

PAULA GOIS DE CARVALHO

Estudo de métodos “anti-spark” para circuitos eletrônicos

Paula Gois de Carvalho

Estudo de métodos “anti-spark” para circuitos eletrônicos

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador (a): Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena


C331e	<p>Carvalho, Paula Gois de Estudo de métodos "anti-spark" para circuitos eletrônicos / Paula Gois de Carvalho – Guaratinguetá, 2021. 30 f : il. Bibliografia: f. 29</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena</p> <p>1. Circuitos eletrônicos. 2. Engenharia de software. 3. Descargas elétricas. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.38.031</p>
-------	---

Luciana Máximo
Bibliotecária CRB-8-3595

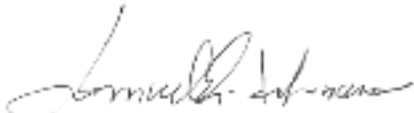
PAULA GOIS DE CARVALHO


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA


Prof. Dr. Daniel Julien Barros da Silva Sampaio
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Leonardo Mesquita
UNESP-FEG


Prof. Dr. Daniel Julien Barros da Silva Sampaio
UNESP-FEG

Março 2021

Dedico este trabalho de modo especial, à minha família, à equipe FEG Robótica e a todos os amigos que me assistiram nos últimos anos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento;

aos demais professores da instituição que de alguma forma colaboraram com a minha formação;

aos meus pais *Walter Carvalho da Cruz e Monica Gois Carvalho da Cruz*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos;

à minha irmã *Raquel Gois de Carvalho*, que sempre foi para mim um exemplo a ser seguido;

aos membros da equipe FEG Robótica que dividiram comigo a paixão pela robótica e ajudaram a tornar a caminhada da graduação menos árdua;

às integrantes da República Bem-Me-Quer que foram fundamentais para o meu crescimento como estudante e como pessoa e que me proporcionaram uma segunda família;

ao meu companheiro de vida, que me deu foco, força e paciência para que chegasse vitoriosa ao fim dessa jornada, Felipe Barbosa da Silva.

RESUMO

Este trabalho tem como foco um problema muito comum em circuitos eletrônicos que possuem uma elevada tensão de alimentação, o arco voltaico. Gerado pela corrente de irrupção que durante a comutação de um circuito rompe a barreira de isolamento entre os terminais e gera uma descarga de energia que dependendo da intensidade pode comprometer o funcionamento de componentes e equipamentos. Além disso, a presença do capacitor de hold-up, utilizado para sustentar por um curto período de tempo a tensão do circuito, tem como consequência a agravação desse fenômeno, considerando que a carga desse componente demanda uma quantidade de corrente considerável ao se alimentar o circuito. Há diversas formas de se solucionar esse efeito, entre elas a adição de um termistor NTC, de um circuito de slew-rate na arquitetura elétrica do projeto, entre outros. Com o objetivo de testar a solução escolhida, primeiramente foram realizadas simulações em softwares de criação de projetos eletrônicos, posteriormente testes em bancada e finalmente a aplicação na placa eletrônica em si. Para o circuito em questão foi escolhida a segunda proposta, por mostrar-se mais robusta, viável e de fácil aplicação, além dos componentes serem encontrados com facilidade. Os resultados se mostraram satisfatórios e aplicáveis às condições do projeto, a presença do circuito realmente extinguiu o arco voltaico.

PALAVRAS-CHAVE: Arco voltaico. Corrente de irrupção. Capacitor de hold-up. Termistor NTC. Circuito de slew-rate.

ABSTRACT

This work focuses on a very common problem in electronic circuits that have a high supply voltage, the electric arc. Generated by the inrush current that, when switching a circuit, breaks the isolation barrier between the terminals and generates an energy discharge that, depending on the intensity, can compromise the functioning of components and equipment. In addition, the presence of the hold-up capacitor, used to sustain the circuit voltage for a short period of time, has the effect of aggravating this phenomenon, considering that the load of this component demands a considerable amount of current when feeding the circuit. There are several ways to solve this effect, including the addition of an NTC thermistor, a slew-rate circuit in the project's electrical architecture, among others. In order to test the chosen solution, simulations were first performed in software for creating electronic projects, then bench tests and finally the application on the electronic board itself. For the circuit in question, the second proposal was chosen, as it proves to be more robust, viable and easy to apply, in addition to the components being easily found. The results were satisfactory and applicable to the conditions of the project, the presence of the circuit really extinguished the electric arc.

KEYWORDS: Electric arc. Inrush current. Hold-up capacitor. NTC thermistor. Slew-rate circuit.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	CIRCUITO ELETRÔNICO	9
2.1	OBJETIVO	9
2.2	PROJETO	10
2.3	FUNCIONAMENTO	10
3	MOTIVAÇÃO DO ESTUDO	12
3.1	CAPACITOR DE HOLD-UP	12
3.2	ARCO ELÉTRICO	13
3.3	SOLUÇÃO	15
3.3.1	Termistor NTC	15
3.3.2	Carga manual do capacitor de hold-up	17
3.3.3	Controle da taxa de crescimento da tensão de alimentação (Slew-rate)	18
4	APLICAÇÃO	21
4.1	ANÁLISE DO CIRCUITO.....	22
4.2	APLICAÇÃO NA PLACA ELETRÔNICA.....	24
5	CONCLUSÃO	28
	REFERÊNCIAS	29

1 INTRODUÇÃO

Independente da aplicação, o uso de placas eletrônicas se tornou um grande avanço e proporcionou ao meio da eletrônica uma enorme expansão de usuários e projetos. Dentre os segmentos que incentivaram esse crescimento, a robótica hobbysta foi um dos principais responsáveis. Seja para categoria de combate, sumô ou desafios inteligentes, isso chamou a atenção de diversos estudantes, que viram uma oportunidade para aplicar e aprofundar conhecimentos e desenvolver projetos próprios. Assim nasceu a Equipe FEG Robótica.

Com a premissa de desenvolver todos os projetos utilizados na equipe para dessa forma agregar cada vez mais conhecimento, todas as placas eletrônicas utilizadas foram idealizadas pelos alunos membros da equipe, e dessa forma ano após ano os projetos foram sendo aprimorados com base nas vivências em testes e competições. Com o passar do tempo os robôs receberam motores novos e mais potentes e baterias maiores para se tornarem mais robusto e acompanharem a evolução dos projetos que eram destaque. Esse avanço gerou a necessidade de placas eletrônicas que acompanhassem a robustez e fossem capazes de controlar os robôs sem problemas de funcionamento e performance.

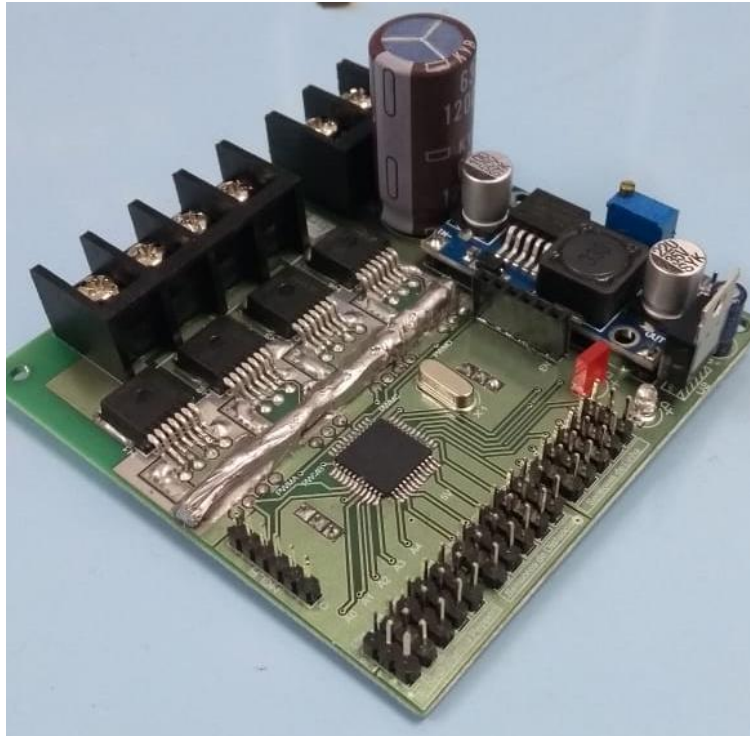
A junção de um motor que demanda uma alta potência e uma bateria de alto valor de tensão que por vezes não é capaz de suprir essa necessidade em um curto período de tempo, requisitou a adição de um capacitor de hold-up no circuito da placa para cobrir essa falha. Porém, isso acarretou no surgimento do efeito de arco voltaico que é indesejado pois pode causar danos aos componentes do circuito e afetar o funcionamento dos robôs. Este trabalho irá analisar as causas e efeitos desse fenômeno, bem como algumas soluções para evitar que ele ocorra.

2 CIRCUITO ELETRÔNICO

O circuito eletrônico que motivou o estudo proposto, e que será utilizado durante todo o seu desenvolvimento, teve o início de sua concepção no ano de 2012, junto com a criação da equipe FEG Robótica. A equipe foi criada por um grupo de alunos da UNESP de Guaratinguetá com o objetivo de desenvolver projetos ligados à área de robótica, aplicando os conhecimentos adquiridos ao longo da graduação.

Desde a criação da equipe o projeto eletrônico já passou por diversas modificações pela necessidade de melhorias. A versão utilizada como base para análise, mostrada na Figura 1, foi projetada no ano de 2018 e confeccionada em 2019.

Figura 1 – Foto da placa eletrônica.



Fonte: Autoria própria.

2.1 OBJETIVO

Os projetos de robótica desenvolvidos controlados pela placa eletrônica citada são utilizados para competir pela categoria de robôs de sumô autônomo. Basicamente o objetivo de um robô de sumô é retirar o seu oponente de uma arena circular, obedecendo determinadas regras de peso, tamanho e programação. Porém, como o robô deve ser autônomo, não é permitida nenhuma interferência durante a partida, ou seja, todas as ações e movimentos são

previamente programados e a partir da interação entre os sensores utilizados e as modificações do meio exterior o robô deve executar de forma autossuficiente os movimentos desejados.

Para que o sistema descrito funcione se fazem necessários alguns componentes básicos, são eles: estrutura mecânica que permita mobilidade, sensores que detectem objetos, sensores que detectem os limites da arena, fonte de alimentação e controlador que seja capaz de integrar todos esses componentes, que no caso é a placa eletrônica a ser estudada.

2.2 PROJETO

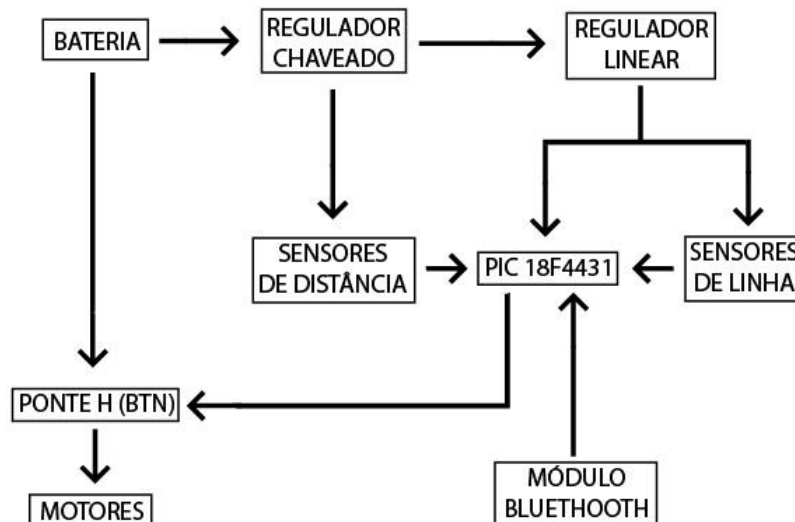
A concepção da placa se iniciou com o estudo dos componentes e elementos que são necessários para a montagem de um robô, como os motores, sensores e baterias. A partir disso foram feitas diversas pesquisas e testes para desenvolver o melhor projeto a fim de integrar todos esses componentes.

O circuito é composto de componentes discretos como diodos, capacitores, resistores entre outros, e também circuitos integrados, como módulos de Ponte H e microcontrolador PIC. Vale ressaltar que um requisito proposto aos projetos eletrônicos sempre foi reduzir ao máximo o uso de projetos comerciais prontos, com o intuito de agregar mais conhecimento à formação acadêmica.

2.3 FUNCIONAMENTO

Na figura 2 apresenta-se um fluxograma simplificado da placa.

Figura 2 - Fluxograma da placa.



Fonte: Autoria própria.

A placa é alimentada por uma bateria que energiza diretamente os módulos de Ponte H. O PIC manda sinais a estes de acordo com a interação entre os sinais recebidos pelos sensores, o código de programação gravado e a estratégia escolhida. Como esses módulos são chaves eletrônicas, de acordo com a combinação delas os motores são alimentados e dessa forma podem ser acionados tanto em um sentido quanto em outro.

Além disso, a tensão da bateria passa pelo regulador chaveado que a converte para 12V, alimentando os sensores de distância. Em seguida esses 12V passam pelo regulador linear que gera 5V, que por sua vez alimenta o microcontrolador PIC, os sensores de linha e o módulo Bluetooth.

O módulo Bluetooth recebe a estratégia selecionada pelo aplicativo e também o comando para ligar ou desligar o robô.

3 MOTIVAÇÃO DO ESTUDO

Durante o funcionamento do robô há diversos fatores que acarretam uma maior demanda de energia da bateria, como por exemplo: inversão de sentido de rotação dos motores quando há mudança no sentido de deslocamento, aumento do esforço do eixo dos motores, ou total travamento desses eixos.

Muitas vezes a potência requerida pelas ações citadas é superior à capacidade de fornecimento da bateria, causando a sua descarga temporária, desenergizando o circuito, ou seja, desligando o robô. Para evitar que isso aconteça, uma solução encontrada foi adicionar um capacitor, chamado de hold-up, em paralelo com a alimentação de modo a conservar a tensão durante esse breve momento de descarga, desse modo, o capacitor é capaz de suprir a placa, mantendo a tensão aproximadamente constante.

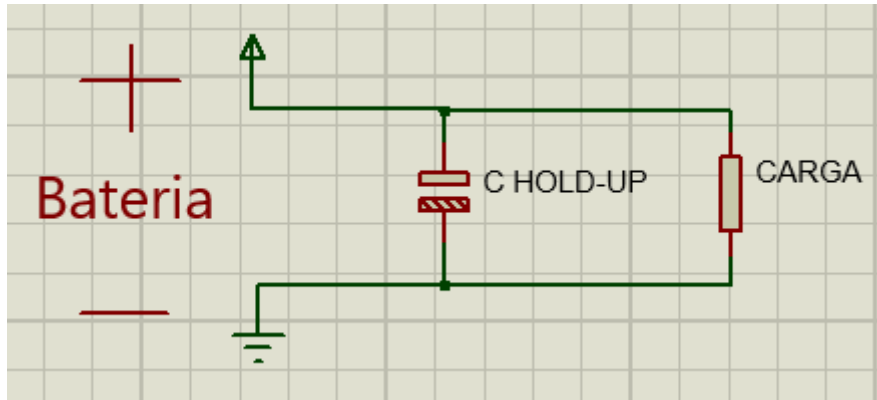
Porém, a presença desse capacitor causa um efeito indesejado, chamado de arco voltaico, ao se conectar a bateria à placa do circuito, que dependendo da intensidade pode afetar diretamente o seu funcionamento, danificando componentes e até o conector de entrada.

3.1 CAPACITOR DE HOLD-UP

Amplamente utilizado para sustentar a tensão de alimentação, o capacitor de hold-up é uma forma simples de evitar que haja uma queda de energia indesejada por um determinado período de tempo. Seu princípio de funcionamento é baseado simplesmente na curva de descarga do capacitor que diminui gradativamente seu nível de tensão, seguindo uma determinada constante de tempo τ .

A Figura 3 mostra como seria a aplicação em um circuito. Em paralelo com a alimentação, o capacitor é carregado com a mesma tensão da fonte, e quando há uma ruptura momentânea de fornecimento de energia, o capacitor que assume a posição de fornecedora de tensão por esse breve período de tempo.

Figura 3 – Aplicação do capacitor de hold-up.



Fonte: Autoria própria.

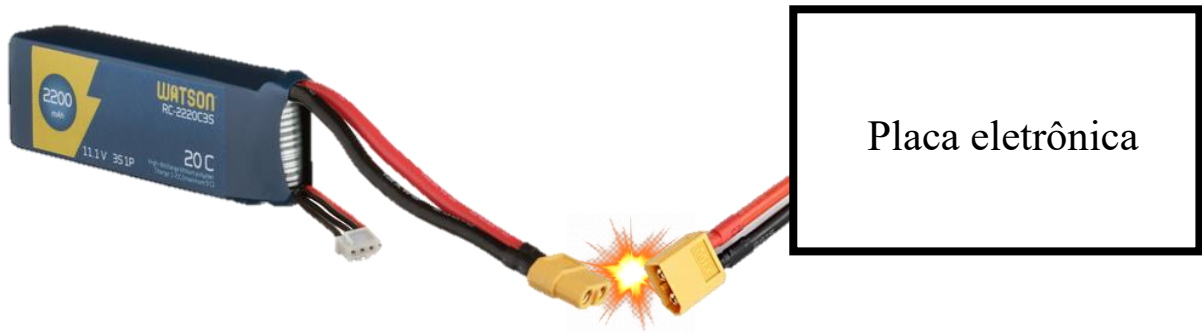
Em relação à escolha do capacitor, deve ser considerando que quanto maior a capacitância maior a capacidade de armazenamento desse componente, por esse motivo foi utilizado um capacitor de valor alto, para que suportasse a tensão por um tempo considerável.

Além disso, os motores do robô também influenciaram bastante nessa escolha. Considerando que os motores utilizados possuem escova e com isso geram muito ruído eletromagnético, eles demandam uma grande quantidade de energia em um período de tempo muito curto, e mesmo que a alimentação utilizada possua valores nominais adequados ao projeto, em determinadas situações, como as citadas anteriormente não é fornecida potência suficiente para supri-los.

3.2 ARCO ELÉTRICO

Quando uma comutação ocorre em um circuito elétrico, por exemplo o acionamento de um circuito ao se conectar uma bateria, como mostrado na Figura 4, caso a corrente elétrica seja alta o suficiente, um arco elétrico se forma entre as duas superfícies de contato a fim de se opor ao processo de transferência de elétrons. Esse fenômeno ocorre, pois, há uma ruptura dielétrica do meio isolante entre os terminais de conexão, ou seja, a isolamento feita pelo ar é quebrada, conduzindo elétrons através de um fluxo de corrente, o que gera uma fagulha instantânea, caracterizando o arco elétrico.

Figura 4 – Exemplo de ocorrência do arco elétrico.



Fonte: Autoria própria.

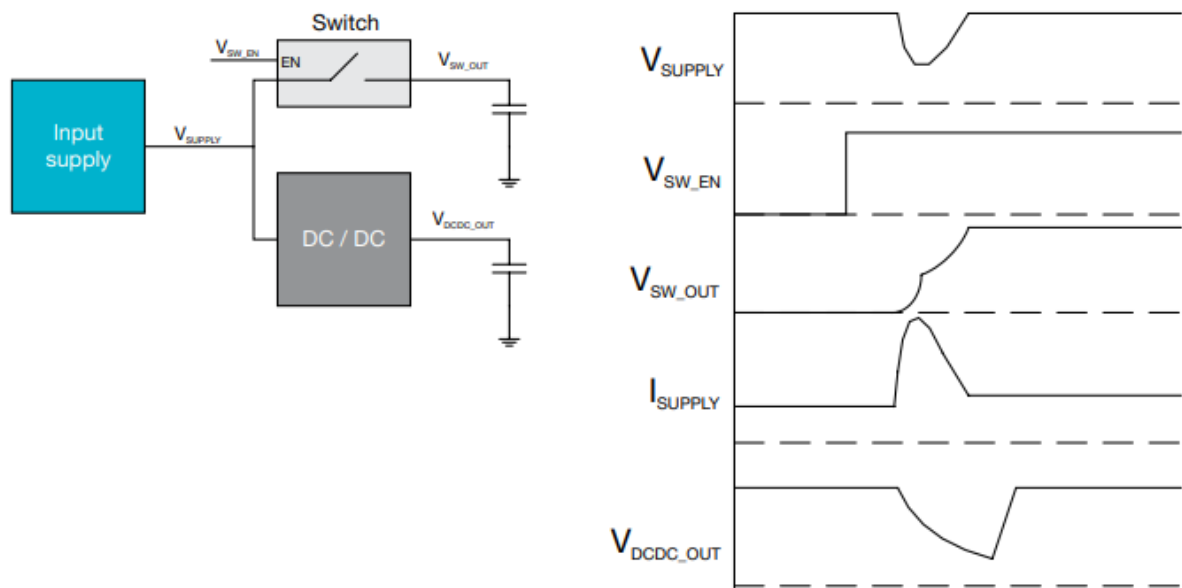
Essa centelha elétrica é proporcional à capacitância do circuito, isso porque considerando que os capacitores são armazenadores de energia, quanto maior a capacidade desse componente de acumular tensão, mais corrente irá fluir até que ele se carregue por completo e as tensões se equilibrem. E somado a isso, para um instante $t = 0$, os capacitores representam um curto para o circuito eletrônico, gerando um caminho livre para a corrente proveniente da bateria circular.

Além disso, a bateria utilizada também está diretamente ligada a esse fenômeno, já que uma tensão maior facilita a ionização da camada de ar entre os dois contatos, facilitando o processo de ruptura dielétrica do ar.

Esse fenômeno pode gerar danos irreparáveis em componentes eletrônicos sensíveis, interferindo significativamente no funcionamento de um circuito ou até mesmo o impossibilitando. Somado a isso, o calor gerado no processo pode danificar os conectores, cabos e terminais.

Na Figura 5 é demonstrado o que acontece a um circuito sujeito ao efeito descrito. Quando a chave Switch é comutada há uma tensão transitória e um grande pico de corrente na alimentação de entrada (Input Supply). Isso acarreta em uma queda na tensão fornecida pela fonte (V_{SUPPLY}) que fica evidente enquanto a tensão V_{SW_OUT} aumenta. A queda da tensão V_{SUPPLY} gera um reset do conversor DC/DC, fazendo com que a tensão de saída desse componente, V_{DCDC_OUT} , decaia até a normalização da tensão da fonte. Esse cenário mostra como esse evento pode afetar de forma relevante todos os componentes ligados à fonte.

Figura 5 – Curvas características de um circuito com o efeito de arco voltaico.



Fonte: Texas Instruments (2019).

Para o circuito estudado, o arco elétrico era gerado ao se conectar a bateria à placa. Esse processo era repetido diversas vezes, pois por questões de preservação da bateria e de segurança era indicado desenergizar a placa sempre que possível, isso acarretava em várias ocorrências do fenômeno, sempre expondo o circuito. Tendo isso em vista realizou-se esse estudo a fim de se aplicar uma correção na placa eletrônica com o intuito de minimizar ou extinguir o efeito do arco elétrico gerado.

3.3 SOLUÇÃO

Há diversas soluções para problema exposto, as apresentadas nesse trabalho são baseadas no princípio de que para evitar o efeito do arco voltaico, deve-se limitar a corrente que irá fluir no circuito no momento em que ocorre a alimentação. Isso pode ser feito ou usando algum limitador de corrente, ou carregando o capacitor de entrada antes de energizar o resto da placa, assim, quando houver a comutação de fato não haverá uma grande incidência de corrente, diminuindo consideravelmente ou extinguindo o fenômeno.

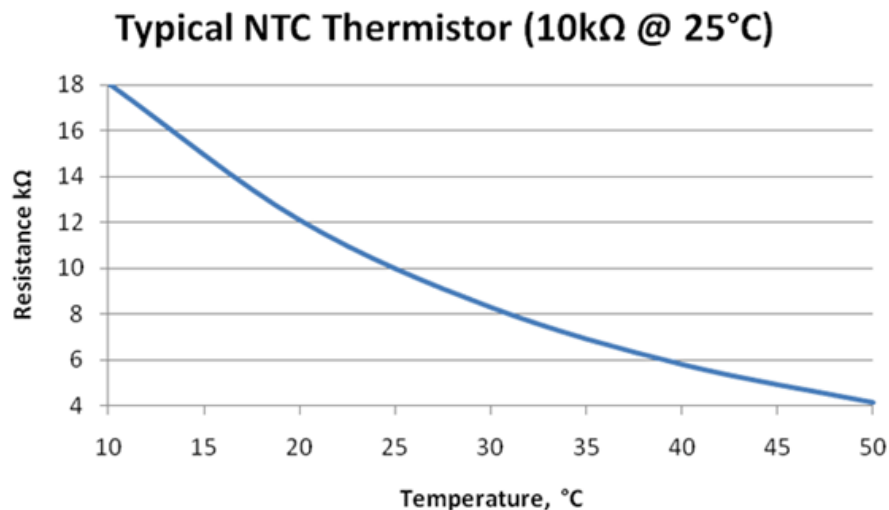
3.3.1 Termistor NTC

Considerando que um resistor dificulta a circulação de corrente, seria lógico adicioná-lo à entrada do circuito para fazer essa limitação, porém em circuitos que demandam uma alta

quantidade de energia isso pode se tornar um problema pois há uma perda de eficiência devido ao aquecimento desse componente. Levando isso em consideração, o termistor NTC apresenta-se como uma alternativa.

Um termistor tem a capacidade de alterar a sua resistência de acordo com a temperatura, para o NTC quanto maior a temperatura, menor a resistência, conforme mostrado na Figura 6. No circuito, atua como um resistor de resistência variável, nos primeiros instantes após a alimentação, o NTC apresenta uma resistência alta pois encontra-se em temperatura ambiente, à medida que a corrente começa a circular a temperatura vai aumentando e conseqüentemente a resistência diminuindo.

Figura 6 – Curva de variação de resistência em relação à temperatura do NTC.

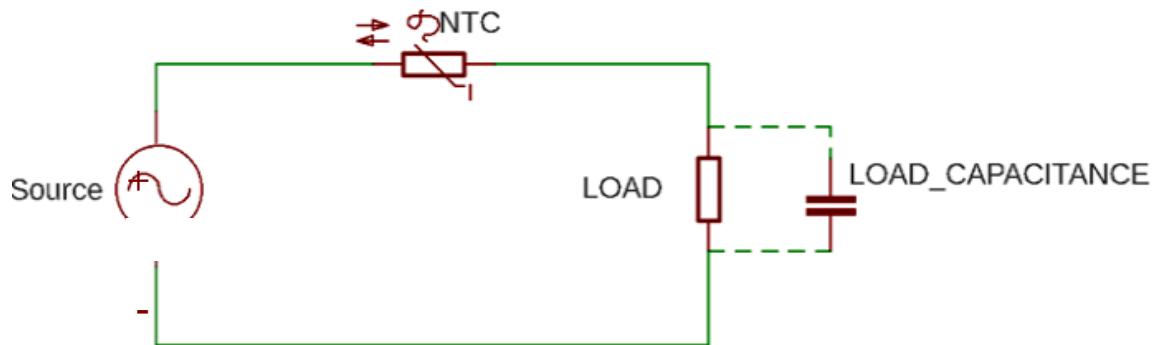


Fonte: Texas Instruments (2014).

Essa característica do NTC permite que a corrente seja limitada ao conectar-se a bateria, diminuindo a velocidade com que o capacitor de entrada é carregado, e por sua vez reduzindo o efeito de arco voltaico. E além disso, por mais que ainda haja uma perda de eficiência devido à presença de uma resistência a mais no circuito, é bem menor do que se fosse um resistor comum.

Um exemplo de utilização é apresentado na Figura 7, na qual o NTC é colocado entre a fonte e o circuito representado por uma capacitância proporcional.

Figura 7 – Modelo de aplicação do NTC.



Fonte: Circuit Digest (2019).

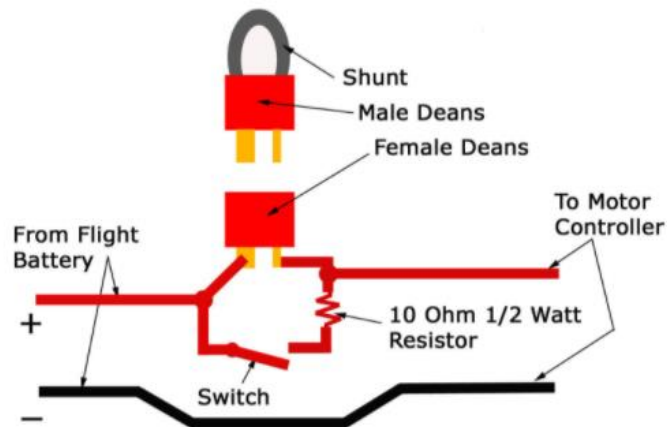
3.3.2 Carga manual do capacitor de hold-up

Uma outra solução muito utilizada é fazer o carregamento do capacitor de hold-up antes de energizar o restante do circuito. Dessa forma, não havendo uma grande diferença das tensões da bateria e da entrada do circuito, não haverá uma grande quantidade de corrente demandada, evitando a formação do arco voltaico.

A Figura 8 mostra como deve ser feita a utilização desse recurso. A carga do capacitor é feita por um fio com um resistor que liga a bateria ao circuito, com isso a constante τ do capacitor aumenta, diminuindo sua velocidade de carga. Primeiramente a chave “Switch” é fechada por um curto período de tempo, permitindo que o circuito seja alimentado e consequentemente o capacitor seja carregado. Em seguida um conector “Male Deans” com um fio “Shunt” mais robusto, que seja capaz de suportar a tensão e corrente provenientes da bateria é ligado ao conector principal “Female Deans”, formando uma outra conexão entre o circuito e a bateria. E para finalizar, a chave “Switch” é aberta, deixando apenas o outro caminho para a alimentação.

A escolha do valor do resistor depende da capacitância de hold up, considerando que a relação entre esses dois valores deve fornecer uma constante de carregamento suficientemente lenta para evitar o efeito de arco voltaico, porém sem afetar a velocidade de acionamento do circuito.

Figura 8 – Modelo de aplicação.



Fonte: Circuit Digest (2019).

3.3.3 Controle da taxa de crescimento da tensão de alimentação (slew-rate)

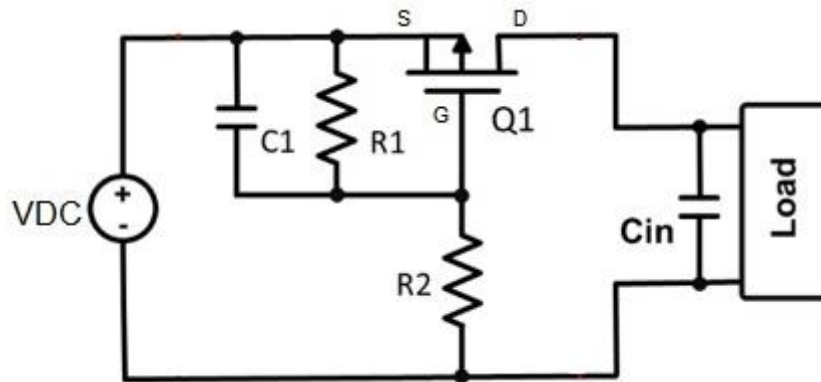
Esse método baseia-se no controle da tensão de alimentação de um circuito. Considerando que o arco voltaico surge quando em uma comutação do circuito há uma circulação instantânea de uma corrente elétrica suficientemente alta para romper a barreira do meio isolante, caso haja o controle dessa corrente, esse fenômeno não ocorrerá.

Para uma capacitância fixa, $C_{circuito}$, controlando-se a taxa com que uma chave em paralelo com a alimentação comuta do estado desligado para o ligado, fornecendo uma tensão $V_{alimentação}$, conseqüentemente também se controla a taxa com que a tensão e a corrente circulante $I_{circuito}$ aumentam. Essa relação é representada na equação 1.

$$I_{circuito} = C_{circuito} \times \frac{dV_{circuito}}{dt} \quad (1)$$

É muito comum utilizar o transistor MOSFET para essa aplicação, já que é simples de se trabalhar e não possui um alto custo. Esse componente é utilizado como uma chave ativa e em conjunto com um circuito RC, que age como um soft start, é capaz de realizar a proteção contra o arco voltaico. A Figura 7 mostra um exemplo dessa aplicação.

Figura 7 – Modelo de aplicação do circuito slew-rate.



Fonte: Power CTC (2020).

Inicialmente o circuito encontra-se desligado, considerando que o MOSFET não está polarizado e portando entre os terminais S e D há uma impedância muito alta, caracterizando um circuito aberto. Para ativar esse componente é necessária que a tensão entre G e S, V_{GS} , atinja o valor mínimo de theshold, $V_{GS(T)}$, para que haja a polarização e consequente condução de corrente.

A tensão V_{GS} é a igual à do capacitor C_1 , V_{C1} , e também à do resistor R_1 , V_{R1} então pode-se determinar V_{GS} utilizando as equações conhecidas de carga de um capacitor.

Para um circuito RC, a carga de um capacitor é dada pela equação 2:

$$V_C(t) = V_{DC} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (2)$$

A constante de tempo τ é obtida pelo produto do valor de R e de C, conforme mostrado na equação 3:

$$\tau = RC \quad (3)$$

Aplicando para o circuito representado pela Figura 7, temos a equação 4:

$$V_{C1}(t) = V_{DC} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}\right) \quad (4)$$

Considerando que V_{C1} é igual a V_{GS} montamos a equação 5:

$$V_{GS}(t) = V_{DC} \left(1 - e^{\frac{-t}{R_1 C_1}} \right) \quad (5)$$

Conclui-se então, que a tensão V_{GS} é influenciada pela constante de tempo τ , ou seja, o MOSFET não é polarizado instantaneamente quando a circuito é alimentado, o que influencia diretamente a corrente circulante. Desse modo o valor da corrente sobe progressivamente, acompanhando a constante de tempo τ , e não de modo instantâneo.

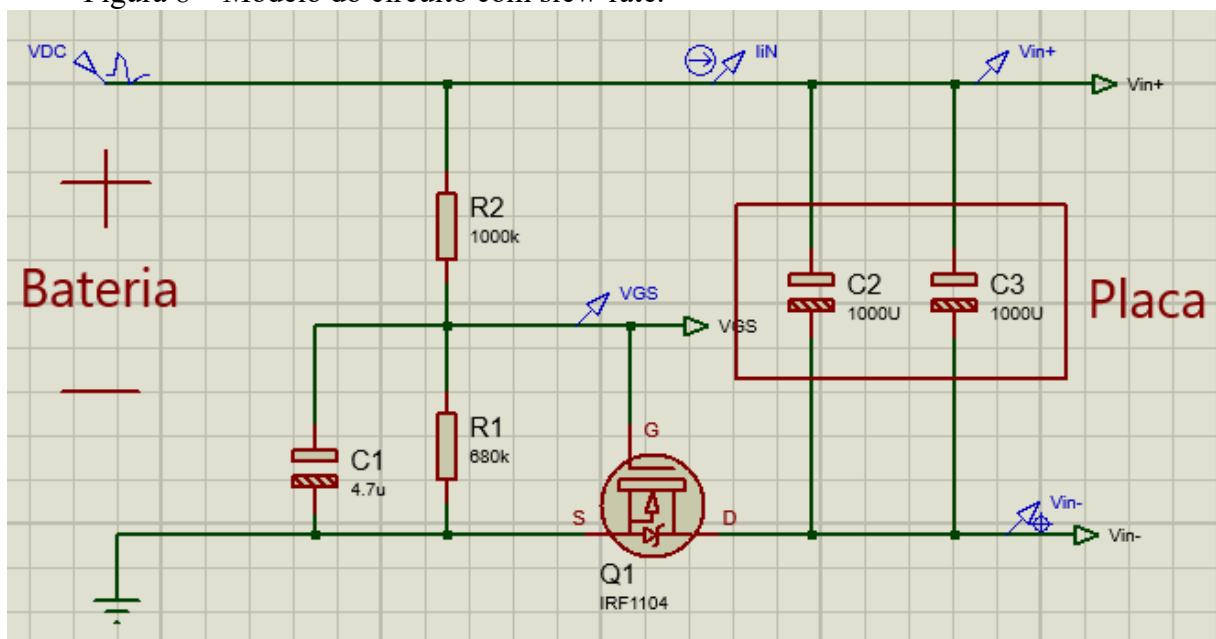
4 APLICAÇÃO

Para o circuito da placa foi escolhida a segunda solução, de controle da taxa de crescimento da tensão, por ser mais robusta e não sofrer tanto com perda de eficiência devido à temperatura, pois o MOSFET ainda se mostra uma opção melhor que o NTC por possuir resistência no estado “ligado” ($R_{DS(ON)}$) muito menor que o termistor, garantindo maior confiabilidade ao projeto. Em suma esse circuito é usado para carregar de forma gradativa o capacitor de entrada da placa, de hold-up, evitando que haja uma abrupta circulação de corrente no momento em que a placa for energizada pela bateria.

Primeiramente fez-se uma simulação no software Proteus para melhor entendimento do circuito, conforme mostrado na Figura 8.

Os componentes R_1 , R_2 , C_1 e Q_1 representam o mesmo circuito mostrado na Figura 8. Os capacitores C_2 e C_3 representam o capacitor de hold-up e a capacitância equivalente do restante do circuito, respectivamente.

Figura 8 – Modelo do circuito com slew-rate.



Fonte: Autoria própria.

A escolha do MOSFET IFR1104 foi feita tomando como base a alimentação do circuito de 35V e correntes de pico de 50A devido a comutação dos motores. O componente precisaria ser robusto o suficiente para suportar esses valores de tensão e corrente, e como esse transistor possui uma tensão V_{DSS} de 40V e uma corrente I_D máxima de 100A, atende ao requisito.

No caso dos resistores e do capacitor foram utilizados valores que atendessem tanto o divisor de tensão entre R_1 e R_2 , quanto gerar uma constante de tempo τ ($R_1 \times C_1$) suficiente para polarizar o MOSFET de forma a evitar o efeito de arco voltaico. Além disso também levou-se em conta que os valores de resistência fossem de ordem de grandeza menor do que as impedâncias de entrada do MOSFET, para que não houvesse nenhuma interferência e divisão de tensão no valor de acionamento do mesmo.

4.1 ANÁLISE DO CIRCUITO

Inicialmente ao se conectar a bateria ao circuito, representada pela tensão V_{DC} , não há circulação de corrente pois o MOSFET não está polarizado, caracterizando um circuito aberto entre os terminais S e D. A polarização ocorre progressivamente, acompanhando a constante de tempo τ , utilizando a equação (5), temos a equação (6):

$$V_{GS}(t) = V_{DC} \left(1 - e^{\frac{-t}{R_1 C_1}}\right) \rightarrow V_{GS}(t) = 35 \left(1 - e^{\frac{-t}{680k4,7u}}\right) \rightarrow V_{GS}(t) = 35 \left(1 - e^{\frac{-t}{3,196}}\right) \quad (6)$$

De acordo com o datasheet do MOSFET a tensão mínima de polarização é de 4V, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Datasheet do MOSFET IRF1104.

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	40	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.038	—	V/°C	Reference to 25°C, $I_D = 1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.009	Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 60A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	37	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 60A$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 40V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 32V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ C$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$

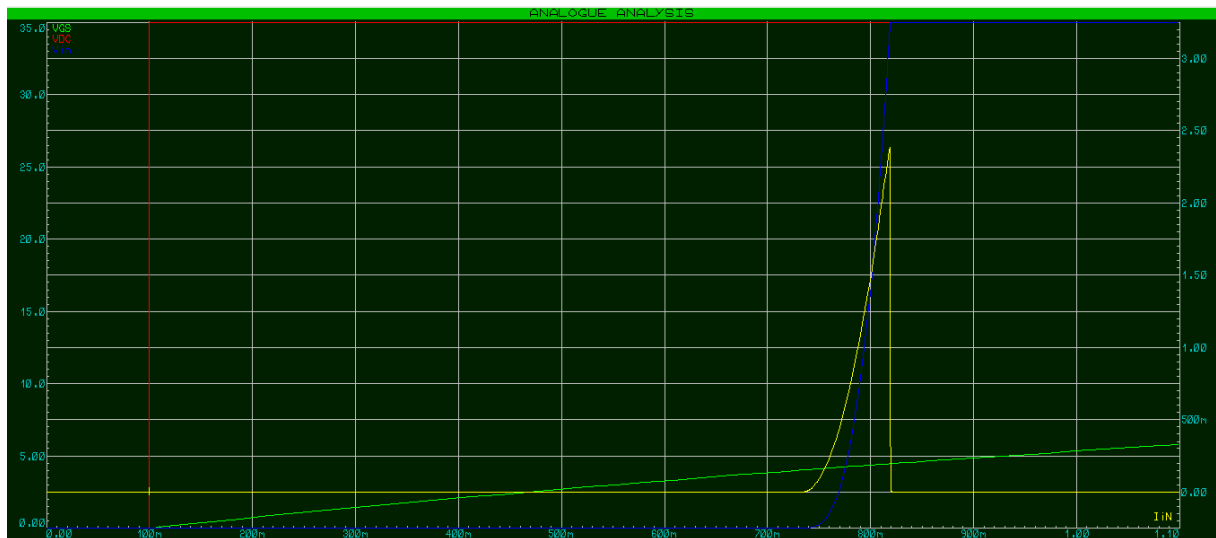
Fonte: International Rectifier (2014).

Então, quando atingisse a tensão mínima de 4 V entre os terminais G e S, o MOSFET deveria iniciar sua polarização, o que pode ser observado na Figura 10, gerada pela simulação do circuito no Proteus.

No gráfico é mostrada a tensão V_{in} em azul, a tensão V_{GS} em verde e a corrente I_{in} em amarelo. Nota-se que no instante em que a tensão V_{GS} atinge 4 V, os valores de V_{in} e I_{in} começam progressivamente a subir caracterizando efetivamente a ativação do circuito.

Em um determinado momento a corrente atinge um valor de pico e em seguida diminui até zerar seu valor, o que representa que os capacitores de entrada foram carregados, igualando sua carga à da fonte, então não há mais corrente circulante nessa fração do circuito.

Figura 10 – Simulação do circuito com slew-rate.

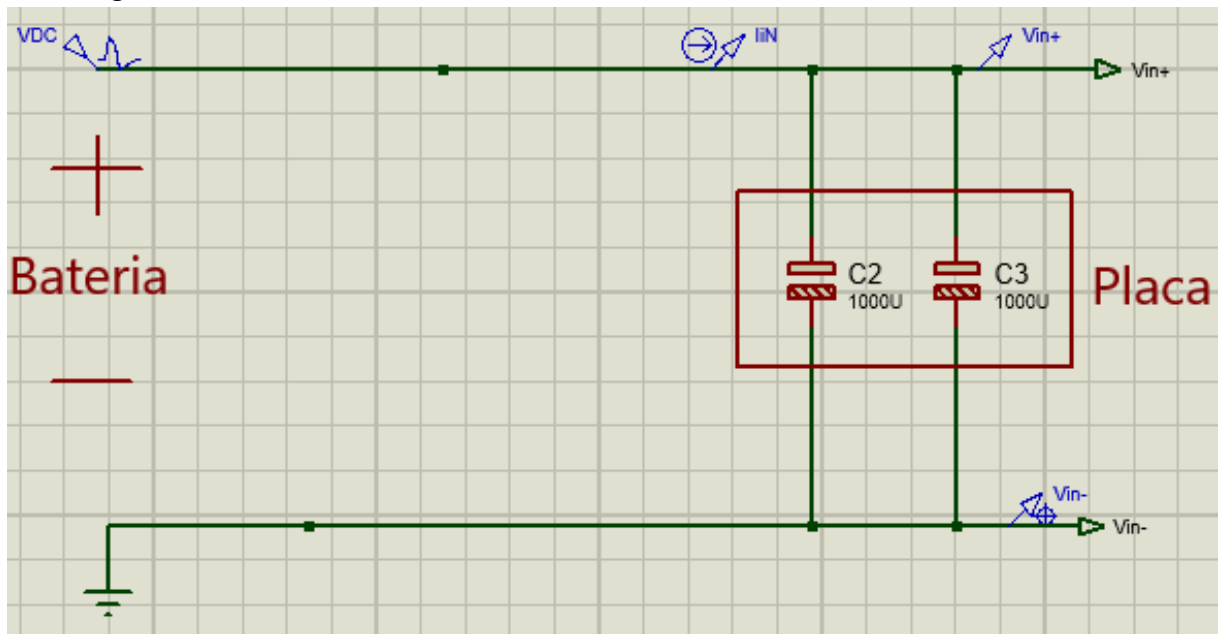


Fonte: Autoria própria.

Fazendo a simulação sem o circuito de slew-rate, como mostrado na Figura 11, obtemos uma situação completamente diferente. A corrente se eleva em uma velocidade muito maior e de forma mais agressiva e atinge um valor de pico muito mais alto, o que proporciona todas as condições necessárias para a formação do arco voltaico.

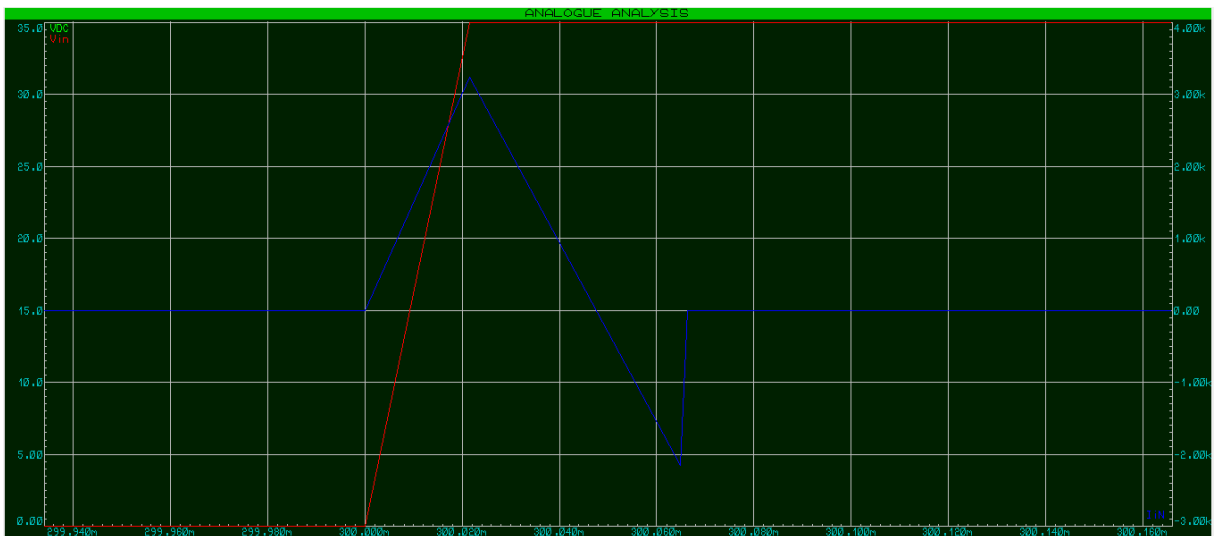
Deve-se levar em conta que alguns dos valores simulados são ideais, não considerando as impedâncias internas dos componentes e da fiação, então os valores de corrente obtidos são superestimados em relação à realidade.

Figura 11 – Modelo do circuito sem slew-rate.



Fonte: Autoria própria.

Figura 12 - Simulação do circuito sem slew-rate.



Fonte: Autoria própria.

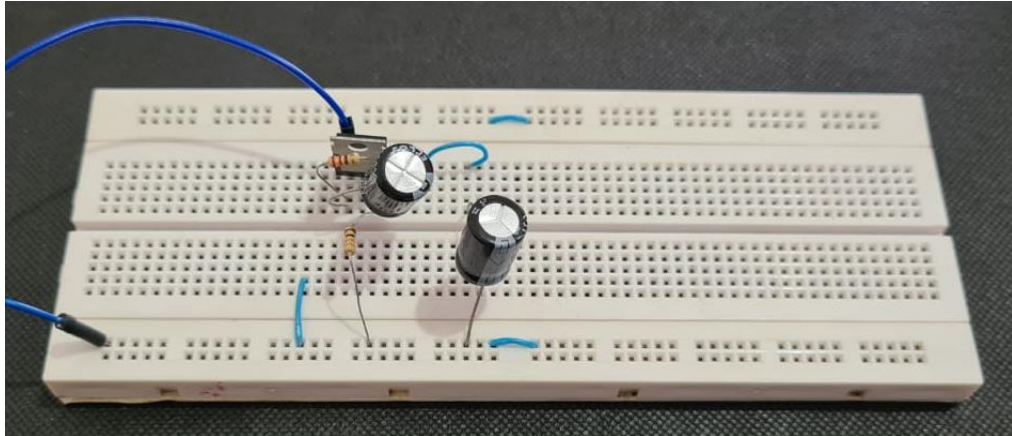
Por meio dessa análise pode-se observar o funcionamento detalhada do circuito de slew-rate, comprovando sua eficácia e utilidade em conter o efeito de arco voltaico.

4.2 APLICAÇÃO NA PLACA ELETRÔNICA

Para testar o circuito slew-rate fisicamente, primeiro foi montado em um protoboard e testado separadamente, conforme mostrado na Figura 13. Lembrando que os valores de tensão e corrente dos componentes utilizados foram diferentes do projeto final da placa, devido a

limitação das trilhas do protoboard. Os resultados obtidos foram satisfatórios e coerentes com os da simulação, o que promoveu mais segurança para fazer a implementação na placa eletrônica.

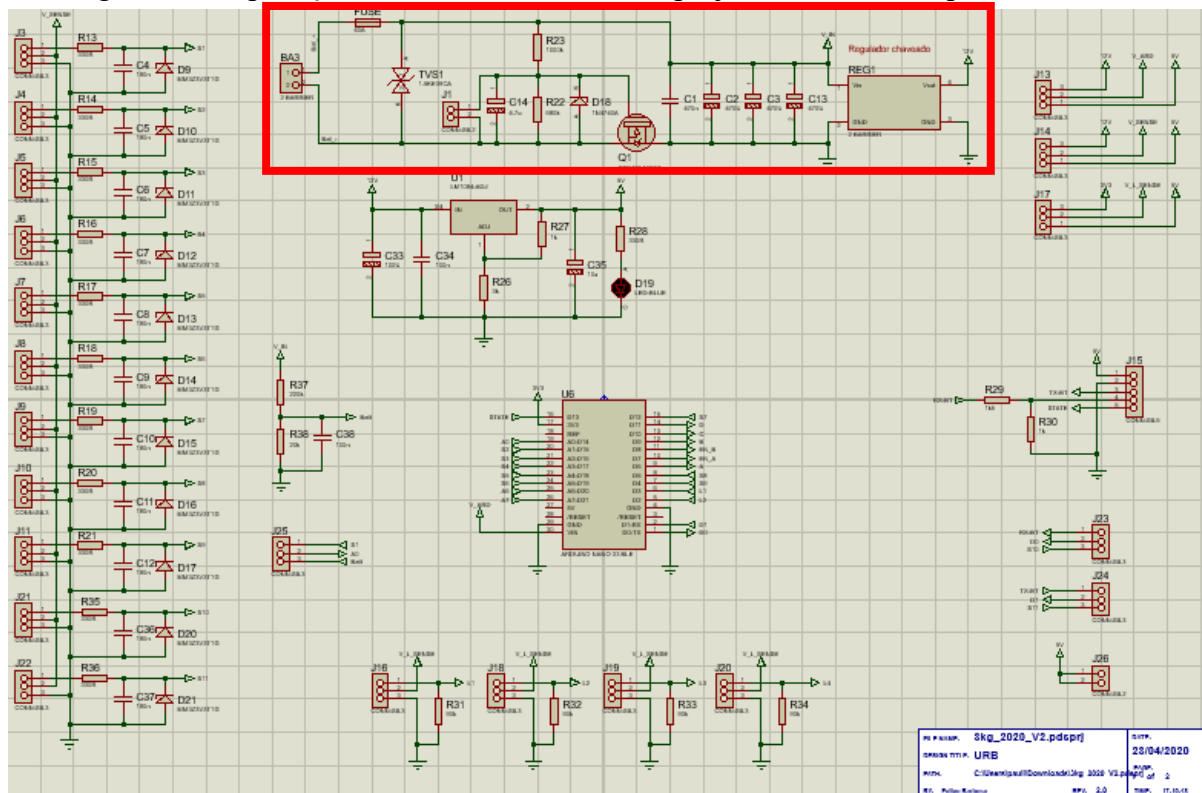
Figura 13 – Teste do circuito slew-rate em bancada.



Fonte: Autoria própria.

Após a validação desse circuito foi feito um novo projeto da placa eletrônica, no qual já foi feita a sua incorporação para evitar possíveis falhas no funcionamento e dar mais confiabilidade ao projeto. A Figura 14 mostra o circuito slew-rate já integrado ao circuito da placa.

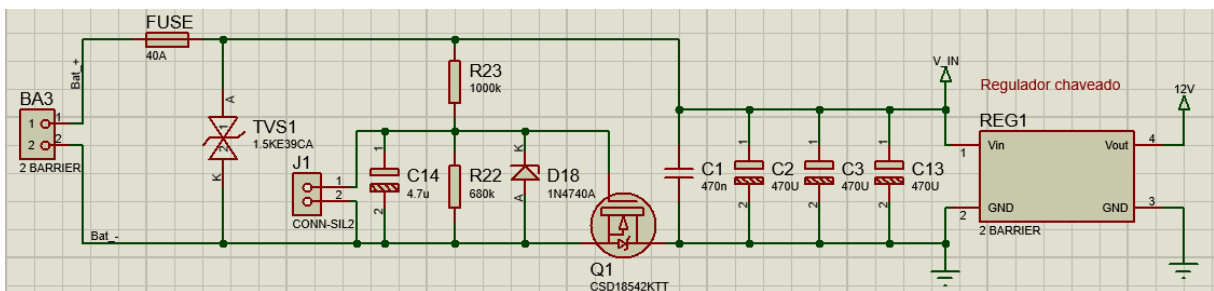
Figura 14 – Aplicação do circuito slew-rate no projeto eletrônico da placa.



Fonte: Autoria própria.

Ampliando a parte destacada da Figura 14 na Figura 15, é possível notar que foi adicionado um diodo D18 em paralelo com o MOSFET. Seu intuito é de grampear a tensão V_{GS} e proteger o componente caso haja uma alteração indesejada no seu valor, além de permitir uma maior flexibilidade quanto ao uso de baterias com tensão maior, pois mesmo que o divisor de tensão composto pelos resistores não seja suficiente para manter o valor de V_{GS} dentro dos limites aceitáveis do componente, o diodo o fará. Além disso os outros componentes que não foram citados fazem parte da arquitetura já existente.

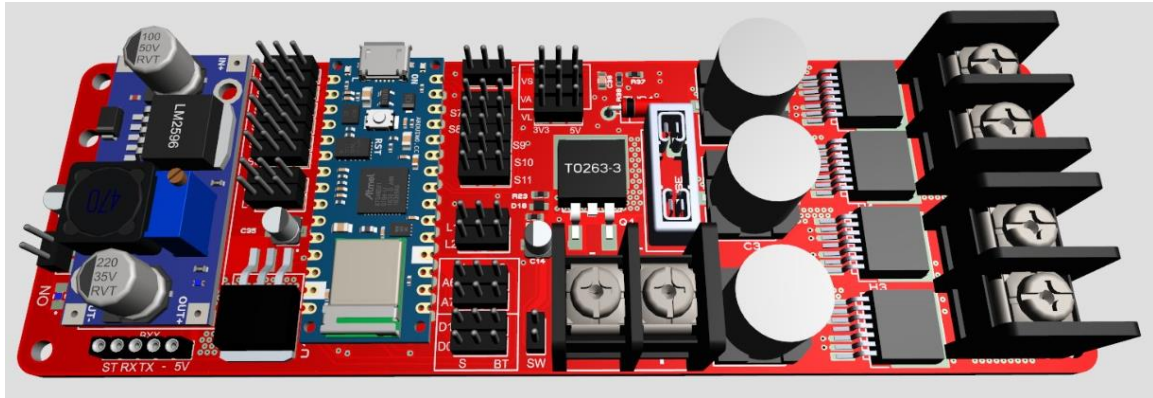
Figura 15 – Circuito slew-rate integrado ao projeto da placa.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 16 mostra uma simulação de como ficará a placa assim que estiver concluída.

Figura 16 – Visualização 3D da placa eletrônica.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

Muitas vezes em um circuito eletrônico uma solução para um determinado problema promove preocupações com outras partes do projeto. Como por exemplo a adição do capacitor de hold-up que no caso foi utilizado para resolver o problema de queda de tensão de alimentação quando há uma grande exigência de potência da bateria. A presença desse componente de alta capacitância na entrada do circuito gerou um outro problema, chamado arco voltaico.

Esse fenômeno pode causar danos irreparáveis em componentes, inutilizando o circuito. Como foi apresentado, existem algumas maneiras de se extinguir ou ao menos amenizar esse efeito, uma delas é a adição de um circuito de slew-rate junto a alimentação.

Por mais que aparente ser simples, essa solução se mostrou eficaz, viável e robusta, características primordiais para se levar em conta considerando que o projeto vem de uma equipe de robótica com o orçamento limitado.

Um outro ponto a ser destacado é a importância da premissa da equipe de sempre desenvolver seus próprios projetos ao invés de utilizar eletrônicas prontas que estão disponíveis no mercado. A maturidade adquirida por pesquisar e desenvolver os circuitos, além de buscar a causa raiz dos problemas encontrados, é gratificante e extremamente importante para a formação de um aluno e profissional completo.

REFERÊNCIAS

- GUPTA, Sourav. Inrush current: causes, effects, protection circuits and design techniques. **Circuit Digest**, 2019. Disponível em: <https://circuitdigest.com/tutorial/inrush-current-causes-effects-protection-circuits-and-design-techniques>. Acesso em: 05 abr. 2020.
- HOW do I reduce the inrush current? **PowerCTC**, 2020. Disponível em: <https://www.powerctc.com/en/node/4564>. Acesso em: 13 ago. 2020.
- HOW to avoid sparks when connecting battery. **DIY Dones**, 2014. Disponível em <https://diydrone.com/profiles/blogs/how-to-avoid-sparks-when-connecting-battery>. Acesso em: 06 abr. 2020.
- MATTEDE, Henrique. Arco elétrico, o que é? como é formado? **Mundo da elétrica**, 2018. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/arco-eletrico-o-que-e-como-e-formado/>. Acesso em: 05 abr. 2020.
- MIRSKY, Gregory. Calculate hold-up capacitor size for switching, linear regulators. **Electronic Design**, 2013. Disponível em: <https://www.electronicdesign.com/power-management/article/21796093/calculate-holdup-capacitor-size-for-switching-linear-regulators>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- RECTIFIER INTERNATIONAL. Datasheet: IRF1104PbF. **Mouser Electronics**, 2014. Disponível em: <https://br.mouser.com/datasheet/2/196/irf1104pbf-1732436.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- TEXAS INSTRUMENTS. **Managing inrush current**. Texas: Texas Instruments Incorporated, 2014. 13 p.
- TEXAS INSTRUMENTS. **11 ways to protect your power path**. Texas: Texas Instruments Incorporated, 2019. 62 p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

KAYAMA, M. E. **Carga e descarga de capacitor**. Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá/UNESP, 2021. 3 f. (Roteiro para laboratório de eletricidade, magnetismo e ótica)

SILVA, F. B. **Desenvolvimento de eletrônica para controle de motores DC com escova**, 2018. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

MEGGIOLARO, A.M. Tutorial em robôs de combate. **Robot BMSTU**, 2006. Disponível em [http://www.robot.bmstu.ru/files/books/\[Robotic\]%20Tutorial%20RioBotz.pdf](http://www.robot.bmstu.ru/files/books/[Robotic]%20Tutorial%20RioBotz.pdf). Acesso em: 09 abr. 2020.