

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ – UFPR
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUAN OSHIMA
GRR20167834

DESENVOLVIMENTO DE PONTE H PARA ACIONAMENTO DE MOTOR DE
CORRENTE CONTÍNUA COM CONTROLE DE VELOCIDADE

CURITIBA
2022

LUAN OSHIMA

DESENVOLVIMENTO DE PONTE H PARA ACIONAMENTO DE MOTOR DE
CORRENTE CONTÍNUA COM CONTROLE DE VELOCIDADE

TCC apresentado ao curso de Engenharia Elétrica,
Setor de Tecnologia, Universidade Federal do
Paraná, como requisito parcial à obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. André Augusto Mariano

CURITIBA
2022

RESUMO

Neste trabalho, apresentaremos o desenvolvimento de uma placa de controle que permitirá o acionamento de um motor de corrente contínua, possibilitando o controle da direção e velocidade do motor. Além disso, a placa permitirá a realização de leituras de corrente e temperatura, receberá sinais analógicos e será capaz de receber comandos via comunicação serial.

O objetivo principal do projeto é fornecer uma solução eficiente e econômica para a locomoção e direção de equipamentos AGV em ambientes industriais. Esses equipamentos automatizados têm se mostrado altamente eficazes na melhoria dos processos industriais, aumentando a velocidade, a segurança e a consistência, ao mesmo tempo em que reduzem os custos.

A placa de controle foi projetada para ser facilmente integrada em sistemas existentes de controle de equipamentos AGV, tornando a atualização e a manutenção mais acessíveis. Além disso, a capacidade de controlar a direção e velocidade do motor permitirá que os equipamentos AGV sejam mais versáteis e flexíveis em diferentes ambientes de produção.

O sistema de leitura de corrente e temperatura permitirá que os usuários monitorem e controlem a operação do motor com mais eficiência, reduzindo o desgaste e prolongando a vida útil do motor. A capacidade de receber sinais analógicos e comandos via comunicação serial também tornará a placa de controle mais flexível e adaptável a diferentes necessidades e aplicações.

Palavras-chave: Ponte H; acionamento; Automated Guided Vehicle. motor corrente contínua

TERMO DE APROVAÇÃO

LUAN OSHIMA

DESENVOLVIMENTO DE PONTE H PARA ACIONAMENTO DE MOTOR DE
CORRENTE CONTÍNUA COM CONTROLE DE VELOCIDADE

TCC apresentada ao curso de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia,
Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. André Augusto Mariano
Orientador – Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Dr. Eduardo Gonçalves de Lima
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Waldomiro Soares Yuan
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR
Curitiba, 15 de Abril de 2022.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	7
2.1. Objetivo geral	7
2.2. Objetivos específicos	7
3. ESTRUTURA	7
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
4.1. DISPOSITIVOS PRESENTES NO MERCADO	8
4.1.1. SABERTOOTH 2X60	8
4.1.2. FE060-60C-CM	9
4.2. CONCEITOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DO PROJETO	10
4.2.1. PONTE H	13
4.2.2. MOSFET	15
4.2.3. PROTOCOLO UART	16
5. MATERIAIS E MÉTODOS	16
5.1. ESTRUTURA DO CIRCUITO	17
5.1.1. MOSFET	18
5.1.2. DRIVERS DE MOSFET	20
5.1.3. PROCESSAMENTO DE SINAIS	22
5.1.4. REGULADOR DE TENSÃO	23
5.2. SOFTWARES	25
5.2.1. ARDUINO IDE	25
5.2.2. ALTIUM DESIGNER	26
6. DESENVOLVIMENTO	27
6.1. DESENVOLVIMENTO DE ESQUEMÁTICO E LAYOUT	27
7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	36
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
9. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
10. REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

A automação industrial sempre foi uma área de interesse global, onde eram visadas melhorias capazes de trazer mais agilidade e autonomia na fabricação de produtos. Segundo a revista Veja, com a melhoria dos processos de industrialização foi se tornando cada vez mais necessário desenvolver tecnologias e equipamentos capazes de trazer as melhorias de maneira segura e eficiente.

Tendo este objetivo em mente um equipamento que surgiu foi o AGV (Automated Guided Vehicle) cuja função, de acordo com a INATEL, é transportar cargas de um ponto ao outro seguindo um caminho pré-demarcado. Em 1950, de acordo com o site Dataintel, o primeiro AGV foi implementado no mercado pela Barrett Electronics, sendo simplesmente um caminhão capaz de seguir um fio. Hoje este caminho pré-demarcado pode ser realizado fazendo uso de diversas tecnologias. A de menor custo é com o uso de faixas no chão, onde o AGV detecta uma faixa no chão, fazendo uso de sensores ópticos, e a segue para realizar sua rota. Já algumas soluções envolvem o uso de um fio que é embutido no chão, que emite uma frequência, que ao ser detectada pelo AGV irá seguir ela, tendo assim sua rota. E a tecnologia mais recente é a de navegação natural, onde o AGV faz o mapeamento do ambiente fazendo uso de um sensor LIDAR, a partir deste mapa o AGV consegue se localizar e sua rota é definida de maneira digital sendo mais prático a sua implementação.

De acordo com o artigo da The Manufacturer, os AGV têm mostrado excelentes resultados na indústria, onde processos de transporte de cargas, internas e externas a fábricas, tem se tornado cada vez mais consistentes e ágeis devido aos AGV. Alguns exemplos são vistos em empresas automobilísticas, alimentícias, hospitalares e logísticas.

A empresa AGVS, localizada em Araucária-PR, produz AGVs para diversas empresas no Brasil, possibilitando que empresas nacionais e internacionais possam se desenvolver em território nacional. A locomoção destes AGV é feita utilizando dois motores de corrente contínua. Devido à ausência de placas capazes de fazerem o acionamento desses motores de maneira confiável e que sejam

capazes de receber os sinais utilizados pela empresa, é feita a compra de drivers no exterior para acionar estes motores. Estes drivers, porém, acabam encarecendo o produto e tornando a sua implementação mais complexa, além disso o drive tem se tornado cada vez mais difícil de ser encontrado.

Tendo em vista os problemas apresentados, este TCC tem como objetivo desenvolver um circuito capaz de fazer o acionamento de um motor de corrente contínua, de baixo custo, que seja capaz de receber os sinais necessários, possuindo controle de velocidade e que seja capaz de suportar os motores de locomoção dos AGV.

Com este circuito seria possível reduzir os gastos com importação e conversão de moedas para a compra dos drivers utilizados, além de possibilitar uma implementação mais prática e flexível devido ao conhecimento do circuito.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma ponte H capaz de fazer o acionamento de um motor de corrente contínua, sendo capaz de controlar sua velocidade e direção.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Estudar um circuito para fazer o acionamento do motor de corrente contínua
- b) Fazer a escolha de componentes para o projeto
- c) Desenhar a placa que receberá o circuito
- d) Testar e validar a placa
- e) Documentação e análise de resultados

3. ESTRUTURA

A estrutura deste trabalho foi organizada de modo a explicar os métodos e ferramentas que foram utilizados para se desenvolver o circuito, sendo organizado em capítulos para facilitar a compreensão.

No primeiro capítulo é feita uma introdução ao assunto e a empresa que motivaram o desenvolvimento do projeto. No segundo é explicado a fundamentação teórica utilizada no desenvolvimento do projeto além das ferramentas que foram utilizadas. No terceiro capítulo mostra o desenvolvimento do projeto e seu funcionamento. No quarto capítulo é apresentado os resultados obtidos. No quinto capítulo uma conclusão geral do projeto. E por fim no sexto capítulo as referências bibliográficas utilizadas.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será explicado todas as bases teóricas que foram utilizadas neste trabalho

4.1. DISPOSITIVOS PRESENTES NO MERCADO

Apesar do circuito a ser desenvolvido ser único, ainda assim há vários circuitos semelhantes com o que será projetado – circuitos que realizam o acionamento de motores de corrente contínua controlando sua velocidade.

4.1.1. SABERTOOTH 2X60

De acordo com a Dimensions Engineering, a placa Sabertooth 2x60 é uma placa versátil e de fácil uso, como descrito pela própria dimensions engineering em seu site. Sendo capaz de controlar dois motores ao mesmo tempo e aguentar até 60A contínuos.

A Sabertooth 2x60 possui um bloco de alimentação capaz de converter a tensão de entrada para fornecer alimentação para o circuito lógico, possui também um bloco responsável pelo acionamento dos motores, onde é controlado pelo bloco

do microcontrolador, onde é processado os sinais de controle e enviados ao bloco de acionamento dos motores.

Seu acionamento é feito com o mesmo princípio da ponte H fazendo uso de MOSFETs e um microcontrolador da microchip para realizar o seu controle

Seu diferencial pode ser observado ao analisarmos as funções de segurança e de funcionamento, como proteção contra sobrecorrente e proteção de temperatura. Além disso, a sua função regenerativa permite que a placa seja capaz de carregar a bateria ao realizar uma frenagem.

Como já estava sendo utilizada nos AGVs foi possível se familiarizar bem com a Sabertooth 2x60 e se inspirar nesta placa em diversos pontos.

Figura 1 - Sabertooth 2x60



FONTE: Dimension Engeneering

4.1.2.FE060-60C-CM

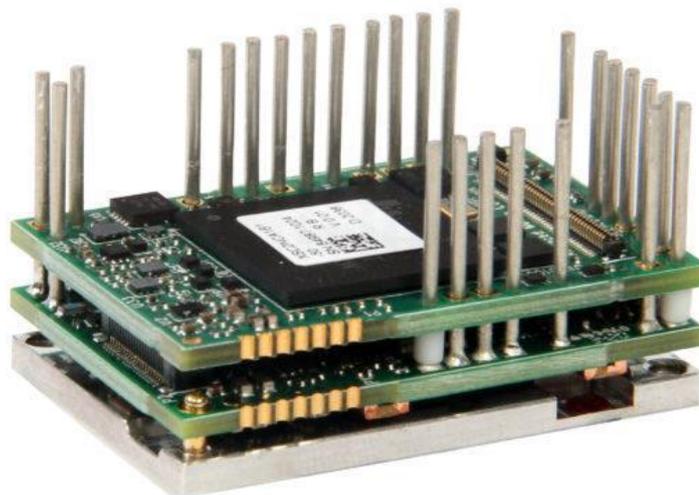
De acordo com a Advanced Motion Controls a FE060-60C-CM é uma placa desenvolvida com o intuito de controlar um motor DC de até 60A contínuos. Sendo capaz de operar com uma tensão de entrada de até 55V.

Seu diferencial está em seu modo de comunicação via CAN possibilitando sua utilização e fácil implementação em diversos equipamentos, principalmente na área automotiva onde este protocolo de comunicação é bastante utilizado.

Além disso, a FE060-60C-CM possui entradas analógicas de até 10V e a capacidade de leitura de encoders para interpretar a posição do motor. Além disso

possui um bloco responsável pela detecção de um torque do motor como medida de segurança, evitando que caso haja uma ocorrência de esmagamento pelo equipamento, seja possível evitar um acidente desligando o equipamento.

Figura 2 - FE060-60C-CM



FONTE: ADVANCED MOTION CONTROLS

4.2. CONCEITOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DO PROJETO

Levando em consideração que neste projeto, além de realizar o acionamento do motor, será necessário receber sinais exteriores à placa e realizar o processamento destes sinais analógicos e digitais, foi decidido que seria utilizado um microcontrolador para o processamento e acionamento dos sinais.

Ao fazermos uma análise dos dispositivos já presentes no mercado percebemos que todos possuem microcontroladores. Isso se deve ao fato de que há uma certa complexidade em seu acionamento e além de realizar este acionamento ainda há a necessidade de processar sinais.

Microcontroladores são normalmente projetados para funcionar dentro de uma faixa de tensão específica, geralmente entre 3,3 V e 5 V, e é importante

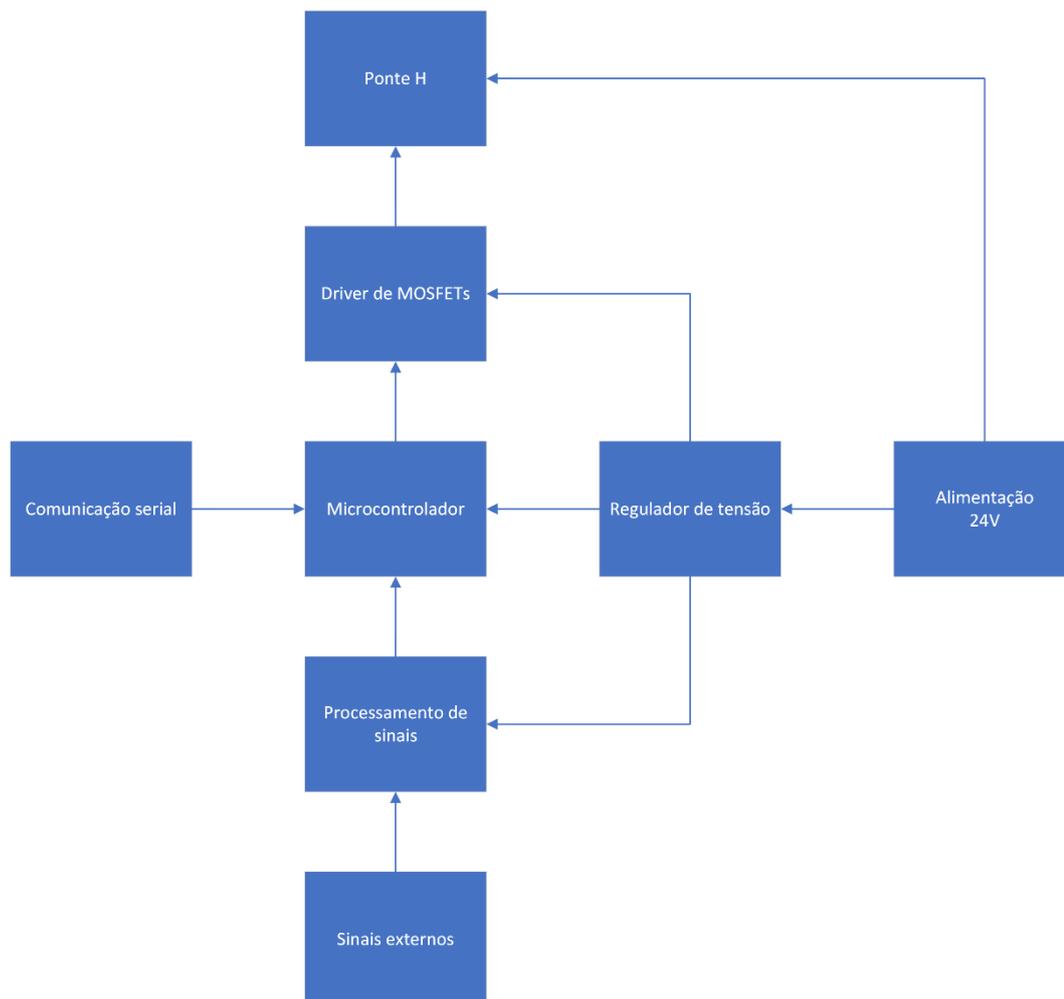
garantir que a tensão fornecida seja constante e estável para assegurar o correto funcionamento do dispositivo. Logo a criação de um bloco regulador de tensão para o circuito seria necessária. Além do microcontrolador, sabemos também que nos blocos responsáveis pelo processamento de sinais e pelo bloco de driver de mosfets haveria a necessidade de se trabalhar com tensões mais estáveis e de valor menor. Com isso vemos que o bloco regulador de tensão seria essencial para o circuito.

Para a realizar a aquisição de sinais foi observado que seria necessário um bloco dedicado a esta função, uma vez que seria necessário amplificar os sinais e filtrar eles de modo que o microcontrolador seja capaz de interpretá-los de maneira coerente. De acordo com o livro "Aquisição de Sinais em Sistemas Eletrônicos" de Giorgio Rizzoni (2001), a aquisição de sinais envolve três passos principais: geração do sinal, captura do sinal e processamento do sinal. A geração do sinal envolve a utilização de sensores que convertem as informações do mundo físico em sinais elétricos. A captura do sinal envolve a aquisição destes sinais elétricos, geralmente fazendo uso de conversores analógicos-digitais (ADC). Por fim, o processamento do sinal envolve a análise e a interpretação dos dados capturados.

Quanto ao circuito da ponte H em si vemos que para realizar o acionamento dos MOSFETs corretamente devemos fazer uso de um drive de MOSFET. O drive de MOSFET fornece uma corrente de gate adequada para controlar o estado de condução do canal do MOSFET, permitindo que o dispositivo seja ligado ou desligado conforme necessário. A escolha da topologia adequada e dos componentes certos é fundamental para garantir o funcionamento confiável do sistema. Devido a isso foi observado que seria necessário implementar um bloco de driver de MOSFET entre o microcontrolador e a ponte H em si.

Com os pontos listados acima em mente acabamos com o seguinte diagrama que será desenvolvido:

Figura 3 - Diagrama de blocos do circuito



FONTE: autor (2022)

No diagrama de blocos observamos que a estrutura geral do circuito é bem simples. O microcontrolador será responsável por gerir todo o recebimento e envio de sinais.

Já a parte de potência do circuito será acionada a partir dos drivers de MOSFETs que fará o controle dos Gates dos MOSFETs, garantindo o seu correto acionamento e o bom funcionamento da ponte H.

Com relação a parte de sinais teremos um bloco dedicado ao processamento dos sinais, uma vez que ao chegarem na placa será necessário fazer filtros para garantir um sinal mais limpo e coerente com o necessário.

Por fim, o bloco regulador de tensão é responsável por diminuir a tensão de entrada, para alimentar corretamente o circuito. Apesar do acionamento do motor ser realizado em 24V, os circuitos para realizar o controle dos MOSFETs e o circuito responsável pelo processamento de sinais será alimentado com tensões menores.

Agora que temos uma visão geral do projeto será feita uma breve explicação do funcionamento dos blocos e seus conceitos teóricos.

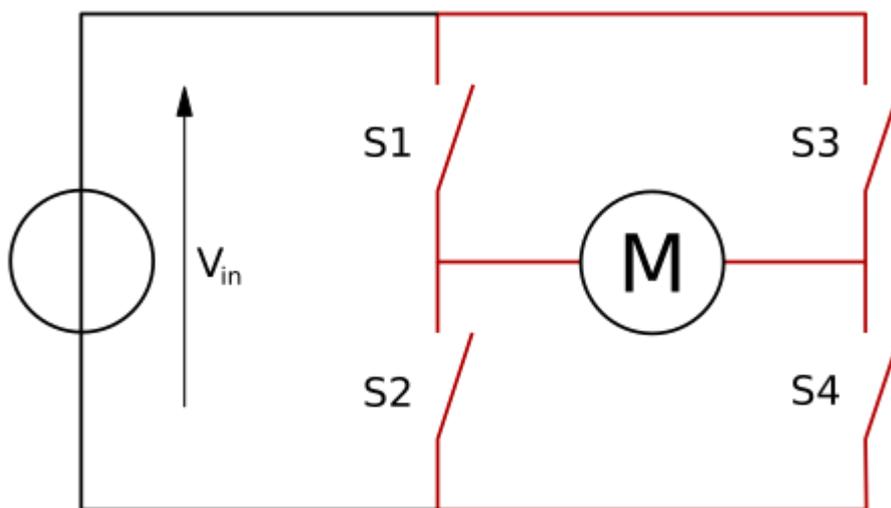
4.2.1.PONTE H

De acordo com a Digilent, empresa americana desenvolvedora de hardware e software, o conceito da ponte H consiste em um circuito capaz de ajustar a quantidade de energia enviada a um componente, sendo capaz também de inverter rapidamente sua polaridade. Sendo comumente utilizado para acionar motores

A ponte H funciona alternando a polaridade da saída do motor, permitindo que a direção do fluxo de corrente seja mudada. Quando a polaridade da saída do motor é mudada, o sentido de rotação do motor também é mudado. Além disso, a velocidade do motor pode ser controlada ajustando a corrente de saída, o que é feito ajustando a tensão de saída.

Seu acionamento é feito a partir do acionamento sequencial de 4 chaves. A figura 2 ilustra um circuito de ponte H simplificado tendo um motor M como carga.

Figura 4 - Ponte H



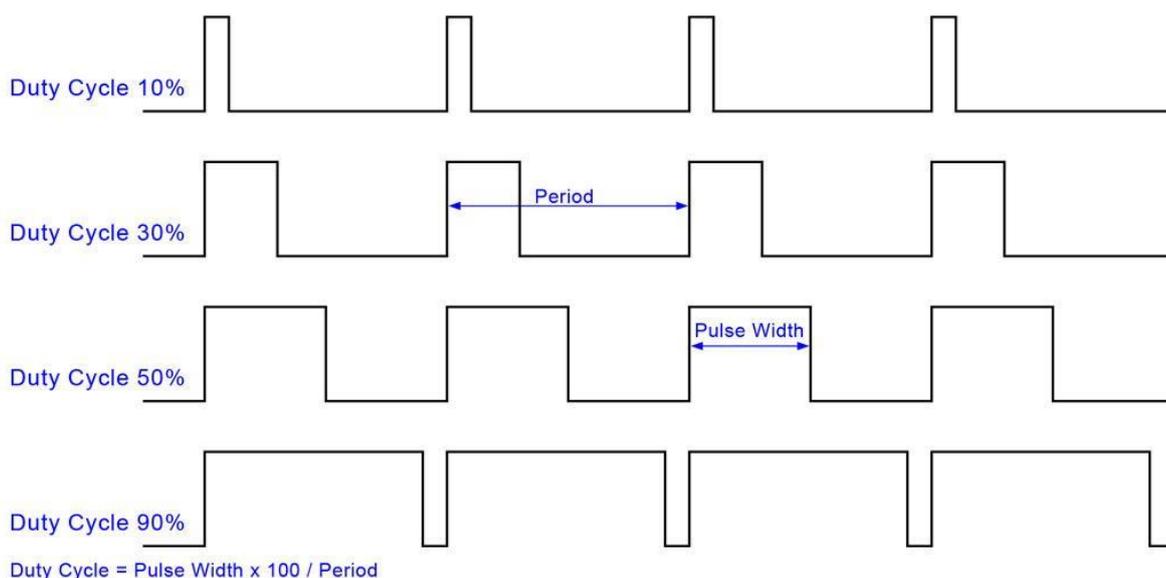
FONTE: Embarcados (2014)

Observando-se a figura 2 vemos que ao fecharmos as chaves S1 e S4 temos o motor M girando em um sentido, ao abrirmos as chaves S1 e S4 e fecharmos as

chaves S2 e S3, temos a polaridade inversa ao que foi acionado anteriormente e por consequência o motor irá girar no sentido oposto.

Para realizar o controle da quantidade de energia enviada é feito o chaveamento dessas chaves. O componente comumente utilizado é os MOSFETs. Para realizar esse chaveamento de maneira precisa, é enviado um sinal PWM para os gates dos MOSFETs, onde é então controlado o seu duty cycle para permitir que seja feita uma média do valor de entrada.

Figura 5 - Duty cycle em PWM



FONTE: IFSC (2018)

Nota-se que há um efeito interessante, onde se fizermos o acionamento das duas chaves superiores, ou inferiores, temos a frenagem do motor. Este efeito se deve às propriedades indutivas do motor, onde é gerado uma corrente oposta ao sentido de rotação do motor, que por consequência gera uma força contrária ao sentido de rotação.

Outro cuidado com a ponte H é evitar o acionamento simultâneo das chaves laterais (S1 e S2 ou S3 e S4), uma vez que isso ocasionará um curto-circuito na fonte, o que geralmente leva a destruição do equipamento.

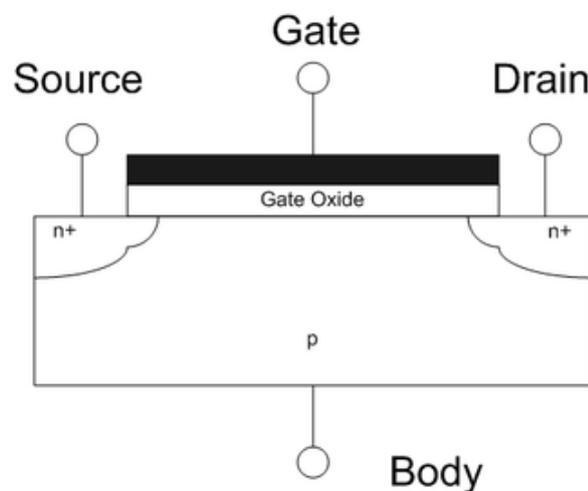
Atualmente o componente mais comum de ser utilizado para realizar o chaveamento da Ponte H é o MOSFET. Devido a sua alta capacidade de suportar altas potências e de custo relativamente baixo, o MOSFET se mostrou um excelente componente para realizar esta função.

4.2.2.MOSFET

O MOSFET é a abreviação de Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor, ou Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido Semicondutor. Os transistores de Efeito de Campo não são componentes novos, foram propostos por Julius Edgar Lilienfeld, em 1925. O MOSFET se tornou um componente extremamente popular devido a sua capacidade de operar em alta potência.

O MOSFET é subdividido em Tipo P e N, além de depleção e acumulação. A diferença entre o tipo p e n é a dopagem intrínseca que é feita no semicondutor, sendo chamado de nMOS ou pMOS de acordo com a dopagem realizada.

Figura 6 - MOSFET



FONTE: Embarcados (2014)

O MOSFET possui três modos de operação: Região de corte, região de triodo e região de saturação. A região de corte ocorre quando a tensão entre o gate e o source não atingiu a tensão de threshold, logo terá uma corrente praticamente nula passando entre o drain e o source. Já a região de triodo o MOSFET se comporta como um resistor variável por tensão. E por fim na região de saturação é

onde o MOSFET onde já se há um fluxo de corrente bem maior e a variação no valor de resistência praticamente independe da tensão no gate.

Para a aplicação como uma chave o MOSFET deve se manter idealmente na região de corte e na região de saturação, uma vez que se ao permanecer na região de triodo há uma resistência maior que a esperada, ocasionando o aquecimento do componente.

Tendo em vista a sua capacidade de suportar altas potências e a agilidade para realizar o seu acionamento, o MOSFET é comumente utilizado para realizar o chaveamento de cargas com alto fluxo de corrente.

4.2.3.PROTOCOLO UART

O Protocolo UART, projetado e utilizado inicialmente por Gordon Bell na Digital Equipment Corporation, é uma abreviação de Universal Asynchronous receiver/transmitter. Nos dias atuais o protocolo UART é mais comumente utilizado para comunicação de periféricos devido a sua facilidade em ser implementado.

A comunicação UART consiste em transmitir dados série através de uma única linha de dados, normalmente referida como RX (receptor) e TX (transmissor). O dispositivo que deseja transmitir dados envia bits individuais através da linha TX, enquanto o dispositivo que deseja receber os dados os lê através da linha RX.

Este padrão de protocolo serial assíncrono, é utilizado para realizar o envio de informações e comandos, a empresa IBM a partir dos anos 2000 começou a utilizar e aprimorar este protocolo para realizar o envio mais rápido de dados entre computadores. Usualmente estes dados são enviados no formato de bytes podendo ser variado a taxa de transmissão via software. Além disso o protocolo UART é bem fácil de ser implementado pois necessita somente de três cabos para realizar a sua comunicação, sendo eles o RX, TX e o GND.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, será apresentado como o projeto foi estruturado e como ele funciona, em sua essência, detalhando materiais, softwares e assuntos mais específicos.

5.1. ESTRUTURADO CIRCUITO

MICROCONTROLADOR

Ao analisarmos os microcontroladores no mercado vemos que temos diversas opções, variando suas arquiteturas, número de entradas e saídas, memória, entre outras características.

Tendo em vista os requisitos para o circuito, sendo eles: Entradas I/Os, entradas analógicas com conversores ADC, saídas PWM, comunicação serial, foi encontrado as seguintes opções acessíveis:

- ATmega328P

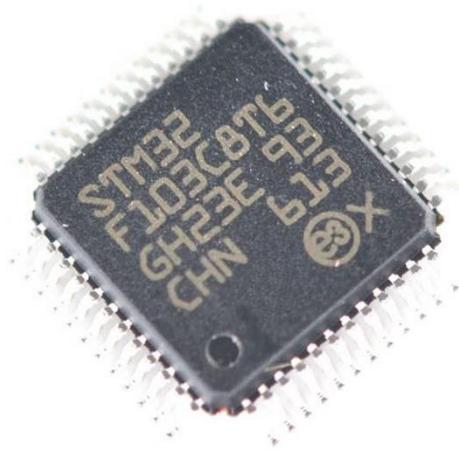
Figura 7 - Microcontrolador ATmega328p



FONTE: Microchip (2022)

- STM32F103C8

Figura 8 - Microcontrolador STM32F103C8T6



FONTE: STmicroelectronics (2022)

Ambos os microcontroladores encontrados atendem os requisitos para o projeto. Possuem no mínimo duas saídas PWM para fazer o controle dos drivers dos MOSFETs, possuem conversores ADC para o processamento de sinais, tem possibilidade de realizar comunicação serial UART, possuem capacidade de memória e processamento suficientes para realizar o acionamento.

Além disso ambos os fabricantes são confiáveis e fabricam os componentes em encapsulamentos compactos e de fácil implementação tornando o circuito mais compacto.

Por fim foi escolhido o microcontrolador Atmega328P, devido a facilidade de se encontrar o chip em comparação ao STM32F103C8, além disso a empresa AGVS já possuía o microcontrolador em estoque, o que facilitaria o desenvolvimento do circuito.

Com a escolha do ATmega328P é importante ter em mente que trabalharemos com uma arquitetura AVR e que, de acordo com a documentação do fabricante (MICROCHIP), sua alimentação não deve passar dos 5V de tensão nominal.

5.1.1.MOSFET

Para realizar a ponte H é necessário realizar a escolha dos componentes que farão o chaveamento do sistema. Neste projeto o MOSFET foi o componente escolhido para realizar o chaveamento da ponte H, devido ao seu fácil acionamento e capacidade de suportar altas correntes.

Uma vez que há diversos fabricantes e modelos de componentes foi necessário analisar diversas características para realizar a escolha do modelo de MOSFET ideal para o projeto. Os pontos principais analisados foram: Corrente máxima de operação, Tensão máxima de operação, Resistência entre a fonte e o dreno quando acionado, o comportamento do gate, a dopagem do MOSFET e tensão de acionamento.

A corrente e tensão máxima de operação foram analisados de modo a suportar as especificações das condições que seria utilizado o circuito. No caso como foi definido anteriormente, seria operado a uma tensão de até 24V e deveria suportar uma corrente de até 50A. Porém como sabemos, a principal carga que será acionada com o circuito será um motor de corrente contínua, no qual em sua operação gera vários picos de tensão e picos de corrente de modo que sua tensão de operação poderá passar dos 24V e dos 50A por curtos períodos. Logo os MOSFETs escolhidos foram aqueles que poderiam suportar até 40V e correntes acima dos 200A.

Ao analisarmos a influência da temperatura de operação do MOSFETs observamos a importância de se reduzir as perdas por calor. Logo, devido ao efeito joule vemos que o ideal seria um componente com uma baixa resistência entre o dreno e a fonte de modo que durante a sua operação não haja um grande aumento em sua temperatura. Além disso, devido a essa característica é importante que haja uma maneira de dissipar esse calor para manter o componente em sua temperatura ideal de operação.

Outro fator na escolha do MOSFET envolve o comportamento do acionamento do seu gate. Os dois principais fatores sendo a carga necessária para realizar o seu acionamento, o tempo de acionamento e o tempo de desligamento. O seu tempo é importante pois o MOSFET deve estar completamente acionado ou desligado dentro do período delimitado pela frequência de chaveamento deles. Caso contrário poderá ocorrer o efeito de shoot-through, onde os dois MOSFETs de um mesmo lado da ponte H são acionados, ocasionando um curto na fonte de alimentação do circuito. Com relação a carga necessária para realizar o

acionamento viu-se necessário analisar o tamanho de sua capacitância para que possa ser escolhido um circuito de acionamento de MOSFETs capaz de fornecer a corrente necessária para realizar sua carga.

Ao pesquisar os MOSFETs presentes no mercado foi encontrado 3 possíveis componentes, levando em consideração as características explicadas acima.

Foi encontrado os seguintes MOSFETs:

- IRFS7430-7PPbF
- IRFS7437-TRL7PP
- FDB024N04AL7

Porém devido a disponibilidade em estoque o MOSFET IRF7430-7PPbF foi escolhido para este projeto. Além disso, o modelo escolhido possui uma resistência interna menor que os outros MOSFETs o que ocasionará um menor aquecimento do encapsulamento e uma maior eficiência do circuito.

5.1.2.DRIVERS DE MOSFET

Para realizar o acionamento dos MOSFETs de maneira adequada, foi pesquisado circuitos capazes de fazer a proteção e o acionamento correto deles. Ao pesquisar os circuitos integrados foi observado, qual a sua tensão de operação, qual a sua corrente máxima de saída e quais os recursos relacionados à segurança que eles poderiam fornecer.

Tendo esses parâmetros em mente foi encontrado os seguintes circuitos integrados:

- IR2184S

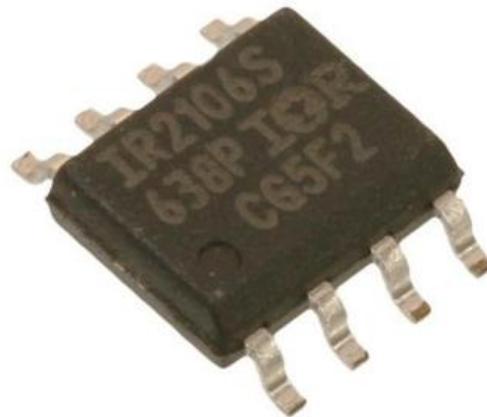
Figura 9 - CI IR2184S



FONTE: Infineon (2022)

- IR2106S

Figura 10 - CI IR2106S



FONTE: Infineon (2022)

Observou-se que ambos os circuitos conseguem operar em 12V e que ambos os circuitos possuem proteção contra shoot-through, além disso ambos possuem proteção contra tensão negativa que ocorre ao realizar o chaveamento dos MOSFETs. Um ponto importante presente em ambos os circuitos é a presença do circuito de bootstrap que irá auxiliar no acionamento dos MOSFETs do tipo N no mesmo lado da ponte.

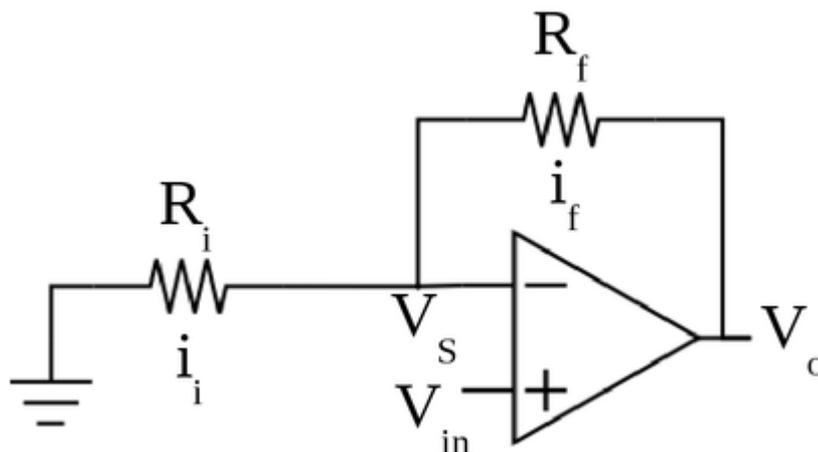
Ao comparar os dois Cis observou-se que o IR2184S possui um recurso a mais que o IR2106S relacionado a segurança do seu acionamento. Este recurso protege os MOSFETs no momento de inversão do sentido de rotação do motor, fazendo uso de um delay para realizar tal inversão. Por este motivo foi escolhido o CI IR2184S.

5.1.3.PROCESSAMENTO DE SINAIS

Para realizar o processamento de sinais foi decidido que seria feito um circuito capaz de amplificar os sinais externos de modo a ajustar o valor para que ele chegue de maneira coerente ao microcontrolador.

Ao pesquisar sobre circuitos analógicos capazes de realizar este processamento optou-se por fazer um circuito com amplificadores operacionais.

Figura 11 - Amplificador Operacional em modo não-inversor

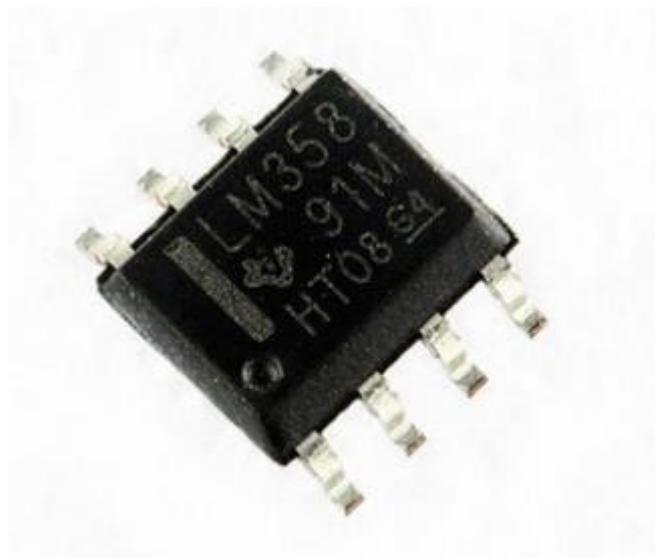


FONTE: C2O (2022)

Para este projeto foi decidido fazer uso do modo amplificador operacional em seu modo não inversor. Os amplificadores não inversores são dispositivos elétricos que ampliam a amplitude de uma entrada sem invertê-la, ou seja, sem mudar a polaridade da forma de onda. Eles são amplamente utilizados em aplicações que requerem uma resposta rápida, amplificação precisa e estabilidade do sinal. Logo ao analisarmos a necessidade de receber sinais analógicos externos à nossa placa vemos que este modo de operação seria o ideal para esta aplicação.

Após isso foi feita uma pesquisa para achar circuitos integrados contendo amplificadores operacionais. O CI LM358 é bem consolidado no mercado e atende todas as especificações do projeto, sendo de implementação simples no circuito e tamanho reduzido devido ao seu encapsulamento SMD o amplificador operacional LM358 foi o escolhido para realizar o processamento de sinais analógicos. Além disso a empresa AGVS possuía em estoque este componente facilitando o nosso acesso ao CI.

Figura 12 - CI LM358



FONTE: Texas Instruments (2022)

5.1.4. REGULADOR DE TENSÃO

Os reguladores de tensão são dispositivos elétricos que mantêm a tensão de saída constante, independentemente das variações na corrente de entrada ou na tensão de alimentação. Eles são amplamente utilizados em aplicações que requerem estabilidade e precisão da tensão de saída.

Para realizar a alimentação do circuito observou-se que seriam necessárias duas tensões distintas, 12V e 5V. A tensão de 12V seria utilizada para alimentar o bloco dos drives dos MOSFETs. Já a tensão de 5V seria utilizada para alimentar os amplificadores operacionais e o microcontrolador.

Para obter estas tensões foram escolhidos dois componentes reguladores:

- L7812CV

Figura 13 - CI Regulador de tensão L7812CV



FONTE: Baú da eletrônica (2022)

- L7805CV

Figura 14 - CI Regulador de tensão L7805CV



FONTE: Baú da eletrônica (2022)

Pelo mesmo motivo no qual foi escolhido o CI do Amplificador Operacional, foi feita a escolha do L7812CV e do L7805CV. Ambos são circuitos bem consolidados no mercado e atendem todas as especificações do projeto. Além disso a empresa AGVS possuía em estoque este componente facilitando o nosso acesso ao CI.

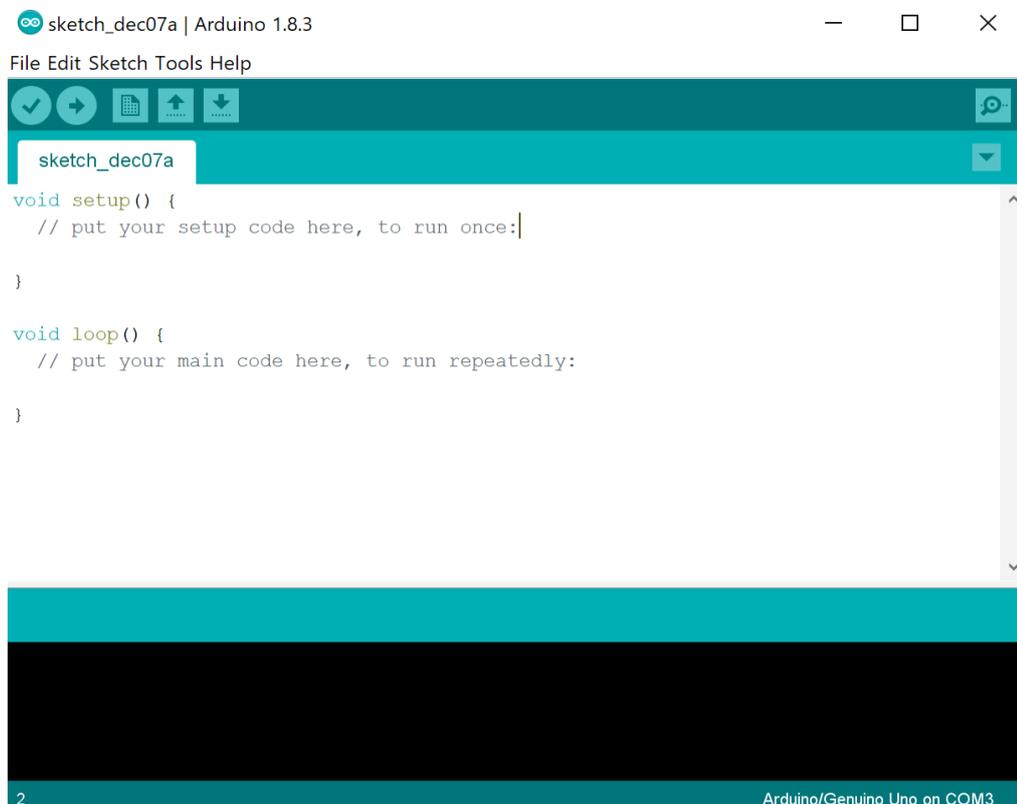
5.2. SOFTWARES

5.2.1. ARDUINO IDE

A IDE do Arduino foi utilizada para realizar a programação do microcontrolador Atmega328P. Como o microcontrolador escolhido é utilizado pela plataforma bem conhecida Arduino, fazendo-se uso da Arduino IDE seria possível ter o suporte para programar o Microcontrolador sem problemas.

De acordo com a própria desenvolvedora do software em seu site, o Arduino IDE permite que você escreva, edite e teste o código-fonte em linguagem C/C++. Ele inclui uma interface de usuário amigável com recursos de destaque de sintaxe, verificação de erros e sugestões de auto-completar, além disso a IDE permite que você carregue o firmware na placa microcontrolada, sendo possível realizar testes no projeto facilitando o seu desenvolvimento.

Figura 15 - Software Arduino IDE



FONTE: AUTOR (2022)

5.2.2. ALTIUM DESIGNER

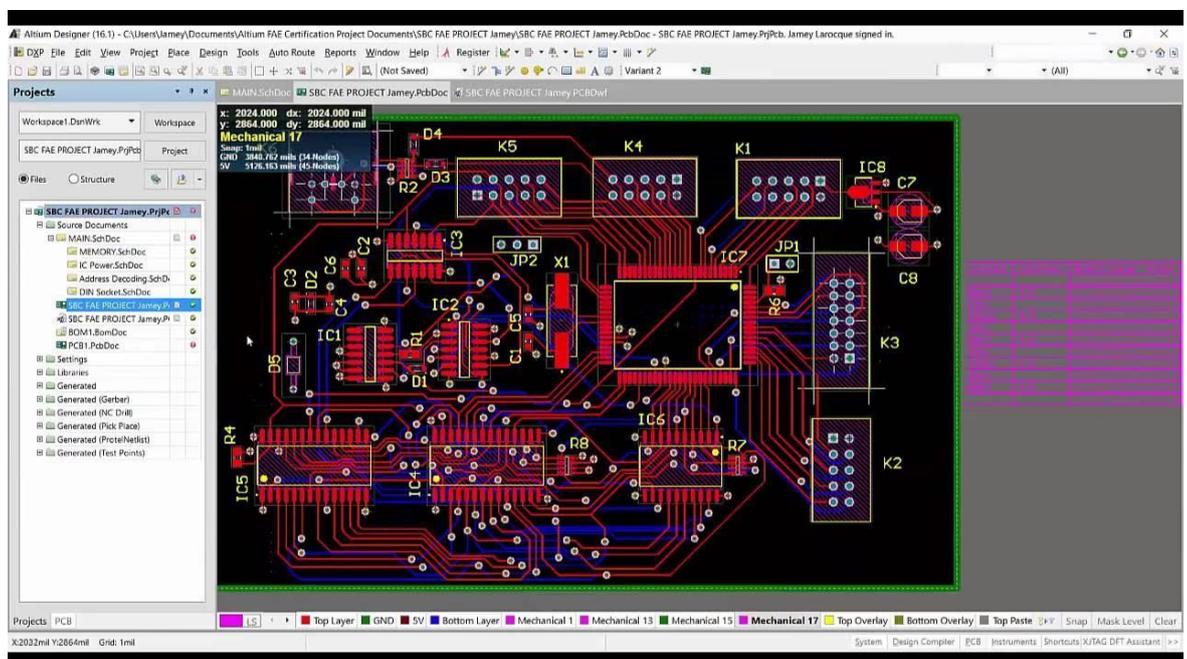
Para realizar o desenvolvimento do circuito em si, desde a parte do esquemático até o layout, foi feito o uso do software Altium.

O Altium, de acordo com o site oficial da empresa, é o software mais utilizado mundialmente para design de placas eletrônicas, sendo capaz de unificar em um único software o design completo de uma placa desde a sua fase inicial até a geração de arquivos para fabricação.

A escolha deste software se deve ao grande número de ferramentas que ajudariam a melhorar o tempo de execução do projeto e o circuito, desde a assistência na montagem do layout até a correção de detalhes no esquemático.

Além disso, o Altium é capaz de gerar arquivos para fabricação das placas da maneira mais comumente usada pelas fabricantes de maneira rápida. Dessa forma deixa o processo mais prático.

Figura 16 - Altium Designer



FONTE: Altium (2022)

6. DESENVOLVIMENTO

Nesta seção, será apresentado o processo realizado para o desenvolvimento do circuito desde o seu projeto até a montagem de uma placa protótipo.

6.1. DESENVOLVIMENTO DE ESQUEMÁTICO E LAYOUT

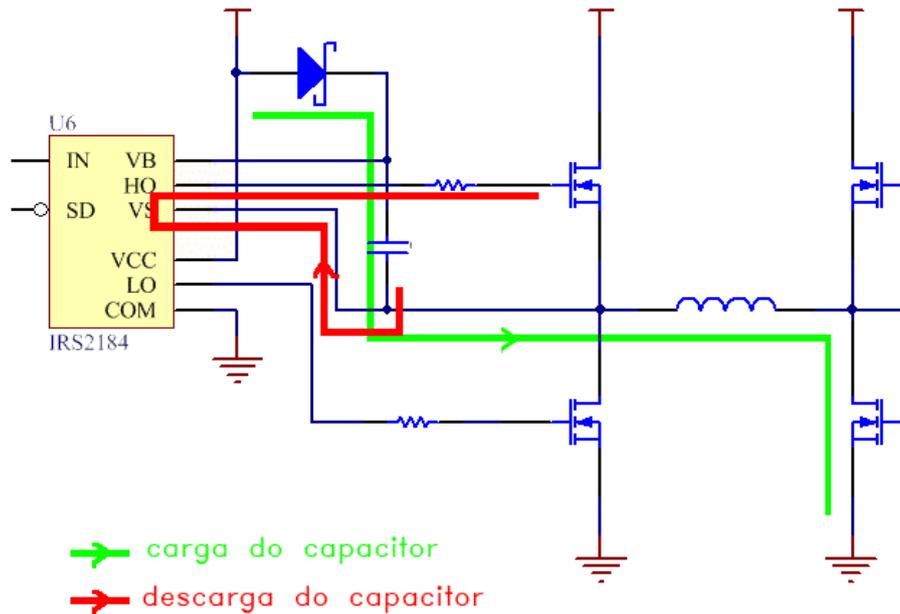
Após a realização do protótipo na matéria de TCC I foi decidido então realizar o desenvolvimento de uma placa onde seria inserido todos os circuitos almejados neste projeto. Nesta placa será necessário incluir o circuito da ponte H, sensores de corrente e temperatura, 2 entradas analógicas, uma entrada digital e uma saída de 5V.

Antes de começar o esquemático foi feito um estudo em cima de alguns detalhes da ponte H, onde foi encontrado alguns pontos importantes para realizar o seu acionamento de maneira correta e com segurança. Ao analisar as notas de aplicação AN-6076 da empresa Fairchild notou-se a necessidade de um circuito Bootstrap, circuito de acionamento do Gate do mosfet, resistor entre Gate e source e capacitor e resistor entre a carga.

Como no projeto será utilizado somente MOSFETs do tipo N é necessário a implementação de um circuito de bootstrap pois a tensão entre o Gate e o SOURCE dos MOSFETs da parte de cima da ponte H não terão diferença de tensão suficiente para serem acionados.

A técnica de circuito bootstrap consiste em adicionar um capacitor em série com a carga da ponte H e fornecer a tensão de alimentação para a base dos transistores através deste capacitor. O capacitor é carregado a partir da tensão de saída da ponte H e mantém uma tensão constante na base dos transistores, mesmo se a tensão de entrada da ponte H diminuir.

Figura 17 - Circuito bootstrap

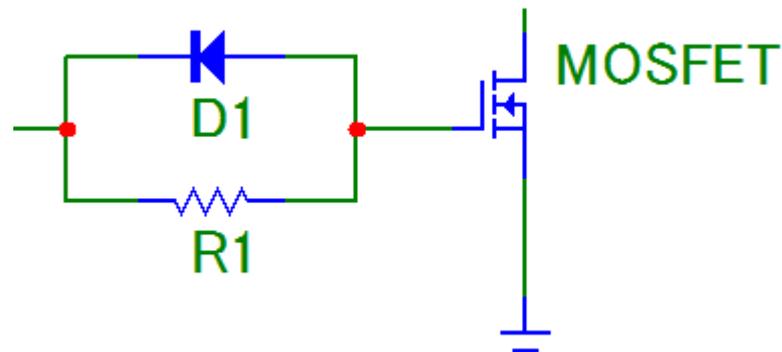


FONTE: Fairchild (2014)

Quando o MOSFET de baixo está aberto e o MOSFET de cima está acionado o capacitor de bootstrap é carregado já quando o MOSFET de baixo está acionado e o MOSFET de cima está aberto o capacitor é conectado em paralelo ao Gate e o source fazendo com que haja uma diferença de tensão suficiente para que o Gate seja acionado.

Já o circuito de acionamento do MOSFET, foi adicionado um resistor em série ao acionamento e um diodo schottky antiparalelo. Isso se deve para limitar a corrente na hora de realizar a carga do Gate, uma vez que sua carga muito rápida acaba ocasionando um undershoot indesejado que poderia danificar o MOSFET com o tempo, além de limitar a corrente máxima de modo a impedir a queima do circuito de acionamento do drive do MOSFET. O diodo em antiparalelo seria para fazer uma descarga mais rápida da carga do Gate, fazendo com que o MOSFET fique menos tempo na transição entre aberto e fechado.

Figura 18 - Resistor de gate



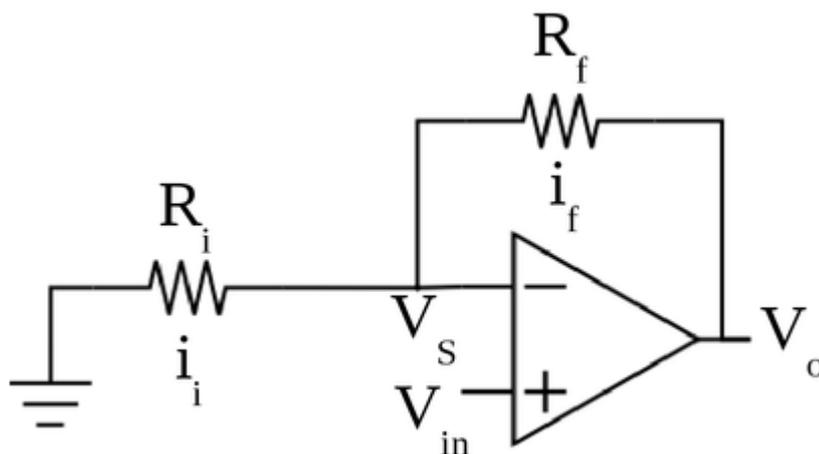
FONTE: Autor (2022)

Devido a tendência dos MOSFETs travarem quando uma tensão é aplicada para realizar o acionamento, o que ocasionaria a falha do componente, é colocado um resistor entre o Gate e o Source do MOSFET garantindo que caso ele seja travado ele ainda assim consiga descarregar rapidamente. Além disso, este resistor garante que o MOSFET está no estado não condutor em momentos de flutuação do gate, garantindo o seu estado fechado.

Por fim, o resistor e capacitor entre a carga atuam como um circuito Snubber. O circuito snubber é um circuito de suavização de corrente que é usado para proteger dispositivos eletrônicos contra altas correntes transitórias e tensões transitórias. É comumente usado para proteger contra danos causados por transientes elétricos. Em nosso projeto este circuito teria a função de reduzir o ruído gerado pelo motor fazendo com que o acionamento do motor ocorra de maneira mais suave.

Tendo analisado todos estes pontos foi então feito o esboço do esquemático da ponte H.

Figura 21 - Amplificador Operacional em modo Amplificador não inversor



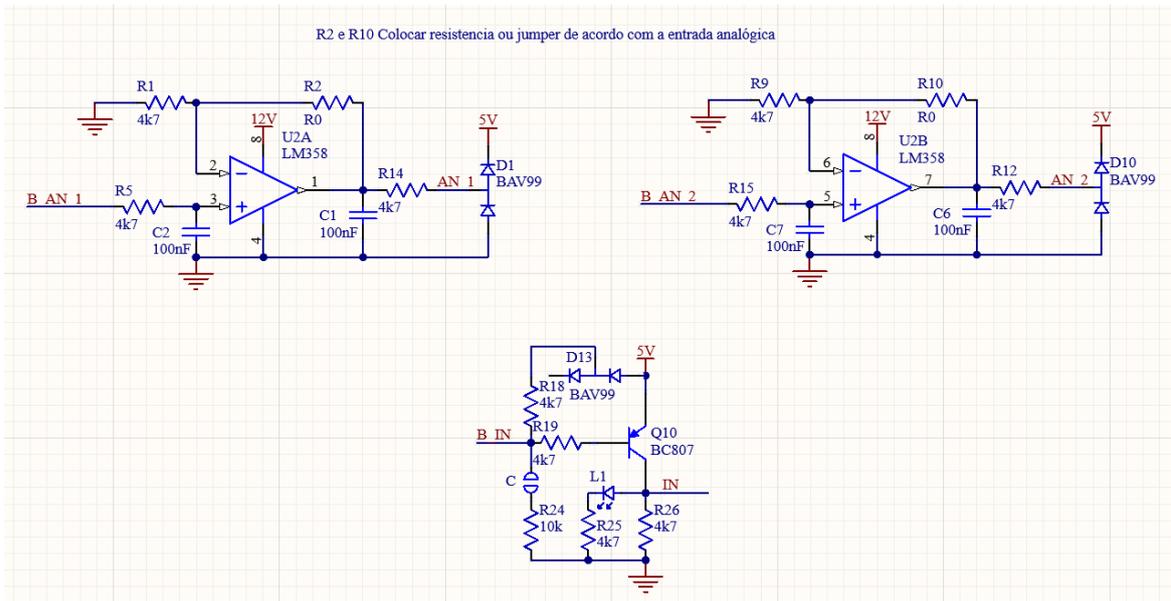
Para se calcular a saída que teríamos foi feito os cálculos usando as seguintes equações deste modo de operação:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

A partir desta fórmula temos os valores de resistência que precisamos para amplificar o sinal de modo que o microcontrolador consiga interpretar. Para o nosso caso específico o V_o não pode passar de 5V uma vez que este é o valor de referência para as entradas analógicas do microcontrolador. Como não era certo o valor máximo de entrada das entradas analógicas, foi decidido não colocar um valor fixo para o valor de resistência R_f , sendo escolhido R_f de acordo com a entrada esperada dependendo do projeto.

Já para a entrada digital foi feito um circuito de modo que possamos escolher se será acionado por um sinal lógico baixo ou um sinal lógico alto através de um jumper. Ao colocarmos o Jumper um resistor de pull down é acoplado ao circuito. Além disso o acionamento é realizado fazendo-se uso de um transistor BJT de modo a evitar que ocorra a queima da porta do microcontrolador caso haja uma variação inesperada na entrada da placa. Tendo estes pontos em mente foi realizado o esquemático, resultando no seguinte esquemático.

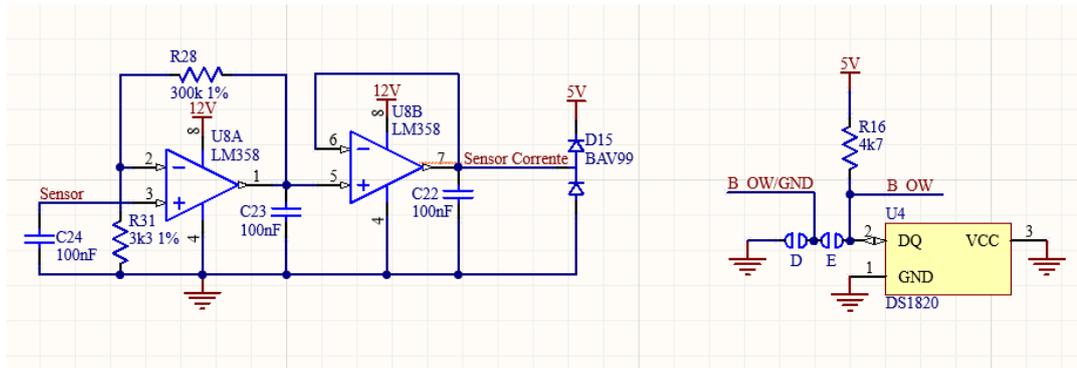
Figura 22 - Esquemático Entradas



FONTE: Autor (2022)

Após a realização do esquemático das entradas foi feito o esquemático dos sensores. Para adquirir o sinal de corrente do circuito foi posicionado um resistor em série com a ponte H de modo que toda a corrente que passar pela ponte irá passar pelo resistor. Este resistor pode ser chamado de resistor Shunt sendo que um resistor shunt é um resistor conectado em série com o circuito, com o objetivo de medir a corrente elétrica que flui através de um circuito. O resistor shunt é projetado para ter uma baixa resistência, dessa forma mesmo com altas correntes haveria baixas perdas neste resistor. Ao analisarmos a diferença de tensão entre os dois terminais do resistor shunt e fazendo-se uso da Lei de Ohm conseguimos estimar a corrente que está sendo drenada pelo circuito. Após adquirirmos o sinal entre os dois terminais do circuito este sinal será jogado a dois amplificadores operacionais onde um deles irá operar como um amplificador não inversor, amplificando o sinal adquirido e o outro irá servir como um buffer de modo a filtrar o sinal para então ser lido pelo microcontrolador. Além disso, foi inserido o CI responsável por fazer a leitura da temperatura da placa, resultando no seguinte esquemático.

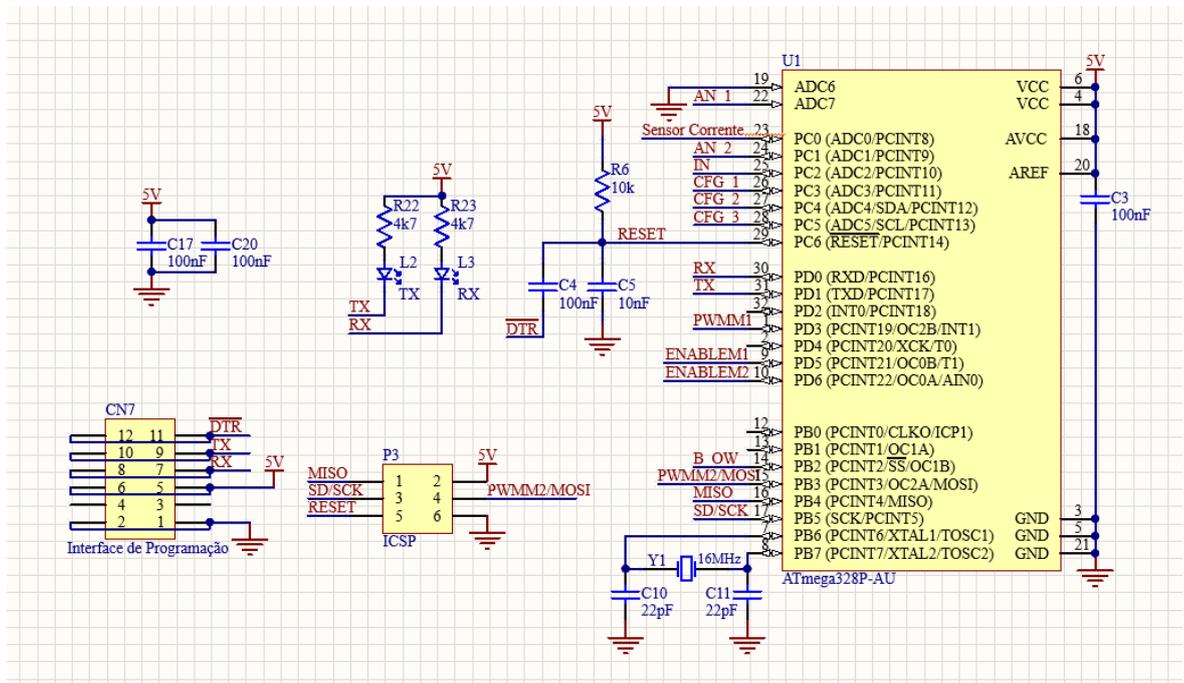
Figura 23 - Esquemático Sensores



FONTE: Autor (2022)

Por fim foi feito o esquemático do microcontrolador, onde foram inseridos todos os sinais dos esquemáticos anteriores. Além de unificar os sinais foi necessário adicionar circuitos responsáveis pela gravação do microcontrolador, uma vez que o microcontrolador seria programado para realizar as funções adequadamente.

Figura 24 - Esquemático Microcontrolador

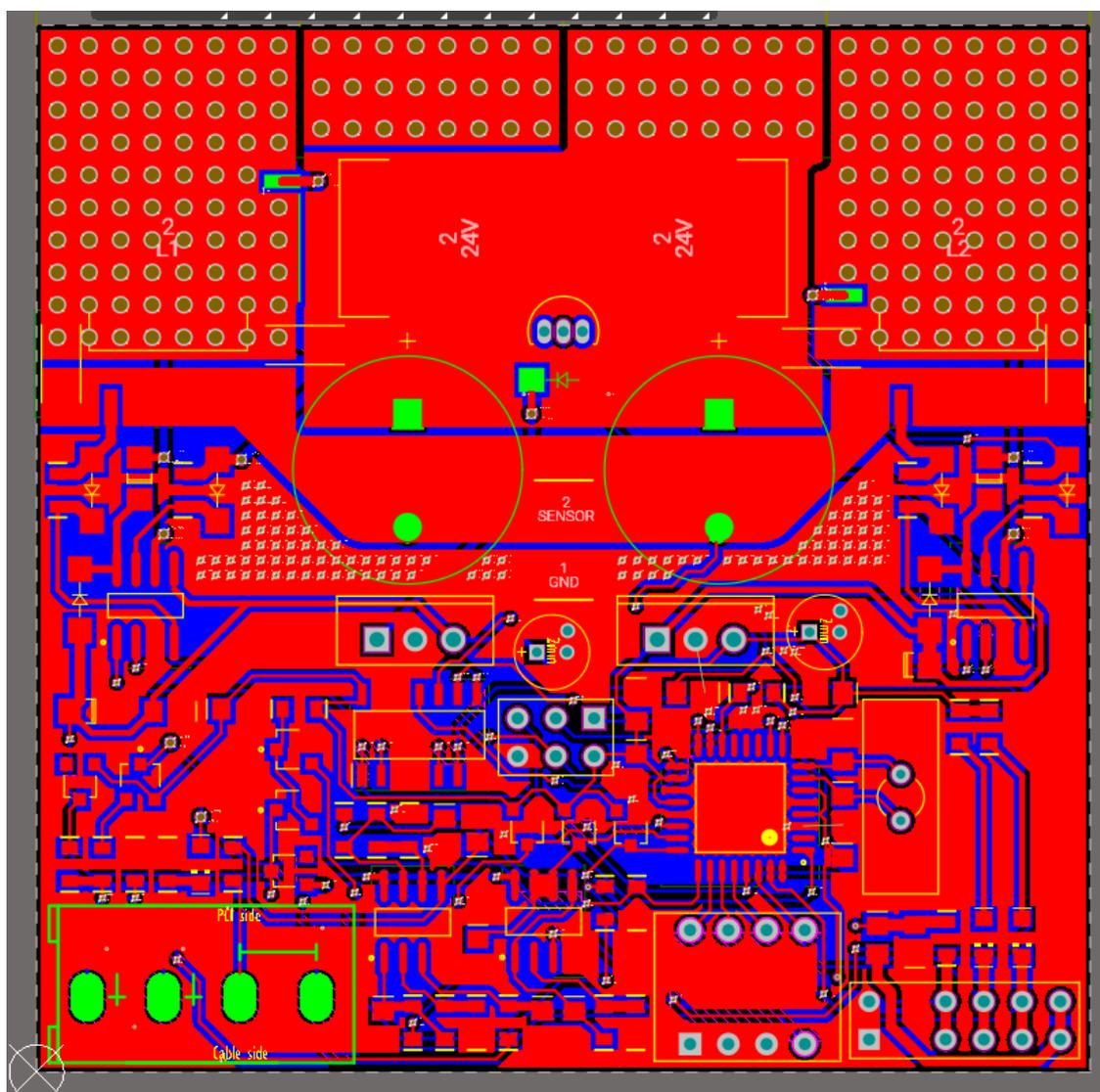


FONTE: Autor (2022)

Após a realização do esquemático foi feito o desenho do layout. Nota-se que para a realização do layout foi separado a parte de potência da parte lógica, isso

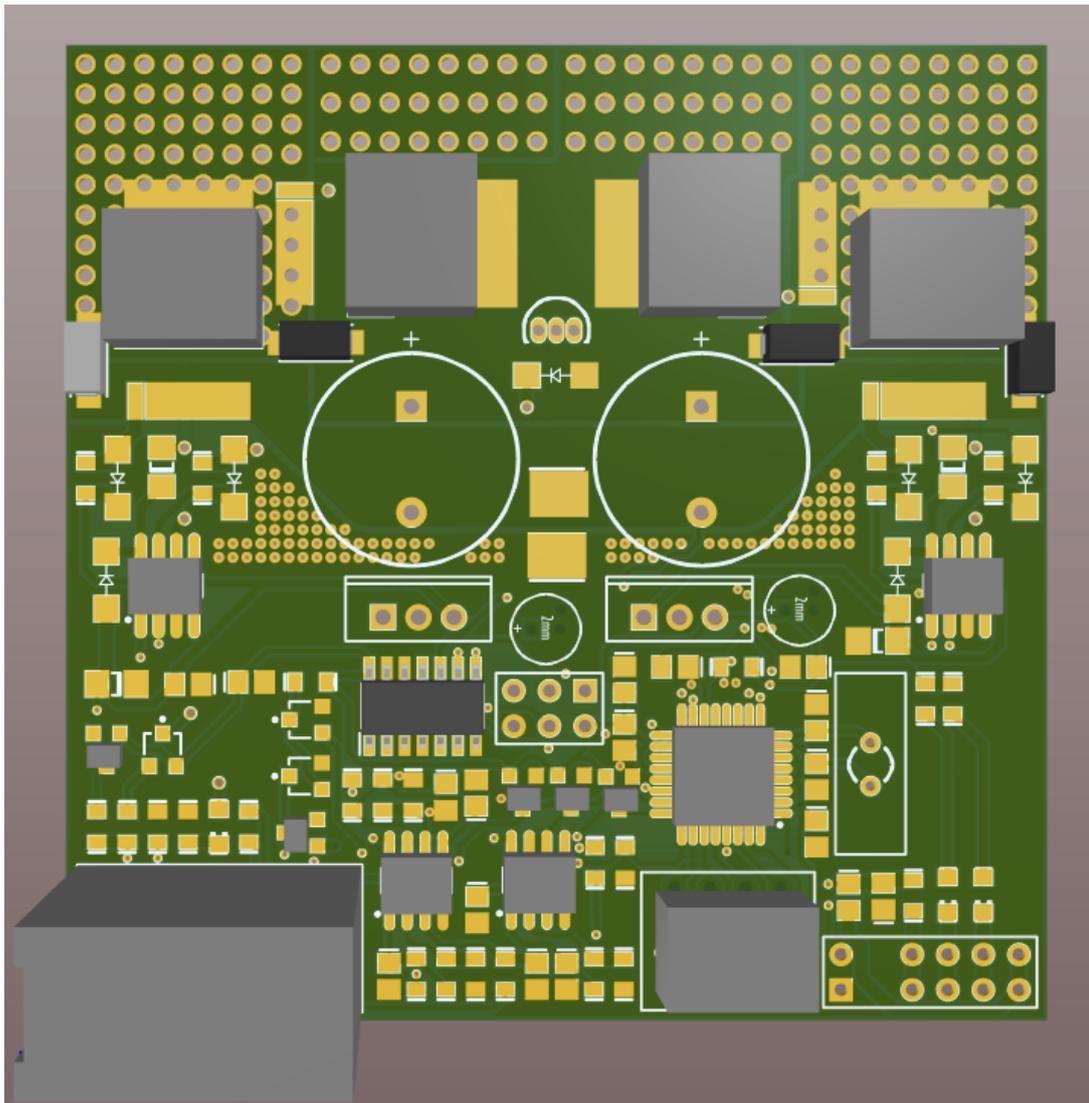
se deve a questão da interferência eletromagnética. Ao analisarmos a ponte H podemos esperar que altas correntes irão passar pelo circuito, por consequência as altas correntes geram campos magnéticos que podem influenciar no circuito lógico da placa. Por isso o circuito da ponte H foi posicionado de modo a deixar o mais distante possível do circuito lógico, tendo assim uma menor influência sobre ele.

Figura 25 - Layout PCB



FONTE: Autor (2022)

Figura 26 - Renderização 3D da PCB



FONTE: Autor (2022)

Observa-se que os diferentes circuitos implementados foram separados em blocos evitando-se posicionar componentes de um mesmo bloco em pontos muito distantes da placa. Dessa forma temos trilhas mais curtas na placa evitando que haja a inserção de componentes parasitas na nossa placa.

Além do layout em si, um ponto importante que foi escolhido foi a espessura do cobre a ser depositado na placa, uma vez que é esperado que passe altas correntes pelo circuito. Devido a isso foi feita a escolha de uma espessura de cobre de 2 Oz. Com essa escolha temos uma camada mais espessa permitindo que, para uma mesma quantidade de corrente passando pelo circuito tenhamos uma menor

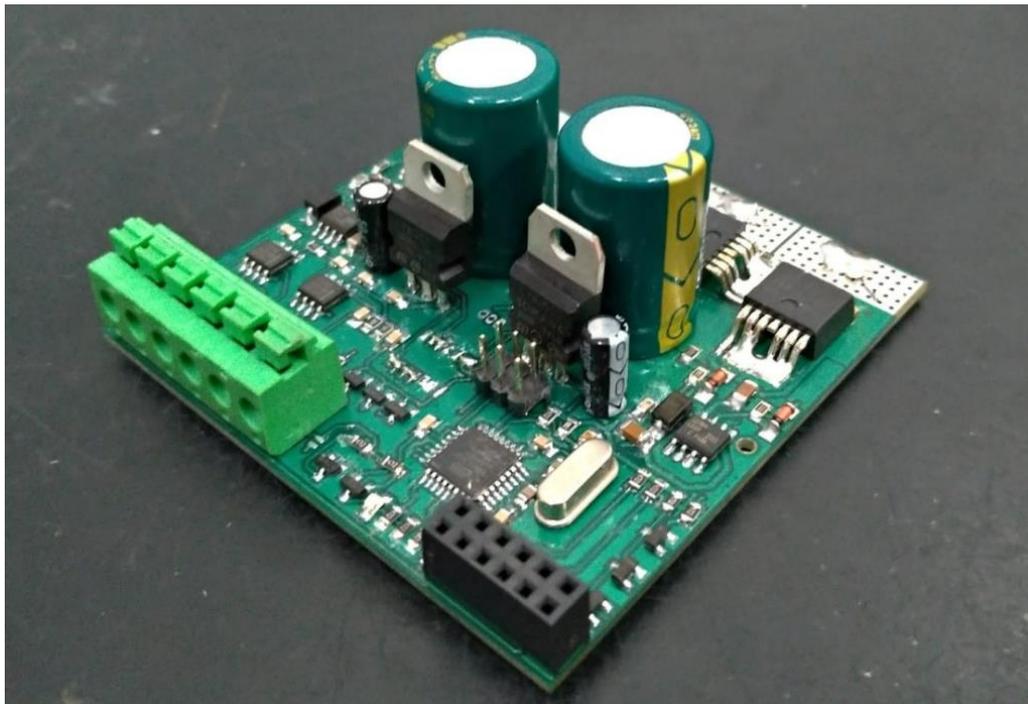
variação na temperatura da placa evitando que ela seja danificada permanentemente.

7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nessa seção, serão apresentados os resultados obtidos com o primeiro protótipo.

Foi feita a fabricação e a montagem da placa desenvolvida e então retirado alguns sinais, principalmente da parte do acionamento dos MOSFETs

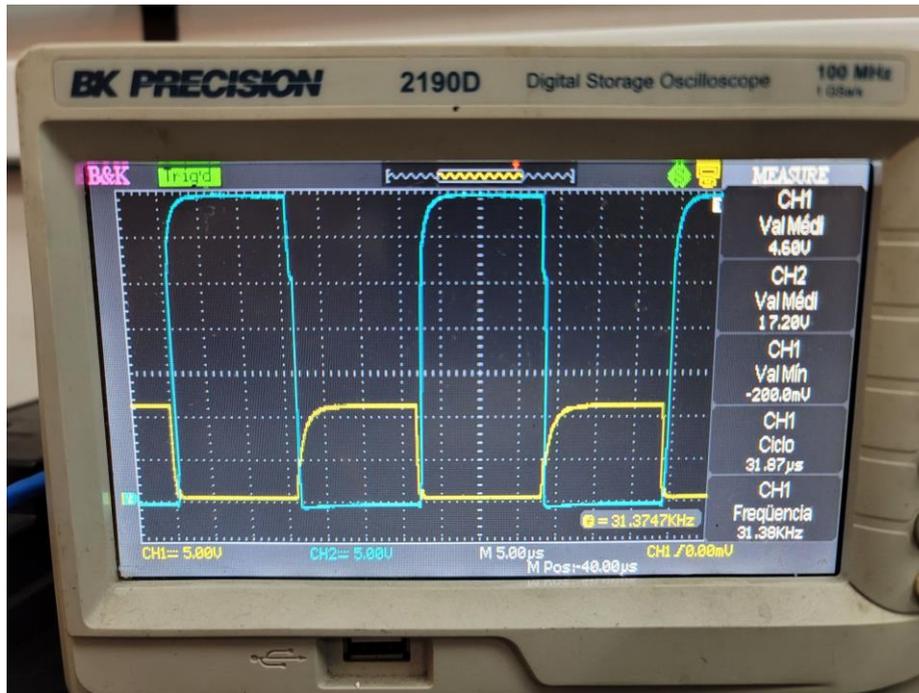
Figura 27 - Placa fabricada e soldada



FONTE: Autor (2022)

Foi possível analisar alguns sinais fazendo-se uso de um osciloscópio, verificando que os sinais estavam como o previsto e que estão de acordo com o esperado.

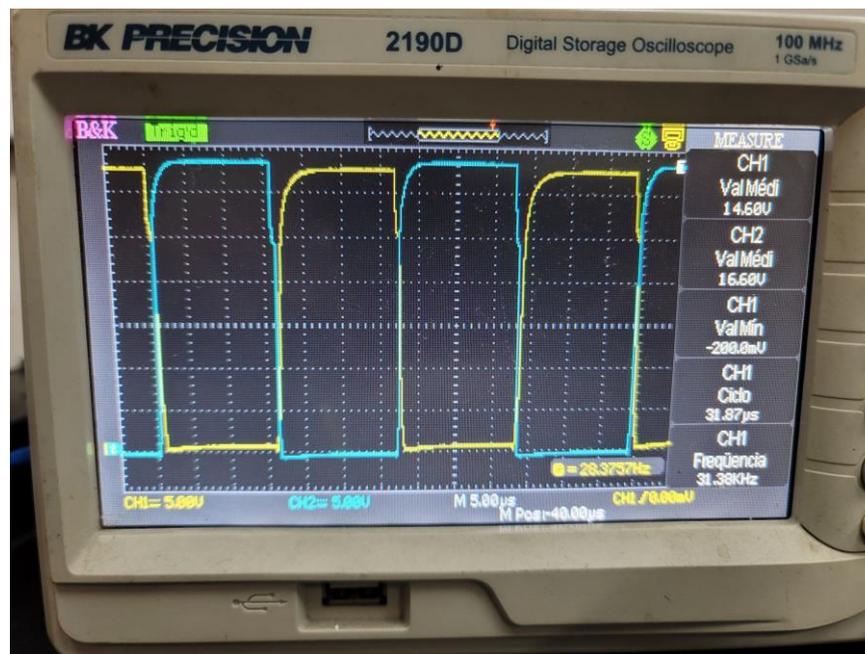
Figura 28 - Sinais de acionamento dos MOSFETs



FONTE: Autor (2022)

Na figura 28 podemos observar os sinais que estão sendo gerados pelos drives de acionamento dos MOSFETs e que o circuito de bootstrap está fazendo seu papel em elevar o nível de tensão do lado de cima da ponte, sendo possível realizar o acionamento do MOSFET de cima mesmo não tendo o GND em seu source.

Figura 29 - Sinais gerados no lado de cima da ponte

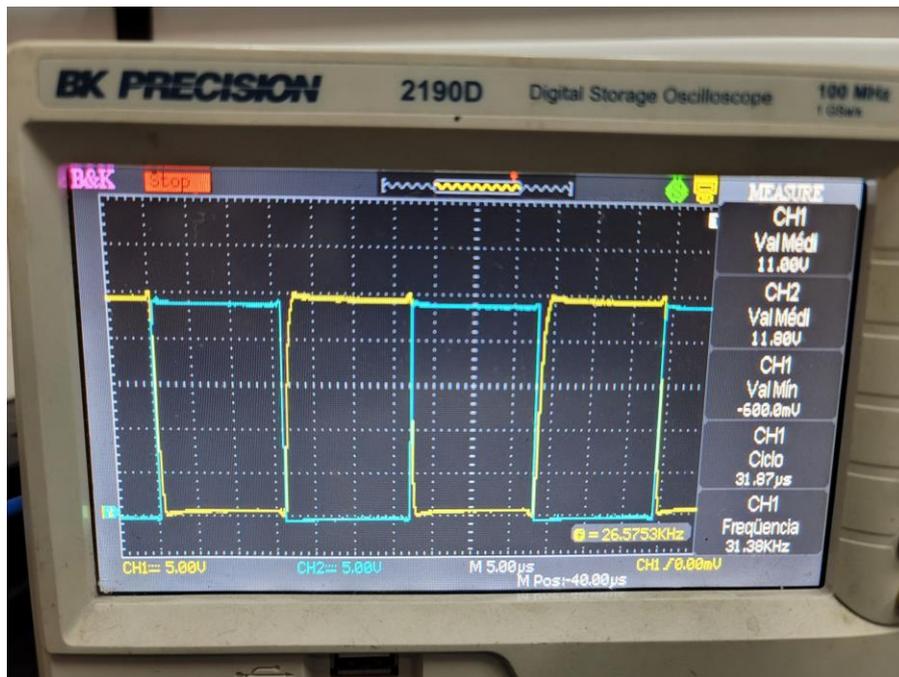


FONTE: Autor (2022)

Na figura 29 vemos os sinais de gate de ambos os MOSFETs presentes no lado de cima da ponte. Observamos que ambos possuem um valor médio próximos o que indica que o circuito está atuando de maneira similar em ambos os lados da ponte, isso se deve ao layout da placa ter sido projetado de maneira simétrica, evitando assim que elementos parasitas distorçam os sinais no comportamento de um dos lados da ponte H.

Apesar do sinal estar funcional percebemos que há uma demora no carregamento do gate do MOSFET, isto pode acabar gerando perdas no chaveamento e levando o aquecimento do componente.

Figura 30 - Sinais na saída para os motores



FONTE: Autor (2022)

Por fim temos na figura 30 temos as saídas que vão para os terminais dos motores. Observamos que apesar de um overshoot na borda de descida do sinal temos um sinal PWM bem próximo do esperado.

Apesar do sucesso ao realizar o acionamento do motor notou-se uma elevação na temperatura dos MOSFETs o que mostra a possibilidade da escolha incorreta do resistor de entrada do gate fazendo com que haja um maior tempo na transição entre o estado aberto e fechado.

Tendo feito a análise dos sinais foi possível conectar um motor DC e acioná-lo. Sendo capaz de rotacionar em ambos os lados além de ser capaz de alterar sua velocidade.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O protótipo mostrou que o projeto está se encaminhando em uma boa direção, sendo possível utilizar os componentes escolhidos para a realização do projeto.

Apesar da simplicidade do circuito da ponte H podemos ver que o seu acionamento é muito mais complexo que sua teoria. O MOSFET possui diversos cuidados para realizar o seu acionamento e isso torna o projeto mais complexo.

Fazendo o uso de diversos componentes distintos, percebeu-se também a importância do acompanhamento de um datasheet na hora de se projetar o circuito. Diversas dicas e regras referentes ao seu funcionamento estão presentes neste documento. Não somente para parte de projeto o datasheet se mostrou bastante importante no momento de escolha dos componentes mostrando a limitação de componentes e suas condições ideais de operação.

O desenvolvimento do Layout do circuito se mostrou bastante complexo devido a grande quantidade de variáveis que podem impactar no seu funcionamento.

O desenvolvimento do Firmware que faz o acionamento da porta foi bem mais complexo que o esperado, já que em sua maioria exige um cuidado muito grande para não realizar o acionamento incorreto ou em tempos indesejados, o que levaria a queima do circuito.

Foi interessante também buscar soluções e analisar circuitos existentes para entender seu funcionamento, acredito que proporcionou uma base melhor para desenvolver soluções futuramente, de maneira mais rápida e eficiente.

9. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para as próximas versões deste projeto, será realizado as seguintes ações:

- Revisar o valor do resistor do gate
 - Seria interessante realizar simulações em software para encontrar um valor de resistência ideal para a aplicação
- Desenvolver uma estrutura mecânica de modo a melhorar a dissipação de calor e de modo que proteja a placa.

10. REFERÊNCIAS

[1] INATEL. DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM VEÍCULO AUTOGUIADO EM AMBIENTE INDUSTRIAL. Disponível em: <https://inatel.br>. Acesso em: 15 abr. 2022.

[2] DIMENSION ENGINEERING.SABERTOOTH 2X60. Disponível em: <https://www.dimensionengineering.com/products/sabertooth2x60> Acesso em: 15 abr. 2022.

[3] RIZZONI, G. Aquisição de Sinais em Sistemas Eletrônicos. 1. ed. Prentice Hall, 2001.

[4] EMBARCADOS. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/ponte-h-bootstrap-acionamento-motores-dc/> Acesso em: 16 abr. 2022.

[5] VEJA.O DESAFIO DE PRODUZIR MAIS. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/revista-veja/o-desafio-de-produzir-mais/>. Acesso em: 28 abr. 2022.

[6] DATAINTELO. Disponível em: <https://dataintel.com/report/advanced-automated-guided-vehicle-agv-market/> Acesso em: 09 Mar. 2022.

[7] FAIRCHILD. DESIGN AND APPLICATION GUIDE OF BOOTSTRAP CIRCUIT FOR HIGH VOLTAGE GATE DRIVE IC Disponível em: <https://www.eeweb.com/wp-content/uploads/articles-app-notes-files-design-and-application-guide-of-bootstrap-circuit-for-high-voltage-gate-drive-ic.pdf/> Acesso em: 09 Mar. 2022.

[8] IFSC. PULSE WIDTH MODULATION Disponível em: [https://wiki.sj.ifsc.edu.br/index.php/ESTE:_Pulse_Width_Modulation_\(PWM\)](https://wiki.sj.ifsc.edu.br/index.php/ESTE:_Pulse_Width_Modulation_(PWM)) Acesso em: 09 Mar. 2022

[9] VITORINO, MONTIÊ ELETRÔNICA DE POTENCIA: FUNDAMENTOS, CONCEITOS E APLICAÇÕES:2019, 1ª Edição.

[10] R. C. Dorf, "The Electrical Engineering Handbook", CRC Press, 3rd ed., (2006).(REGULADORES DE TENSÃO)

[11] PERTENCE JUNIOR, A. Amplificadores operacionais e filtros ativos : teoria, projetos, aplicacoes e laboratorio. Porto Alegre (RS): ARTMED, 2003.(AMPOPS)

[12] Arduino. (2022). Arduino IDE. [online] Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/software> [Acessado em 8 de fevereiro de 2023].

[13] National Instruments. (2021). Bridge H Configuration. [online] Disponível em: <https://www.ni.com/en-us/support/documentation/supplemental/09/the-bridge-h-configuration.html> [Acessado em 8 de fevereiro de 2023].(PONTE H)

[14] W. Liu, et al., "A new topology of single-switch isolated DC-DC converter with bootstrap function", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 7, pp. 3047-3056, 2013.

[15] H. W. Tsai, "Snubber Circuits to Suppress High-Frequency Switching Transients", John Wiley & Sons, 2011.

[16] D. H. Sheingold, "Current Shunts and Current Sensors: An Overview", Measurement Science and Technology, vol. 17, no. 8, 2006.

.