	Resistor 0805	R5	1	0,100	0,100			
200K	CPF0805B105RE1	Resistor 0805	R2	1	0,100	0,100			
360R	CPF0805B105RE1	Resistor 0805	R14, R20, R23, R25	4	0,100	0,400			
375K	CPF0805B105RE1	Resistor 0805	R3, R7	2	0,100	0,200			
RES 1206	CR1206-FW-1504ELF	Resistor CR1206-FW-1504ELF	R12, R21, R26, R27	4	0,150	0,600			
IC GATE DRVR	TC4426EOA	Integrated Circuit	IC2, IC3	2	1,320	2,640			
OPTOISOLATOR	PC817X1NIP1B	Integrated Circuit	OPT1, OPT2, OPT3, OPT4	4	0,720	2,880			
Trafo 750032051	750032051	Transformer	T1	1	10,180	10,180			
					Custo Total:	36,59	Dollars		

N.Ord	Modelo	Faixas	Material	Especif. Corde	Largura	Conserv. Superfície	Conector	Teletrab	QTD	Prazo Opção 1	Prazo Opção 2	Prazo Opção 3			
102784	KICK BOARD REVC	2	FR4	1,6	2	34	90	HAL	N	S	10 du				
Arquivo = PlacaKickGriffus.rar, pci c/ 2 O/Z + 1 O/Z depositada + teste elétrico, o preço é por placa.										FOTOLITOS	0,00	3	220,00		
										TST ELÉTRICO	0,00				
										SERVIÇOS					

Figura 30 - Orçamento

Fonte: (Autor)

5.3 SOLDAGEM E MEDIDAS

Com a chegada da PCB confeccionada foi iniciado o processo de soldagem manual da placa para realização dos testes e medidas.

5.3.1 Soldagem

Durante a soldagem da PCB, figura 32, foram analisados as indicações das posições dos componentes e suas respectivas polaridades e alguns componentes tem pontos que precisam ser melhorados como o capacitor C1 que não tem a indicação de polaridade, os pads do transformador T1 podem ser maiores para facilitar a realização das soldas entre outros detalhes. As mudanças serão aplicadas nas próximas versões, nenhum problema que impedisse o funcionamento foi encontrado.

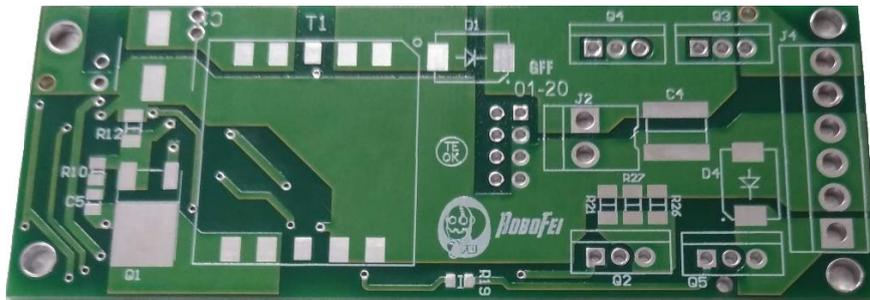


Figura 31 - PCB Soldada Fonte: (Autor)

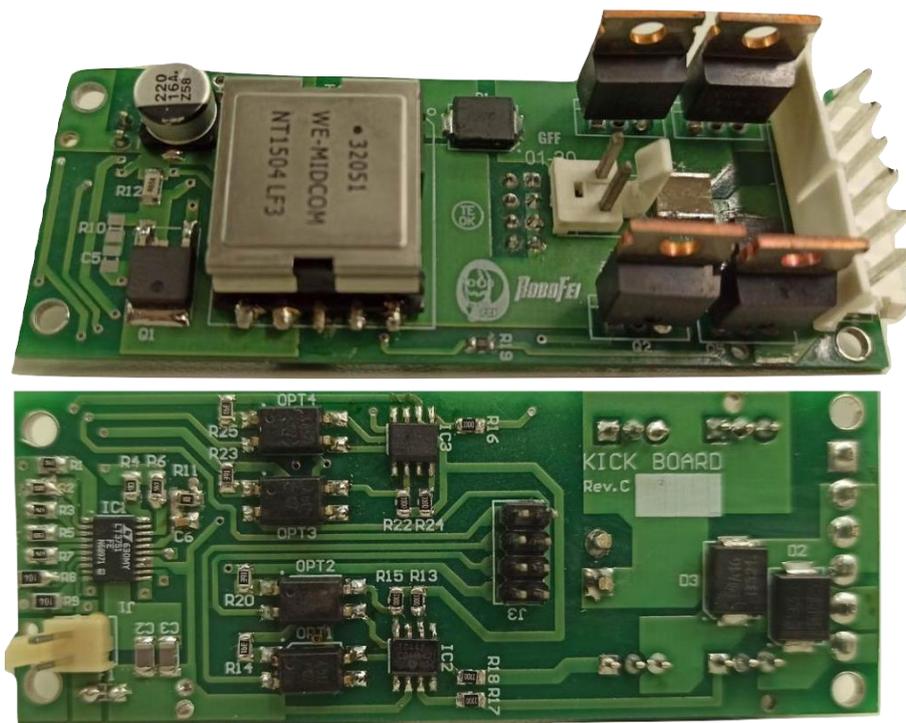


Figura 32- PCB Produzida Fonte: (Autor)

5.3.2 Medições

Analisando o chaveamento do mosfet durante o carregamento, com um consumo de 2 amperes, foram obtidas as medidas da figura 33 onde a tensão inicialmente passa por picos de 20V e no final do carregamento estão por volta de 30V, valores conferem com as simulações realizadas.

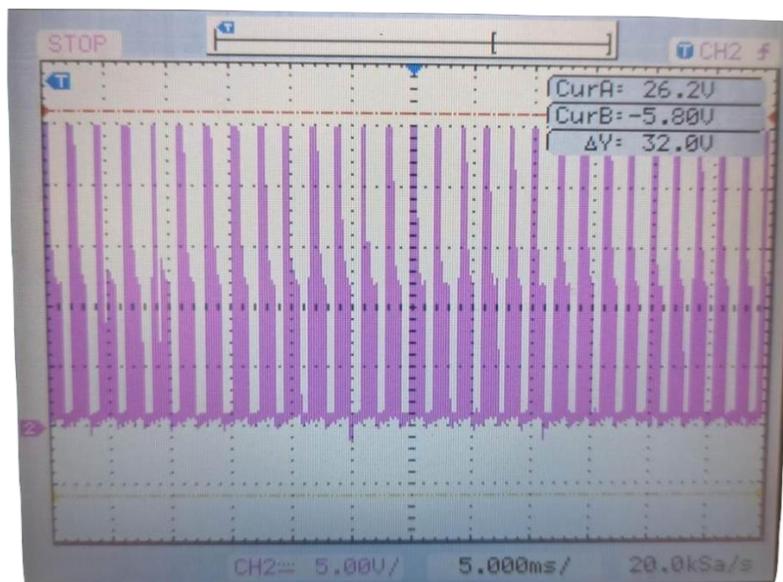


Figura 33 - Tensão de chaveamento prototipo Fonte: (Autor)

Medindo a tensão do capacitor foi encontrado um tempo de recarga de aproximadamente nove segundos, figura 34, em comparação com a simulação onde foram necessários oito segundos para alcançar a carga desejada.

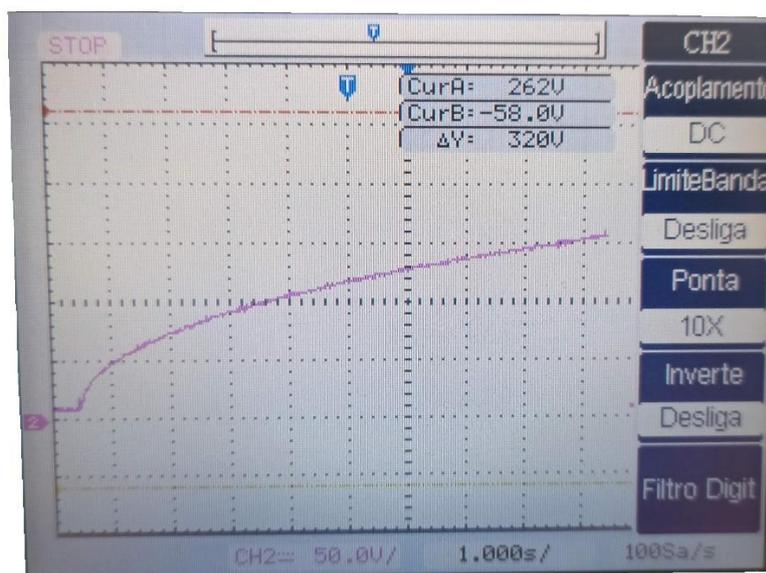


Figura 34 - Tempo de carga prototipo Fonte: (Autor)

5.4 SOFTWARE

A operação do sistema é controlada através de um código em VHDL que recebe comandos do microprocessador, acionando as saídas conforme desejado. A lógica de operação para a placa de chute foi implementada através da técnica da máquina de estados, temos seis sinais de entradas e três de saída, de forma que os de saída disparam cada solenoide quando estão em nível logico zero.

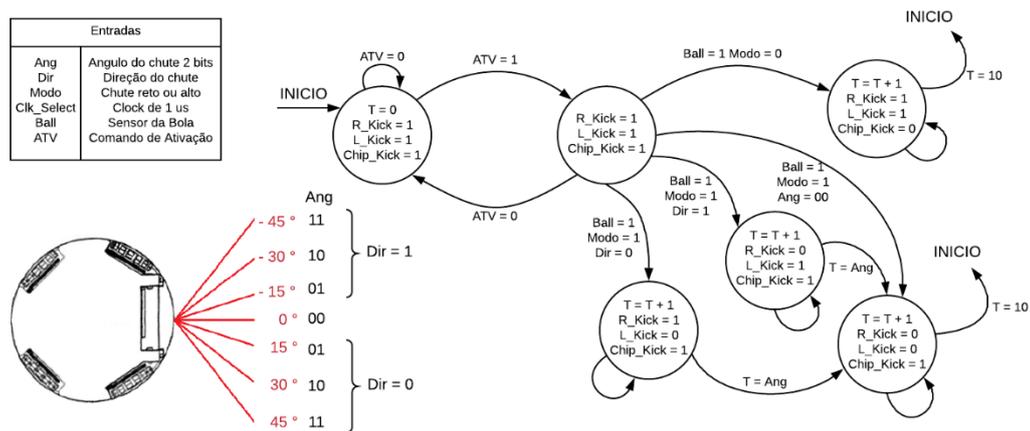


Figura 35 - Lógica de controle

Fonte: (Autor)

O sinal Clk_select vem de uma derivação do clock do robô que opera com 50 MHz, é responsável pelo avanço entre os estados. Temos a base de tempo de 10us como o tempo aproximado necessário para uma descarga completa. Para o chute reto através da manipulação do acionamento dos dois solenóides que são utilizados é possível gerar uma angulação na saída da bola dependendo do atraso entre os mesmos, quando maior o atraso maior o ângulo de saída da bola até o limite físico do dispositivo. Através de testes foram encontradas aproximadamente as relações da Figura 31, porém os valores de tempo do código ainda estão sendo aperfeiçoados.

```

158 Estados: process(Clk_select)
159 begin
160     if rising_edge(Clk_select) then
161
162         Case Estado is
163
164             When INI =>
165                 if (ATV='1') then Estado <= Sensor;
166                 else Estado <= INI;
167                 end if;
168
169             When Sensor =>
170                 if (Ball='1' and Modo='0') then Estado <= Chip;
171                 elsif (Ball='1' and Ang="00") then Estado <= Final;
172                 elsif (Ball='1' and Dir='1') then Estado <= Esquerda;
173                 elsif (Ball='1') then Estado <= Direita;
174                 elsif (ATV='1') then Estado <= Sensor;
175                 else Estado <= INI;
176                 end if;
177
178             When Chip =>
179                 if (T=10) then Estado <= INI;
180                 else then Estado <= Chip;
181                 end if;
182
183             When Esquerda =>
184                 if (T = to_integer(unsigned(Ang))) then Estado <= Final;
185                 else then Estado <= Esquerda;
186                 end if;
187
188             When Direita =>
189                 if (T = to_integer(unsigned(Ang))) then Estado <= Final;
190                 else then Estado <= Direita;
191                 end if;
192
193             When Final =>
194                 if (T=10) then Estado <= INI;
195                 else Estado <= Final;
196                 end if;
197
198             When Others => Estado <= INI;
199
200         end case;
201     end if;
202 end process Estados;
203
204 Saidas: process(Estado)
205 begin
206     case Estado is
207
208     when INI => T<=0; R_kick<='1'; L_Kick<='1'; Chip_Kick<='1';
209     when Sensor => T<=0; R_kick<='1'; L_Kick<='1'; Chip_Kick<='1';
210     when Chip => T<=T+1; R_kick<='1'; L_Kick<='1'; Chip_Kick<='0';
211     when Esquerda => T<=T+1; R_kick<='0'; L_Kick<='1'; Chip_Kick<='1';
212     when Direita => T<=T+1; R_kick<='1'; L_Kick<='0'; Chip_Kick<='1';
213     when Final => T<=T+1; R_kick<='0'; L_Kick<='0'; Chip_Kick<='1';
214     when others => T<=0; R_kick<='1'; L_Kick<='1'; Chip_Kick<='1';
215
216     end case;
217 end process Saidas;

```

Figura 36 - Código VHDL

Fonte: (Autor)

6 METODOLOGIA

Será realizado um estudo inicial sobre a placa de chute que está em utilização pela equipe RoboFEI, onde serão levantados os dados de consumo de corrente, corrente de pico e tempo necessário para carregar os capacitores em relação a tensão aplicada, isso para vários níveis de tensão como 150V, 160V, 170V, 180V e 190V. Após aquisição dessas informações sobre a topologia Boost, inicia-se a montagem de outras topologias de conversão DC-DC, sendo a primeira o Flyback e em seguida circuitos mistos entre Flyback, Boost e Charge-Pump.

Todos os circuitos elaborados serão submetidos as mesmas aquisições, permitindo um comparativo sobre qual apresenta melhor custo-benefício, levando em conta além dos parâmetros de desempenho, o custo e a complexidade dos componentes necessários em cada circuito, a fim de definir a topologia que será utilizada como base. Para relacionar o custo será utilizado como referência o fornecedor habitual da equipe RoboFEI.

Com a topologia de conversão definida, será realizado um trabalho de adaptação onde a mesma passará pela implementação de circuitos auxiliares necessários para o controle e funcionamento pleno de acordo com as necessidades da equipe RoboFEI. O final dessa etapa resultará no primeiro circuito esquemático do projeto.

Antes de iniciar o projeto do circuito impresso, serão utilizados os dados de corrente obtidos das etapas anteriores a fim de definir pontos críticos onde ocorrerão picos durante as descargas. Com essas informações utilizar-se de técnicas de dimensionamento, com foco no tamanho mínimo das trilhas e malhas, tomando os devidos cuidados por se tratar de um circuito de alta potência, assim evitando o rompimento das ligações gerando uma maior confiabilidade no circuito.

Desenvolver um protótipo para realizar testes de estresses dos componentes e placa, utilizando pela primeira vez no projeto RoboFEI o software Altium (ALTIUM LLC, 2018) para desenvolvimento do esquemático e circuito impresso.

Incrementar as alterações mediante as necessidades que o protótipo apresentar e desenvolver uma versão final otimizada, afim de ser submetida por testes finais nos robôs em campo. Após a finalização do circuito, será realizado um levantamento de parâmetros de controle, onde serão definidas as variações de atraso na ativação de forma a obter um ângulo de chute desejado, como também tempo de descarga de acordo com a velocidade que o chute precisa ser realizado.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de uma nova topologia de conversão aliada a um circuito dedicado para ser aplicado no projeto RoboFEI, o mesmo retornará uma otimização em várias áreas do robô. Ao utilizar uma placa que forneça uma maior potência será possível a implementação de solenoides e capacitores mais compactos, que além de deixarem o robô mais leve resultará em um aumento no espaço interno livre, permitindo a implementação de outras inovações.

Mesmo após a conclusão do projeto com a realização de mais testes com a placa final é possível a implementação de um melhor controle do ângulo aumentando a frequência do Clk_select e adicionando mais um bit na variável do Angulo, além da implementação de um controle para a força do chute através da variação do tempo total de descarga, assim melhorando o desempenho do circuito para o robô.

Após os testes com o protótipo foi possível validar os valores encontrados através das simulações, o tempo de recarga apresentou um valor de um segundo maior do que o esperado, mas ainda apresenta um melhor desempenho do que a topologia boost, além da possibilidade de reduzir esse tempo aumentando a corrente consumida através do ajuste de um resistor.

8 BIBLIOGRAFIA

AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Prentice Hall, 2000.

AIS, T. **AIS Team Description Paper**, 2017. Disponível em:
<<http://wiki.robocup.org/images/f/f9/Robocupssl2018-AIS.pdf>>. Acesso em: 2018
Outubro 2018.

ALTIUM LLC. **About Altium**, 2018. Disponível em:
<<https://www.altium.com/company/about-altium/about-u>>. Acesso em: 10 Novembro
2018.

BRAGA, C. **Mecanismo de chute com direção variável**. São Bernado do Campo. 2017.

DINWOODIE, L. **Texas Instruments**, 17 Novembro 2016. Disponível em:
<<https://training.ti.com/understanding-basics-flyback-converter>>. Acesso em: 13 Outubro
2018.

DOKIC, B. **Power Electronics converters and regulators**. [S.l.]: Springer, 2015.

GUALTER, E. **SISTEMA DE PASSE PARA O FUTEBOL DE ROBÔS**. [S.l.]. 2013.

HALLIDAY, R. **Fundamentos de Física 3 - Eletromagnetismo**. [S.l.]: LTC, 2012.

INSTITUTO NEWTON C BRAGA. **Solenóide**, 2016. Disponível em:
<<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/3890-mec095>>. Acesso
em: 2018 Novembro 2018.

IPC. **IPC-2221: Generic Standard on Printed Board Design**. [S.l.]: [s.n.], 1998.

LINEAR TECHNOLOGY. **LTspice design center**, 2019. Disponível em:
<<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>>. Acesso em: 06 Abril 2019.

MAXIM. **Maxim Integrated**, 22 Julho 2009. Disponível em:
<<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/725>>. Acesso em: 16
Outubro 2018.

ROBOCUP. RoboCup Federation. **RoboCup**, 2016. Disponível em:
<<http://www.robotcup.org/photos>>. Acesso em: 18 Agosto 2018.

ROBOCUP. **RoboCup wiki**, Agosto 2017. Disponível em:
<http://wiki.robotcup.org/File:Small_Size_League_-_Rules_2018_Diff.pdf>. Acesso em:
20 Agosto 2018.

ROBOFEI. **RoboFEI 2010 Team Description Paper**, 2010. Disponível em:
<https://fei.edu.br/robofei/tdp/2010_SSL_TDP_RoboFEI.pdf>. Acesso em: 15 Outubro
2018.

ROBOFEI. FEI. **RoboFEI**. Disponível em: <<https://fei.edu.br/robofei/robots.html>>.
Acesso em: 15 Agosto 2018.

SEDRA, A. **Microeletrônica**. São Paulo: Pearson Prentice, 2007.

SERGIO, F. **Design with operational amplifiers and analog integrated circuits**.
Singapura: McGRAW-HILL, 1988.

SIMAS, E. UFBA. **DEE UFBA**, 2011. Disponível em:
<<http://www.dee.eng.ufba.br/home/simas/07-ElePot-conversoresDC-DC.pdf>>. Acesso
em: 23 Agosto 2018.

TIGERS, M. **Extended Team Description for RoboCup 2018**, 2017. Disponível em:
<<http://wiki.robotcup.org/images/f/fa/Robocupssl2018-paper31.pdf>>. Acesso em: 20
Outubro 2018.

TODD, P. **Snubber Circuits: theory, design and application**. UNITRODE
CORPORATION. [S.l.]. 1993.

TOMASZUK, A. High efficiency high step-up DC/DC converters. **TECHNICAL SCIENCES**, 2011. Disponivel em:

<<https://pdfs.semanticscholar.org/3b16/8b56695558fda2dca2fefb424da0e331de14.pdf>>.