

Faculdade de Tecnologia de Santo André
Tecnologia em Eletrônica Automotiva

Yuri Nakahara de Mendonça

Otimização do driver para motor Brushless

Santo André - SP

2018

Faculdade de Tecnologia de Santo André

Otimização do driver para motor Brushless

Monografia apresentada para a
conclusão do Curso de
Tecnologia em Eletrônica
Automotiva pela Faculdade de
Tecnologia de Santo André

Orientador: Prof. Luiz Vasco Puglia

Santo André -SP
2018

Ficha Catalográfica

M539o

Mendonça, Yuri Nakahara de
Otimização do driver para motor brushless / Yuri Nakahara de
Mendonça. - Santo André, 2018. – 57f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2018.

Orientador: Prof. Luiz Vasco Puglia

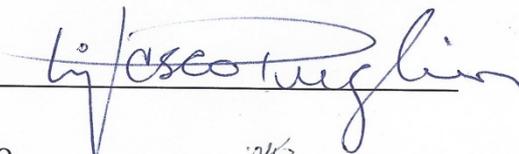
1. Eletrônica. 2. Driver. 3. Motor brushless. 4. Veículos. 5.
Maratona. 6. Eficiência energética. 7. Potência. I. Otimização do
driver para motor brushless.

621.389

LISTA DE PRESENÇA

SANTO ANDRÉ, 10 DE DEZEMBRO DE 2018.

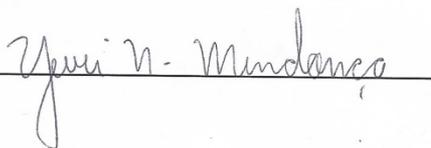
LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA
“Otimização do driver para motor Brushless” DO ALUNO DO 6º
SEMESTRE DESTA U.E.

BANCAPRESIDENTE:
PROF. LUIZ VASCO PUGLIAMEMBROS:
PROF. LUIS ROBERTO KANASHIRO

PROF. ERIKI TAKARA

**ALUNOS:**

YUTI NAKAHARA MENDONÇA



Agradecimentos

A minha família pelo incentivo e encorajamento, aos amigos pelo apoio e ajuda no decorrer da monografia, ao professor Luiz Vasco Puglia pelo apoio e incentivo no desenvolvimento e finalização do projeto e a todos os colegas e professores que de alguma maneira ajudaram com material de estudo e incentivo a acabar este trabalho.

"Determinação coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho." (Dalai Lama)

Resumo

A FATEC Santo André, instituição que serve de base para escolha deste trabalho científico, participa de uma competição de eficiência energética. Nesta competição um veículo de construção própria, com capacidade de locomover um condutor de no mínimo 50Kg, acionado por um motor a combustão ou elétrico, deve percorrer um circuito pré-determinado com condições mínimas de velocidade e tem seu consumo mensurado ao final. Nomeia-se para ambas categorias (elétrico ou combustão) o vencedor ao final que apresentar o menor consumo de energia na prova. Neste estudo de caso, é feito com foco no veículo elétrico, com estudo no Power Train de movimentação do veículo. Atualmente motores brushless são utilizados com maior eficiência na competição pela maioria dos projetos. Na FATEC isto também ocorre, de forma que este estudo teve foco no drive de acionamento do motor, buscando aumento de eficiência energética. Inicia-se pela reengenharia existente no drive atual, e propostas de modificações são efetuadas, aplicadas e aferidas em bancada, para validação, com discussão sobre os componentes de potência aplicados e na topologia elétrica proposta.

Abstract

The FATEC Santo André, an institution that serves as the basis for choosing this scientific work, participates in an energy efficiency competition. In this competition a vehicle of its own construction, capable of locomoting a conductor of at least 50 kg, driven by a combustion engine or electric, must go through a predetermined circuit with minimum speed conditions and has its consumption measured at the end. It is named for both categories (electric or combustion) the winner at the end that presents the lowest energy consumption in the race. In this case study, it is done focusing on the electric vehicle, with study in the Power Train of vehicle movement. Currently brushless motors are used more efficiently in competition for most designs. In FATEC this also occurs, so that this study focused on the drive motor drive, seeking an increase in energy efficiency. It starts with the reengineering existing in the current drive, and modifications proposals are made, applied and benchmarked, for validation, with discussion about the applied power components and the proposed electric topology.

Índice de figuras

Figura 1: Veículo de eficiência energética.....	17
Figura 2: Motor elétrico simples	19
Figura 3: Motor síncrono AC	20
Figura 4: Motor de passo	20
Figura 5: Motor de passo em visão de corte	21
Figura 6: Motor para bicicleta elétrica	22
Figura 7: Visão interna de um motor BLDC	24
Figura 8: Torque x Velocidade	27
Figura 9: Torque x Velocidade para o Motor Bobinado em Derivação	29
Figura 10: Torque x Velocidade para o Motor Bobinado em Série	30
Figura 11: Torque x Velocidade para o Motor Bobinado Composto	30
Figura 12: Torque x Velocidade para o Motor de ímã Permanente	31
Figura 13: Armadura em Forma de Disco	32
Figura 14: Motor sem núcleo.....	32
Figura 15: Transistor BJT	33
Figura 16: Transistor JFET	34
Figura 17: Estrutura básica de um transistor MOSFET	35
Figura 18: Transistor IGBT	36
Figura 19: Primeira pilha elétrica.....	37
Figura 20: Bateria de chumbo para carros.....	39
Figura 21: Pilhas recarregáveis.....	40
Figura 22: Bateria de notebook	40
Figura 23: Diagrama de um circuito "Ponte H"	41
Figura 24: Acionamento do motor elétrico por ponte H.....	42
Figura 25: Driver de saída genérico	43
Figura 26: Driver de saída genérico 2	44
Figura 27: Driver padrão do motor	44
Figura 28: Osciloscópio minipa MO 2061	45
Figura 29: Multímetro minipa ET-2042D	46
Figura 30: Gerador De Função minipa Mfg-4202.....	46
Figura 31: Fonte de corrente contínua	47
Figura 32: Reostato para até 7 kilowatts.....	48

Figura 33: Design inicial da carroçaria	49
Figura 34: Veículo com driver genérico	50
Figura 35: Funcionamento das bobinas do motor (original e genérico)	50
Figura 36: funcionamento das bobinas do motor com o genérico 2	51
Figura 37: Sinal da queda de tensão no transistor	51
Figura 38: Medição do consumo de energia	52
Figura 39: Valor do consumo de energia em carga	52

Lista de Equações

Equação 1: Radianos por segundo e rotações ou rotações por minuto	26
Equação 2: Calculo da velocidade rotacional	26
Equação 3: relações entre torque e corrente	26
Equação 4: Calculo da potência de saída	27
Equação 5: calculo da potência dissipada	28
Equação 6: Calculo da resistência total	28
Equação 7: Calculo da variação da temperatura	28
Equação 8: Calculo da temperatura do motor.....	28

Siglas e Abreviaturas

AC: Alternating Current (corrente alternada);

BJT: Bipolar Junction Transistor;

BLDC: Brushless Direct Current;

Cd: Cadmio;

CV: Cavalo Vapor;

DC: Direct Current (corrente continua);

EMI: Electro Magnetic Interference;

F: Força;

FCEM: Força Contra Eletromotriz;

H₂SO₄: Acido Sulfúrico

H₂O: Água;

HP: Horse Power (cavalo potência);

I: Corrente de indução;

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor;

j: Constante de proporcionalidade;

JFET: Junction Field Effect Transistor;

k: Constante de Torque;

Li_yC₆: Sal de Lítio;

MOSFET: Metal Oxid Semiconductor Function Effect Transistor;

Nmosfet: MOSFET do tipo n;

NiO₂: Óxido de Níquel;

Pb: Chumbo;

P_{dis}: Potência dissipada;

Pmosfet: MOSFET do tipo p;

PMSC: Permanent Magnet synchronous;

P_o: Power out (potência de saída);

R: Rotação;

RPM: Rotações Por Minuto;

RT: Resistência Total;

Sen: Seno do Angulo;

ΔT: Variação da temperatura;

T_{amb}: Temperatura ambiente;

TM: Temperatura do Motor;

T: Torque;

V: Tensão;

Vcc: Tensão de corrente contínua;

ω : Velocidade rotacional;

W: Watts;

Sumário

1. Introdução	16
1.1 Motivação	17
1.2 Objetivo.....	18
2 Fundamentação Teórica	19
2.1 Motor elétrico	19
2.1.2 Motores de passo.....	20
2.1.3 Motores Brushless	21
2.1.4 Princípio de funcionamento do Motor BLDC	23
2.1.5 Especificações Básicas ou Primárias	25
2.1.6 Velocidade do eixo	25
2.1.7 Tensão disponível	27
2.1.8 Especificações Derivadas ou Secundárias	27
2.1.9 Potência de saída	27
2.1.10 Parâmetros de Construção	28
2.2 Transistor	33
2.2.1 BJT.....	33
2.2.2 JFET.....	34
2.2.3 MOSFET	34
2.3 Bateria	36
2.3.1 Funcionamento	38
2.3.2 Baterias de chumbo	39
2.3.3 Bateria de Níquel-Cádmio.....	39
2.3.4 Bateria de íons Lítio	40
2.4 Ponte H.....	41
3 <i>Materiais e procedimentos</i>	43
3.1 Drivers	43
3.2 Equipamentos.....	45
3.3 As competições.....	48
3.4 Testes	50

<i>5 Propostas futuras</i>	55
<i>6 Referencias bibliográficas</i>	56

1. Introdução

O veículo automotor é algo indispensável nos dias atuais, sendo assim é imprescindível que ele esteja em constantes atualizações para o mercado e o meio ambiente. Atualmente ainda se tem grande parte desses veículos movidos por combustíveis fósseis ou biocombustíveis, porém a alguns anos a indústria automotiva vem se modificando e desenvolvendo veículos híbridos ou elétricos, por necessidade de mercado, para atender as normas e pelo fato do combustível ser uma forma de energia finita.

A competição de veículo de eficiência energética tem como objetivo percorrer um percurso pré-determinado com a menor quantidade de energia possível utilizando como meio de propulsão um motor elétrico, não existe restrição quanto ao material da estrutura e nem para o piloto.

Tendo em vista o objetivo de diminuir a energia gasta no percurso, faremos uma reengenharia no controlador do motor elétrico e um vetor ótimo, utilizando associações de transistores e mapeando a forma de conduzir o veículo, fazendo com que aceleremos nos momentos adequados e aproveitemos da melhor maneira o trajeto.

Um relatório do Boston Consulting Group (BCG), afirma que o mercado de veículos elétricos e híbridos atingirá seu ponto de inflexão em 2030. A previsão é de que a participação dos carros eletrificados subirá lentamente até 2025, mas a partir daí vai se acelerar rumo a caminho sem volta. Em 2030, o mercado de carros com motor a combustão interna será reduzido a 50%.

1.1 Motivação

Atualmente o mercado automotivo busca obter os mesmos valores de maneira a usar cada vez menos energia possível com o objetivo de operar nas normativas ambientais, sendo assim o desenvolvimento na área de veículos híbridos e elétricos vem crescendo cada vez mais para desenvolver forma(s) de utilizar a menor quantidade possível de energia (bateria e combustível) para gerar uma maior autonomia no veículo.

Recentemente a indústria automobilística mundial vem apresentando vários protótipos e lançamentos de veículos elétricos e híbridos motivados pelo vislumbre de um novo mercado que irá se formar no futuro. Alguns governos de países desenvolvidos, e em desenvolvimento, já adotaram medidas para incentivar a formação de um mercado de consumo para esse tipo de veículo.

A produção de carros movidos a energia elétrica aumentou pelo mundo, já provoca mudanças na indústria automobilística e promete transformações na mobilidade urbana. A frota global de automóveis elétricos e híbridos superou 2 milhões de unidades em 2016, um aumento de 60% em relação ao ano anterior.

A criação dos eventos de eficiência energética tem esse objetivo, utilizando veículos “pré-determinados” que devem percorrer um circuito de maneira a consumir a menor quantidade de energia, que posteriormente poderá ser usado em outros veículos. Um exemplo destes protótipos pode ser visto na figura 1.

Figura 1: Veículo de eficiência energética



Fonte: Autor

1.2 Objetivo

A meta do trabalho é desenvolver um estudo que gere uma ou mais maneiras de otimizar o motor com um módulo de controle de maior eficiência, tentando fazer o circuito com o menor gasto de energia possível, utilizando associações de transistores.

Desenvolver um vetor ótimo para criar um “mapa” tendo em vista consumir menos energia, encontrando os pontos em que devemos acelerar ou frear o veículo.

Esse projeto apresenta um possível maneira que poderá ser aplicado em veículos elétricos (bicicletas inicialmente), focando principalmente, na economia de energia, tendo em vista que nos próximos anos eles começarão a crescer no mercado para poder atender as exigências das normas de emissões de poluentes (Euro x, PROCONVE, ANFAVEA, etc.)

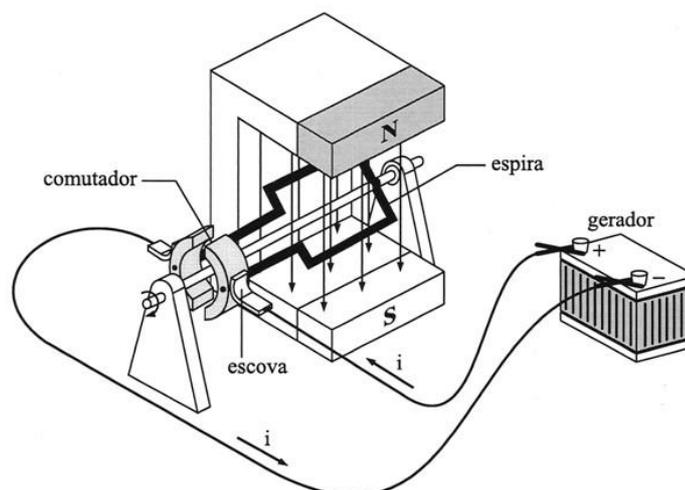
2 Fundamentação Teórica

2.1 Motor elétrico

Motores elétricos são encontrados nas mais variadas formas e tamanhos, cada qual apropriado a sua tarefa. Alguns motores operam com corrente contínua (CC / DC) e podem ser alimentados por pilhas, baterias ou quaisquer fontes de alimentação adequadas, outros requerem corrente alternada (CA / AC) e podem ser alimentados diretamente pela rede elétrica domiciliar. Há até mesmo motores que trabalham, indiferentemente, com esses dois tipos de correntes, denominados de motor universal. Um verdadeiro motor elétrico DC não aceita alimentação AC, pois essa inverte o sentido da corrente a cada meio ciclo e isso apenas causa trepidações, do mesmo modo, um verdadeiro motor AC não aceita alimentação DC, pois essa alimentação não oferecerá as convenientes alterações do sentido da corrente para o correto funcionamento do motor.

Porém, se substituirmos os ímãs permanentes dos estatores dos motores DC por eletroímãs e ligarmos (em série) esses eletroímãs no mesmo circuito do rotor e comutador, teremos um motor universal.

Figura 2: Motor elétrico simples



Fonte: www.sciencejoywagon.com/physicszone/lesson/otherpub/wfendt/eletricmotor

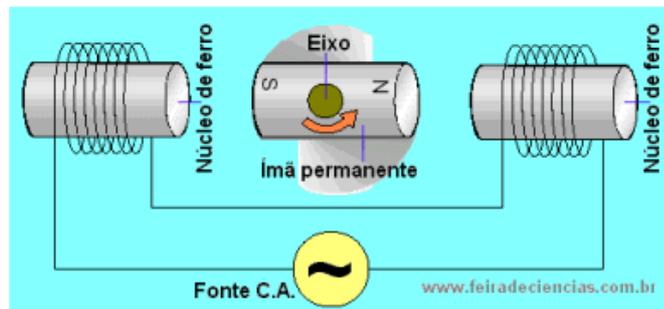
2.1.1 Motores AC

Os motores AC de ímã permanente são referidos frequentemente como motores sem escova ou motores DC sem escovas. Essa terminologia surge devido à similaridade com motores DC, quando combinada com um sistema de acionamento de frequência e tensão variáveis, entre suas características de velocidade versus conjugado, e também “devido ao fato de que é possível ver esses motores como

sendo motores CC às avessas, em que o circuito de campo está no rotor e a armadura é comutada eletronicamente pelo sensor de posição e por interruptores conectados aos seus enrolamentos” (Fitzgerald, 2006).

O motor síncrono AC possui o enrolamento da armadura no estator, e este por indução faz girar o rotor que é um ímã permanente. O rotor gira com frequência igual ou múltipla daquela da AC aplicada.

Figura 3: Motor síncrono AC



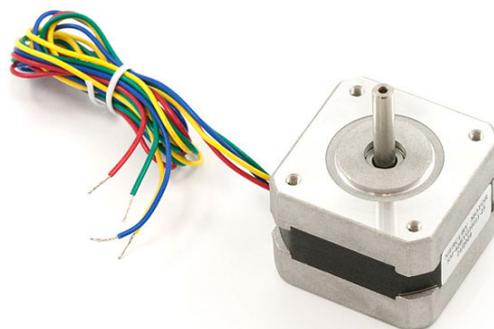
Fonte: www.feiradeciencias.com.br/sala22/motor_teor1.asp

O motor síncrono AC é essencialmente um motor DC virado do avesso. As escovas e o comutador são eliminados e os enrolamentos são conectados ao controle eletrônico. O controle eletrônico substitui a função do comutador e energiza o enrolamento adequado.

2.1.2 Motores de passo

O motor de passo é um tipo de motor elétrico utilizado em movimentos que exigem rotação em um ângulo exato. São encontrados com ímã permanente (divididos em: unipolar, bipolar e multifase) e relutância variável.

Figura 4: Motor de passo

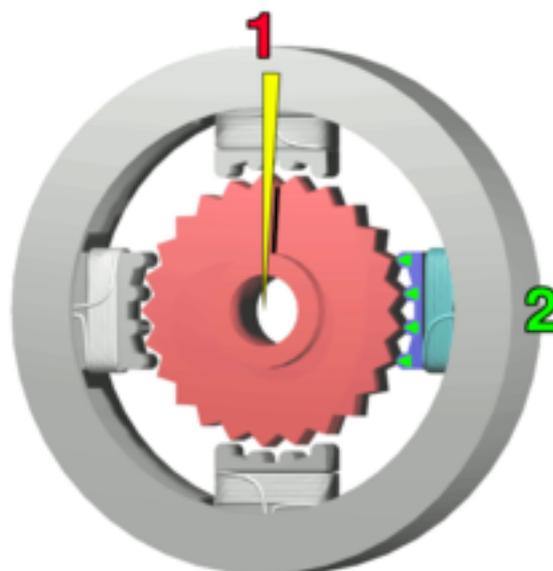


Fonte: multilogica-shop.com/motor-de-passo-com-cabo

O motor de relutância variável, usualmente, tem três ou às vezes quatro bobinas, com um ponto comum. Já o motor de ímã permanente, usualmente, tem duas

bobinas independentes, com ou sem o comum central. São controlados por uma série de campos eletromagnéticos ativados e desativados eletronicamente.

Figura 5: Motor de passo em visão de corte



Fonte: pt.wikipedia.org/wiki/Motor_de_passo

Motores de passo não usam escovas ou comutadores, possuem um número fixo de pólos magnéticos que determinam o número de passos por evolução. Ao se alimentar uma das bobinas, é gerado um campo magnético no estator, que induz o rotor a alinhar-se com o campo, gerando um movimento chamado “passo”.

Quanto ao torque, uma característica exclusiva deste tipo de motor é a sua habilidade de poder manter o eixo em uma posição, segurando o torque sem estar em movimento. Para atingir todo o seu torque, as bobinas de um motor de passo devem receber, durante cada passo, toda a corrente marcada proveniente do controlador do motor. O torque do motor é uma grandeza vetorial da física. É definido como a fração de força aplicada sobre um objeto que é efetivamente utilizado para fazê-lo girar em torno de um eixo, conhecido como ponto pivô. “A distância do ponto do pivô ao ponto onde atua uma força F é chamada braço do momento e denotada por r , dado pela rotação vetorial modular $T = R F \sin(\varphi)$.” (Silva, 2006).

2.1.3 Motores Brushless

Num motor de ímãs permanentes sem escovas (BLDC), “o rotor é composto de um ou mais ímãs e o enrolamento de armadura faz parte do estator, similar ao motor polifásico de corrente alternada convencional, sendo a configuração mais comum e

mais eficiente a de três fases” (KENJO; NAGAMORI, 1985). Desta maneira, a corrente da armadura não é conduzida através de escovas e comutadores ou anéis. “Isto representa uma vantagem expressiva, uma vez que 90% das rotinas de manutenção padrão em motores estão relacionadas aos contatos deslizantes” (GIERAS; WING, 2002).

Figura 6: Motor para bicicleta elétrica



Fonte: produto.mercadolivre.com.br/MLB-699466295-motor-dianteiro-250w-36v-para-bicicleta-eletrica-_JM

Os motores síncronos de ímã permanente (PMSC – Permanent-Magnet synchronous Motor) são classificados em motores Brushless AC (BACM) e Motores Brushless DC (BDCM). Os circuitos elétricos e magnéticos dos BACM e dos BDCM são similares, isto é, o enrolamento de armadura polifásico (geralmente de três fases), está localizado nas ranhuras do estator, e o rotor com ímã permanente serve como sistema de excitação. Basicamente, o que os diferencia é a forma de onda da corrente aplicada ao enrolamento de armadura e a distribuição do fluxo magnético gerado (MONTEIRO, 2002).

Os Brushless AC são alimentados com formas de onda de tensão senoidal trifásica e operam no princípio dos campos girantes. Normalmente, não é necessária uma técnica de controle para a posição do rotor quando são constantes a tensão e a frequência (GIERAS; WING, 2002). Já os Brushless DC usam realimentação direta da posição angular do rotor de modo que a corrente de armadura seja comutada entre as fases do motor, em sincronismo exato com a posição do rotor.

Este conceito é conhecido como sincronização controlada, ou comutação eletrônica. O inversor eletrônico e os sensores de posição são equivalentes aos comutadores mecânicos em motores de corrente contínua convencionais e, justamente por apresentarem tal característica, estes motores recebem este nome. São de construção mais simples que os Brushless AC, pois a disposição de suas espiras facilita a montagem dos estatores e podendo utilizar menor quantidade de fios de cobre.

2.1.4 Princípio de funcionamento do Motor BLDC

Motores Brushless são basicamente motores DC ao avesso. Em um motor DC o circuito de campo está no estator. O rotor tem os enrolamentos da armadura, os quais são excitados com uma corrente. A corrente no rotor é invertida para criar uma rotação ou campo elétrico em movimento por meio de divisão do comutador e escovas. Por outro lado, em um motor Brushless os enrolamentos estão no estator e os ímãs permanentes estão localizados no rotor. Portanto o termo motor DC ao avesso. Para fazer o rotor girar, deve haver um campo elétrico em rotação. Tipicamente um motor Brushless trifásico tem um estator trifásico com duas bobinas excitadas por vez para criar um campo elétrico girante.

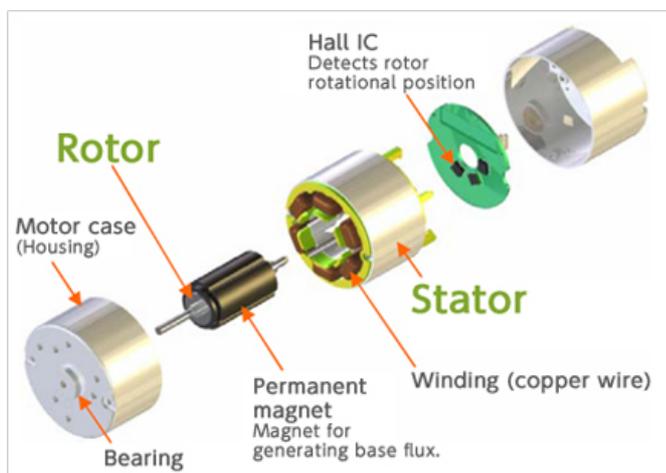
Esse método é fácil de implementar, mas para evitar que o rotor de ímã permanente fique travado com o estator, a excitação do estator deve ser chaveada de uma maneira específica enquanto se sabe a exata posição do rotor. A informação de posição pode ser obtida por um encoder acoplado ao eixo do motor, ou mais frequentemente, por sensores de efeito Hall que detectam a posição do rotor. Para um motor trifásico típico, do tipo Brushless há seis regiões distintas ou setores nas quais dois enrolamentos específicos são excitados.

O motor é geralmente operado com um ou mais sensores de posição uma vez que a excitação elétrica deve ser sincronizada com a posição do rotor. As comutações são efetuadas por comutadores eletrônicos (transistores bipolares de porta isolada, transistores de efeito de campo ou transistores em comutação forçada) (JULIANI, 2009). A posição angular do rotor pode ser determinada por sensores como os do tipo Hall ou por uma estratégia sensorless (GONELLA, 2006) e é utilizada como realimentação no sistema de controle que gera os disparos dos comutadores.

Quanto à configuração, um BLDC pode ter diferentes tipos de rotores, número de fases, de ranhuras e pólos.

A figura 7 ilustra a visão interna de um motor BLDC.

Figura 7: Visão interna de um motor BLDC



Fonte: <http://www.nidec.com/en-Global/technology/capability/brushless/>

A maneira mais fácil de saber o momento correto de comutar as correntes nos enrolamentos e através da utilização de um sensor de posição. Muitos fabricantes de motores BLDC fornecem motores com três sensores de efeito hall para determinação de posição do rotor.

É possível determinar quando comutar a tensão de acionamento do motor pela detecção da força contra eletromotriz (FCEM) em um terminal do motor não acionado durante uma das fases de acionamento. A vantagem óbvia do custo do controle sem sensor é a eliminação dos sensores de posição Hall. Há diversas desvantagens no controle sem sensor:

- O motor deve estar girando a uma velocidade mínima para gerar suficiente FCEM para ser sentida;
- mudanças repentinas na carga do motor podem fazer o loop de acionamento FCEM perder o sincronismo;
- a FCEM só pode ser medida quando a velocidade do motor esta dentro de uma faixa limitada de taxa de comutação ideal para a tensão aplicada;
- comutações a taxas mais rápidas que a taxa ideal resultará em uma resposta descontínua do motor.

Os motores de corrente contínua sem escovas ou BLDC (Brushless DC) oferecem diversas vantagens sobre os motores de corrente contínua com escovas, dentre as quais se podem destacar a confiabilidade mais elevada, o ruído reduzido, a vida útil mais longa (devido à ausência de desgaste da escova), a eliminação da ionização do comutador, e a redução total de interferência eletromagnética (EMI).

Também não ha centelhas ou faíscas. A não utilização de anéis e escovas eliminam as perdas do rotor. Não ha perdas por efeito joule, uma vez que os ímãs não são condutores. Apresenta grande adaptação as características de projeto desejadas pelo tipo e arranjo dos ímãs. Para a mesma potência de entrada, os motores BLDC converterão mais energia elétrica em energia mecânica do que um motor de corrente contínua escovado.

A eficiência é maior na região de "baixa carga" e "a vazio" na curva característica do motor. Sob cargas mecânicas elevadas, os motores BLDC e os motores escovados de alta qualidade são equivalentes em eficiência. A desvantagem principal do motor sem escovas é o custo mais elevado, a qual se deve a dois fatores: primeiramente, estes motores requerem dispositivos MOSFET de alta potência na fabricação do controlador eletrônico de velocidade. Por outro lado, os motores de corrente contínua com escovas podem ser regulados por um resistor variável simples (potenciômetro ou reostato), mesmo sendo ineficiente, ele também pode ser satisfatório para algumas aplicações dependendo do custo beneficio. Os motores BLDC necessitam de um controlador eletrônico de velocidade para oferecer o mesmo tipo de controle variável.

2.1.5 Especificações Básicas ou Primárias

Existem três fatores principais que você precisa levar em consideração quando for selecionar um Motor CC: A velocidade, o torque e a tensão. Sabendo estas três especificações, você será capaz de saber qual o motor e fabricante atenderá suas necessidades.

2.1.6 Velocidade do eixo

Um motor CC aplica uma tensão (V) para rodar um eixo a uma velocidade de rotação proporcional (ω). As especificações de velocidade do eixo geralmente se referem à velocidade sem carga, que é a velocidade máxima que o motor pode alcançar quando não há torque aplicado. Tipicamente, a velocidade do eixo é dada em rotações ou rotações por minuto (RPM). Estas rotações ou revoluções também podem ser representadas em radianos por segundo (rad/s) e para cálculos numéricos, o valor em radianos pode ser mais conveniente.

Equação 1: Radianos por segundo e rotações ou rotações por minuto

$$\omega \text{ [rad/s]} = \omega \text{ [rpm]} \cdot (2\pi/60) \quad \text{Eq (1)}$$

Para um motor CC ideal (que não possui perdas), a velocidade rotacional é proporcional à tensão fornecida, sendo:

Equação 2: Calculo da velocidade rotacional

$$\omega = j \cdot V \quad \text{Eq(2)}$$

onde j é uma constante de proporcionalidade, dada em $\text{rad}/(\text{s}\cdot\text{V})$.

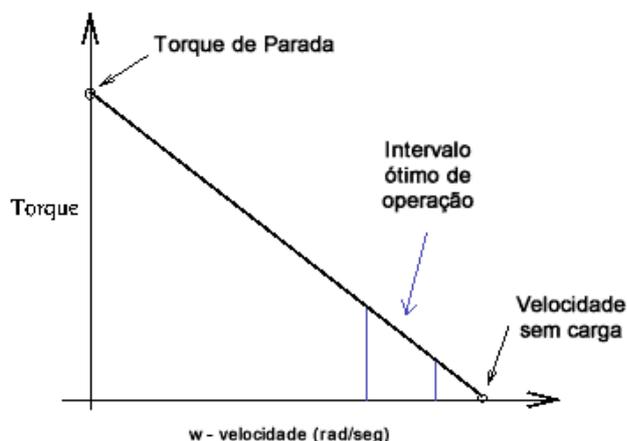
Torque de saída: A rotação do eixo gera uma força de rotação chamada torque (τ). O torque é dado em unidades de força-distância (lb-ft, oz-in, N-m, etc.) ele pode ser de dois tipos: torque de partida ou torque contínuo. O torque de partida é o τ no qual a velocidade do eixo é zero ou o motor está parado. Já o torque contínuo é o máximo τ em condições normais de funcionamento. Observe pela fórmula 3 que o torque (τ) de um motor CC é proporcional à corrente de indução (I), sendo que neste caso temos a constante de torque (k).

Equação 3: relações entre torque e corrente

$$\tau = k \cdot I \text{ ou } I = \tau / k \quad \text{Eq (3)}$$

A importância da constante de torque é evidenciada na equação acima. Para um dado torque, um valor alto de k limita a corrente a um valor baixo. Esta é uma medida de eficiência, uma vez que um menor consumo de corrente significa menor dissipação de energia (calor). Conhecendo a constante de torque e o torque produzido podemos calcular a corrente através da armadura, que é utilizada para sabermos a classificação de temperatura (como será mostrado mais adiante). Como o torque é proporcional à velocidade, podemos traçar um gráfico de torque x velocidade conforme Figura 8:

Figura 8: Torque x Velocidade



Fonte: <https://www.citisystems.com.br/motor-cc/>

2.1.7 Tensão disponível

Os motores de corrente contínua podem ser projetados para operar a uma tensão específica caso houver a necessidade. No entanto sempre devemos observar a disponibilidade de fonte de alimentação adequada para cada aplicação. As fontes de alimentação mais comuns no mercado são 12Vcc e 24Vcc, mas é comum conversores que realizam a retificação de tensões em 110V e 220V a fim de fornecer qualquer nível de tensão necessário para a sua aplicação. Não se esqueça que como a velocidade depende da tensão, a alimentação poderá ser um limitante caso não for feita uma especificação adequada do motor CC.

2.1.8 Especificações Derivadas ou Secundárias

As folhas de dados dos motores CC também possuem parâmetros que são derivados ou relacionados com os requisitos fundamentais (tensão, velocidade e torque). Podemos citar:

2.1.9 Potência de saída

Uma especificação comum e importante é a potência nominal de saída (P_o) que representa o produto do torque pela velocidade do motor. Na forma de equação, a potência de saída é dada por:

Equação 4: Calculo da potência de saída

$$P_o = \tau \cdot \omega$$

Eq (4)

A potência máxima de saída ocorre quando o motor está em 50% da velocidade sem carga e 50% do torque de parada e muitos fornecedores especificam a potência de saída em termos de CV ou HP. Lembre-se que para converter um valor calculado de potência de unidades de watts (W) para unidades de HP, divida a potência em Watts por 746.

Dissipação de potência: A corrente produzida em um motor de corrente contínua aquece o mesmo e cria uma potência dissipada (P_{dis}). O valor de P_{dis} está relacionado com a resistência total do sistema (R_T), que é a resistência de todo o conjunto do motor incluindo as perdas por atrito no estator (R_{stator}) e no rotor (R_{rotor}). Através da corrente do motor, podemos calcular a dissipação de potência e, por sua vez, o aumento da temperatura do rotor (ΔT) devido à rotação. A partir de ΔT , a temperatura total do motor (T_M) pode ser calculada pela adição da temperatura ambiente (T_{amb}). As seguintes equações ilustram os passos utilizados para calcular a temperatura final do motor:

Equação 5: calculo da potência dissipada

$$P_{dis} = I \cdot R \cdot T \quad \text{Eq (5)}$$

Equação 6: Calculo da resistência total

$$R_T = R_{rotor} + R_{stator} \text{ (exceto para o motor cc de íma permanente)} \quad \text{Eq (6)}$$

Equação 7: Calculo da variação da temperatura

$$\Delta T = P_{dis} \cdot (R_{tot}) \quad \text{Eq (7)}$$

Equação 8: Calculo da temperatura do motor

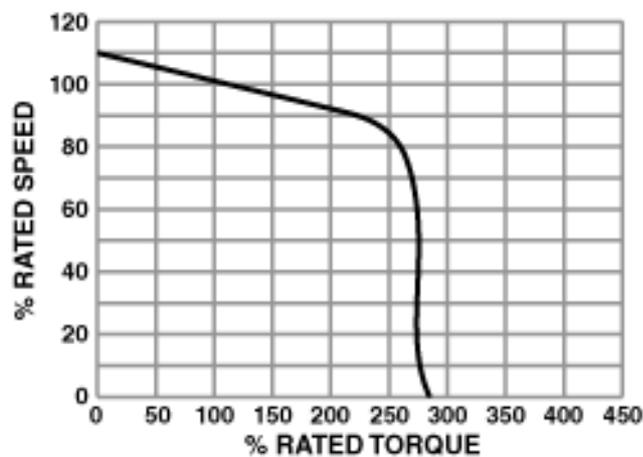
$$T_M = T_{amb} + \Delta T \quad \text{Eq (8)}$$

2.1.10 Parâmetros de Construção

A adequação de um motor CC para uma aplicação também depende da sua construção, outro aspecto do processo de seleção. Existem vários tipos diferentes de motores de corrente contínua, cada um dos quais oferece vantagens e desvantagens com base na sua construção. Vejamos abaixo as características de cada um no que tange à construção:

Os Motores de Derivação apresentam variação mínima de velocidade através da faixa de carga e podem ser configurados para potência constante em uma faixa de velocidade ajustável. Eles são usados para aplicações onde há necessidade de controle preciso de velocidade e torque. Na Figura 9 você pode ver uma curva típica de velocidade x torque para um motor de derivação, onde o torque permanece relativamente constante em uma grande faixa de velocidade.

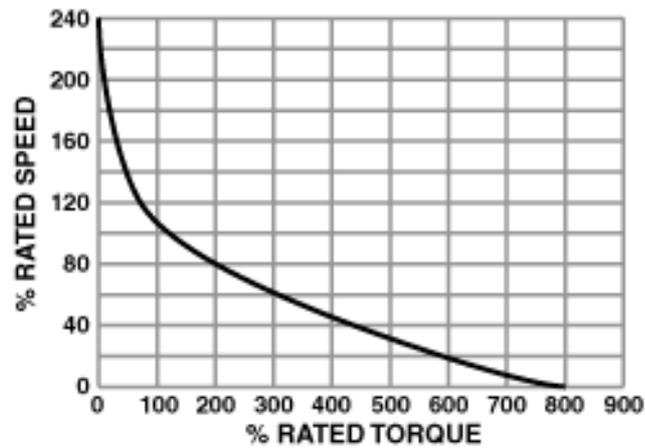
Figura 9: Torque x Velocidade para o Motor Bobinado em Derivação



Fonte: <https://www.citisystems.com.br/motor-cc/>

Os Motores Bobinados em Série exibem altos torques de partida para cargas permanentemente conectadas que são necessárias a fim de evitar danos em condições de alta velocidade. Estes motores desenvolvem um grande torque e podem ser operados a baixas velocidades. Eles são mais adequados para aplicações industriais pesadas que exigem cargas maiores movendo-se lentamente ou cargas mais leves movendo-se rapidamente. Na figura 10 podemos ver uma curva típica de velocidade x torque para motores com bobina em série:

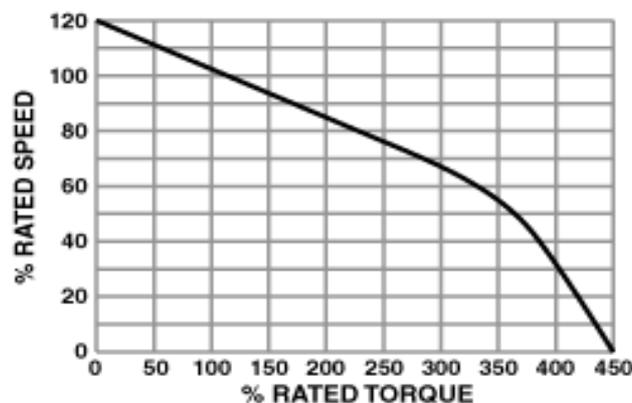
Figura 10: Torque x Velocidade para o Motor Bobinado em Série



Fonte: <https://www.citisystems.com.br/motor-cc/>

Os Motores Bobinados Compostos são projetados com bobinas derivadas compostas para aplicações de velocidade constante que requerem torque mais elevado. Eles são frequentemente usados onde a carga primária requer um torque de partida alto e a velocidade ajustável não é necessária. As aplicações incluem elevadores, guindastes e equipamentos para lojas industriais. Na figura 11 podemos ver uma curva típica de velocidade x torque para os motores de bobina compostos, combinando características de derivação em série:

Figura 11: Torque x Velocidade para o Motor Bobinado Composto

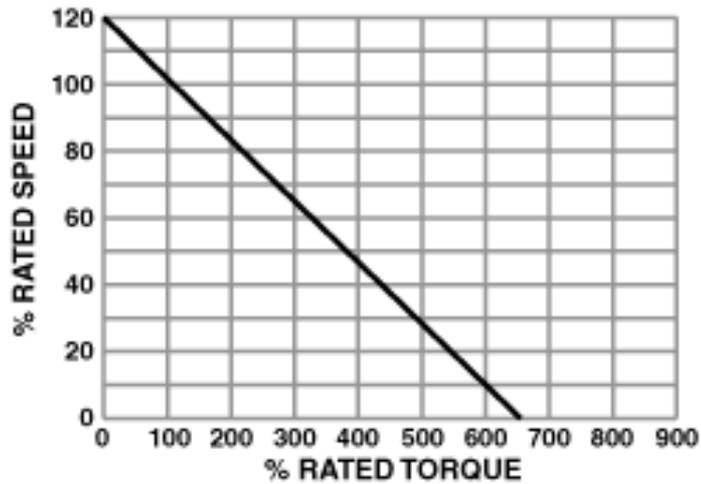


Fonte: <https://www.citisystems.com.br/motor-cc/>

Motores CC de ímã permanente possuem um ímã permanentemente embutido em sua montagem (no estator). Eles oferecem velocidade constante com carga variável

(escorregamento zero) e excelente torque de partida. Comparado com os outros tipos, a construção de ímã permanente proporciona maior eficiência e menores ajustes de velocidade. Na figura 12 podemos ver uma curva de velocidade para motores de ímã permanente, com proporcionalidade de torque e velocidade linear.

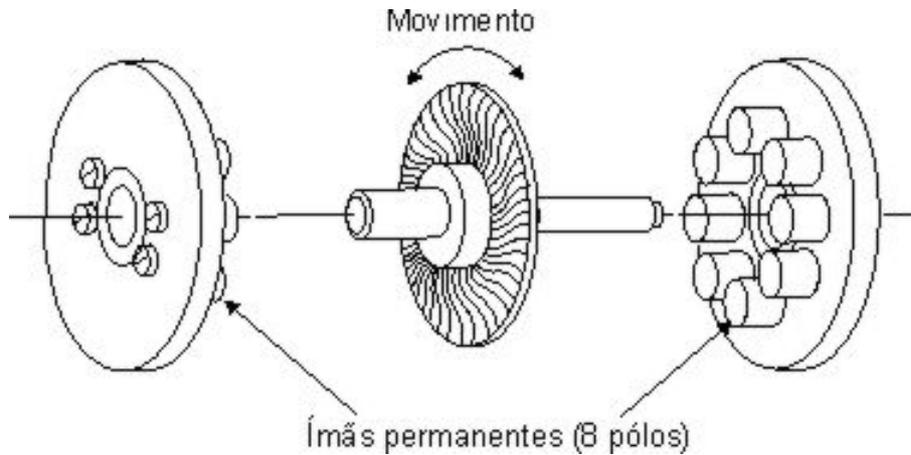
Figura 12: Torque x Velocidade para o Motor de ímã Permanente



Fonte: <https://www.citissystems.com.br/motor-cc/>

Motores CC com armadura em forma de disco, também chamados de “panquecas” ou “discos impressos”, utilizam rotores planos movidos por um campo magnético alinhado axialmente. Sua construção fina permite baixa inércia, resultando em alta aceleração. Esses motores são bons para aplicações que exigem uma rápida inicialização e desligamento enquanto acoplados a uma carga constante, como em um veículo elétrico. Veja na figura 13 o desenho de uma armadura a disco:

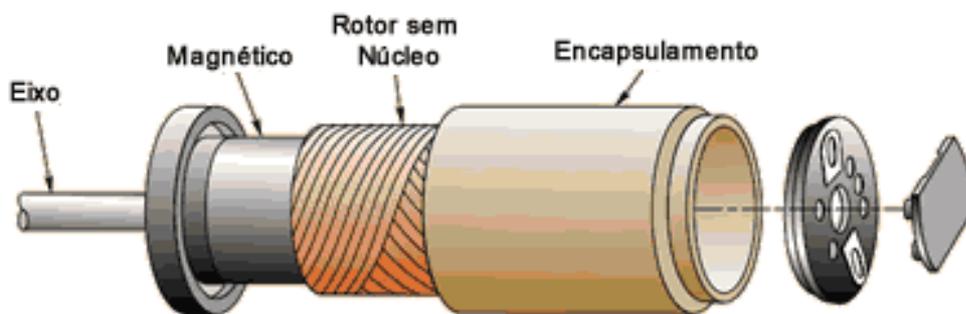
Figura 13: Armadura em Forma de Disco



Fonte: <https://www.citisystems.com.br/motor-cc/>

Os Motores CC sem Núcleo e sem ranhura incorporam um enrolamento cilíndrico que está fisicamente fora de um conjunto de ímãs permanentes. Devido ao fato do enrolamento ser laminado e não existir gaiola de ferro, motores cc sem núcleo possuem inércia muito menor. Possuem alta aceleração, eficiência e excelente controle de velocidade com pouca ou nenhuma vibração. Eles são comumente usados como servo motor para aplicações de controle de processo.

Figura 14: Motor sem núcleo



Fonte: <https://www.citisystems.com.br/motor-cc/>

2.2 Transistor

O transistor é um componente eletrônico semiconductor com várias funções, nomeadamente: amplificador de sinal (tensão), comutador de circuitos e amplificador e regulador de corrente. A palavra transistor resultou da justaposição das palavras transfer + resistor , isto é, resistência de transferência, visto poder ser considerado como uma resistência, fixa ou variável colocada entre o gerador e a carga.

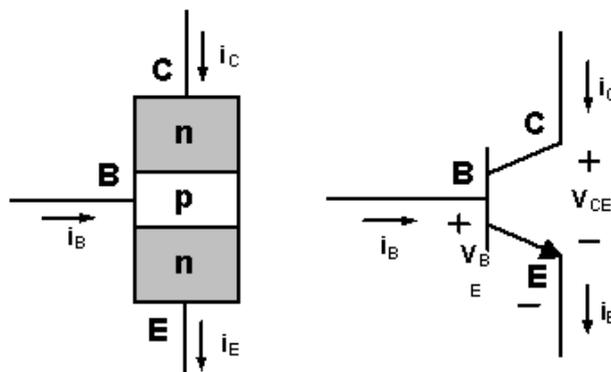
Existem, hoje, diferentes tipos de transistores, nomeadamente o transistor bipolar e o transistor unipolar ou FET. Este último tem diferentes variantes: o JFET (Junction Field Effect Transistor), o MOSFET (Metal Oxid Semiconductor Function Effect Transistor), o Nmosfet (tipo n), o Pmosfet (tipo p).

Os transistores de efeito de campo não são componentes novos. Na verdade, em teoria foram criados antes mesmo dos transistores comuns bipolares. No entanto, com a possibilidade de se obter este dispositivo na versão de alta potência, o MOSFET se tornou um componente extremamente popular que já começa a ser o preferido em muitas aplicações. (BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L.)

2.2.1 TJB

O transistor bipolar ou BJT (Bipolar Junction Transistor) é o mais utilizado, tendo sido aquele que foi primeiro fabricado. É constituído por duas junções PN ligadas entre si, podendo obter-se duas configurações diferentes: o transistor NPN (NP + PN) e o transistor PNP (PN + NP). Destas junções resultam três zonas de condução, às quais foram dados os nomes de Coletor (C), Base (B) e Emissor (E). A Base é a região intermédia, o Coletor e o Emissor ficam nos extremos; o Emissor difere do Coletor por ter mais impurezas do que este. O transistor bipolar fica, portanto, com duas junções designadas por Coletor-Base e Base-Emissor. (BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L.)

Figura 15: Transistor BJT

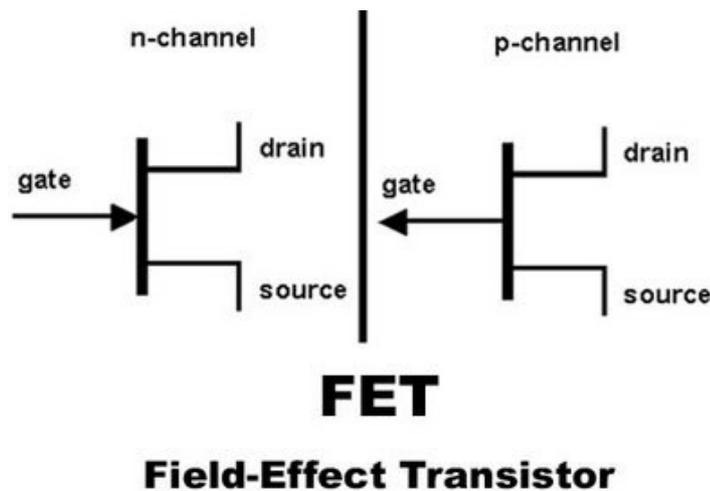


Fonte: macao.communications.museum/por/Exhibition/secondfloor/moreinfo/2_10_3_HowTransistorWorks.html

2.2.2 JFET

JFET ou junção FET é um transistor de efeito de campo que usa materiais portadores de carga colocados perpendicularmente e em contato direto com seu canal para que se possa controlar a passagem de corrente elétrica. Esses materiais podem ser do tipo P (dopado positivamente) ou do tipo N (dopado negativamente) dependendo da dopagem de seu canal, pois eles sempre serão o oposto. Com esses materiais colocados em contato direto com o canal, cria-se uma zona de depleção que é influenciada pelas tensões injetadas no Canal, fazendo com que elas se "abram" ou "fechem" mais, influenciando assim na resistência do canal do JFET.

Figura 16: Transistor JFET



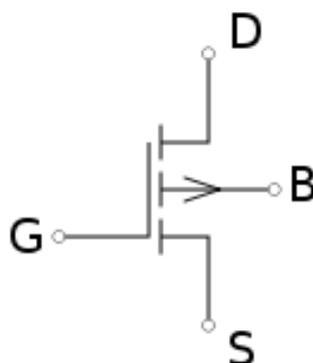
<http://www.marciocunha.eti.br/2015/12/diferencas-entre-transistor-fet-e-mosfet.html>

2.2.3 MOSFET

Os transistores de efeito de campo diferentemente dos transistores bipolares comuns são típicos amplificadores de tensão e não de corrente. Enquanto a corrente de coletor de um transistor comum é função da corrente de base, num transistor de efeito de campo, a corrente de dreno é função da tensão de comporta. O MOSFET é um dispositivo de 4 terminais, Dreno (Drain), Fonte (Source), Porta (Gate), Substrato (Body) sendo que em circuitos discretos, normalmente só tem 3 terminais acessíveis, tendo o substrato ligado à fonte. A dopagem do poço é complementar à

dos terminais.

Figura 17: Estrutura básica de um transistor MOSFET



Fonte: pt.wikipedia.org/wiki/MOSFET#/media/File:Mosfet-wp.svg

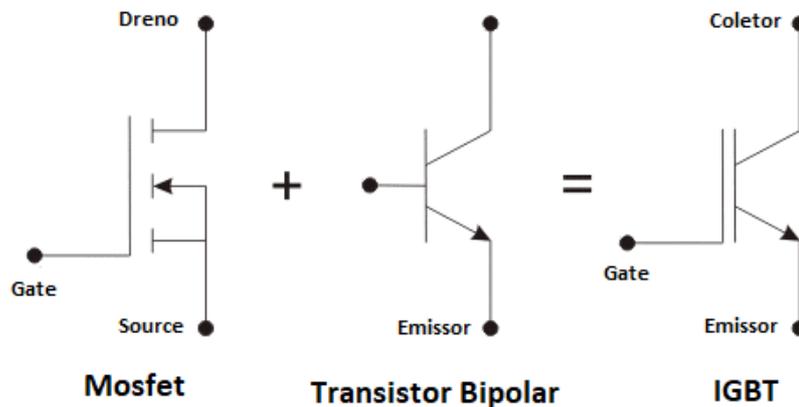
2.2.4 IGBT

O IGBT é um semicondutor de potência que alia as características de chaveamento dos transistores bipolares com a alta impedância dos MOSFETs apresentando baixa tensão de saturação e alta capacidade de corrente. O IGBT destaca-se por possuir alta eficiência e rápido chaveamento. Atualmente é muito utilizado em equipamentos modernos como carros elétricos ou híbridos, trens, aparelhos de ar condicionado e fontes chaveadas de alta potência. Devido a seu projeto que permite rápido chaveamento (liga/desliga), encontra aplicação também em amplificadores e geradores que necessitam sintetizar formas de onda complexa através de PWM e filtros passa-baixa.

O IGBT é uma invenção recente. A primeira geração de dispositivos desse tipo na década de 1980 e início dos anos 90 possuíam chaveamento relativamente lento e seu desligamento (corte na condução) não ocorria enquanto existisse corrente fluindo (característica conhecida na língua inglesa como latchup). A segunda geração de IGBT apresentava melhoria e atualmente, os dispositivos de terceira geração são muito melhores com velocidade de chaveamento equiparada à dos MOSFETs além de excelente tolerância à sobrecarga e durabilidade. (A, NAKAGAWA, 1987)

Basicamente, o IGBT pode ser analisado também como um MOSFET acionando um transistor bipolar. Este arranjo apresenta um transistor parasita, que normalmente é ignorado devido ao avanço tecnológico realizado na construção do componente, que não apresenta mais este inconveniente.

Figura 18: Transistor IGBT



Fonte: www.embarcados.com.br/principios-basicos-do-igbt/

2.3 Bateria

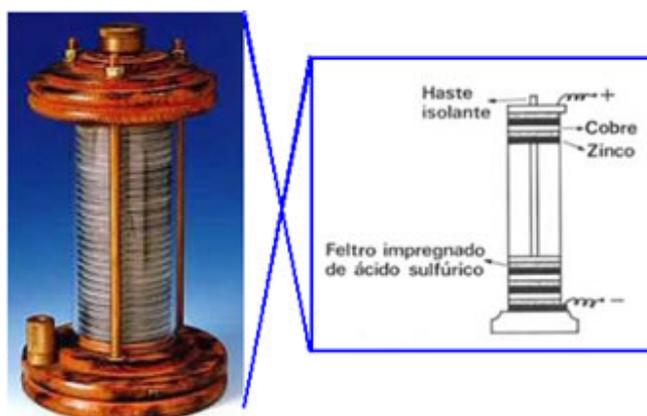
Em 1786, o anatomista italiano Luigi Galvani (1737-1798) dissecou uma rã sobre sua mesa, na qual se encontrava uma máquina eletrostática. Galvani observou contrações nos músculos do animal no momento em que seu assistente por acaso tocou com a ponta de seu bisturi no nervo interno da coxa da rã. Ou seja, isso acontecia no momento em que os tecidos da rã eram tocados por dois metais diferentes. Galvani passou a defender, a partir de tal momento, uma teoria que tentava explicar esse fato: a teoria da “eletricidade animal”. Segundo Galvani, os metais eram apenas condutores da eletricidade, que na realidade estaria contida nos músculos da rã. Entretanto, sua teoria estava errada e isso foi visto pelo físico italiano Alessandro Volta (1745-1827), que realizou vários experimentos e notou que quando a placa e o fio eram constituídos do mesmo metal, as convulsões não apareciam, mostrando que não havia fluxo de eletricidade. Assim, ele passou a defender o conceito (correto) de que a eletricidade não se originava dos músculos da rã, mas sim dos metais e que os tecidos do animal é que conduziam essa eletricidade. Para provar que estava correto, Volta fez um circuito formado por uma solução eletrolítica, ou seja, uma solução com íons dissolvidos, que ele chamava de condutor úmido ou condutor de segunda classe, colocados em contato com dois eletrodos metálicos. Esses últimos, Alessandro Volta designava de condutores secos ou condutores de primeira classe.

Ele fez isso por colocar um condutor úmido (que era uma solução aquosa salina)

entre dois condutores secos (que eram metais ligados por um fio condutor). Nesse momento ele observou que se despertava o fluxo elétrico. Ele passou a entender também que dependendo dos metais que ele utilizava, o fluxo da corrente poderia ser maior ou menor. Desse modo, podemos admitir que a ideia do que é uma pilha já estava sendo entendida e explicada por Volta.

Em 1800, Volta criou a primeira pilha elétrica que passou a ser chamada de pilha de Volta, pilha Galvânica ou pilha voltaica e, ainda, “rosário”. Um esquema dessa pilha é mostrado na figura 19: ele colocou um disco de cobre por cima de um disco de feltro embebido em uma solução de ácido sulfúrico e, por último, um disco de zinco; e assim sucessivamente, empilhando essas séries até formar uma grande coluna. O cobre, o feltro e o zinco tinham um furo no meio e eram enfiados numa haste horizontal, sendo assim conectados por um fio condutor.

Figura 19: Primeira pilha elétrica



Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/historia-das-pilhas.htm>

Esse experimento causou reviravoltas no mundo científico e a partir daí todos os aparelhos que produziam eletricidade a partir de processos químicos (ou seja, que produziam energia química em energia elétrica) passaram a ser chamados de células voltaicas, pilhas galvânicas ou, simplesmente, pilhas.

Volta fez esse mesmo experimento com metais e soluções eletrolíticas diferentes, como discos de prata e zinco separados por discos de flanela embebidos em salmoura.

Outro experimento de Volta em relação às pilhas foi a coroa de copos, em que ele colocava duas placas de metais diferentes interligadas por um fio condutor, mas separadas por soluções eletrolíticas.

2.3.1 Funcionamento

Elas são dispositivos que conseguem produzir e armazenar uma certa quantidade de energia por meio dos processos de oxidação e redução. De uma forma geral, trata-se de um conjunto de pilhas associadas em série, em que o polo positivo de uma está ligado ao polo negativo da outra. Todavia, vale ressaltar que nem sempre elas seguem esse padrão.

As baterias funcionam como uma pilha convencional, ou seja, dentro do dispositivo ocorrem uma reação de oxidação e outra de redução, o que gera produção de corrente elétrica. Sendo assim, à medida que o dispositivo vai sendo utilizado, a quantidade do material que sofre oxidação (redutor) vai diminuindo. Quando a quantidade do redutor chega ao fim, o dispositivo para de gerar corrente elétrica (está descarregado).

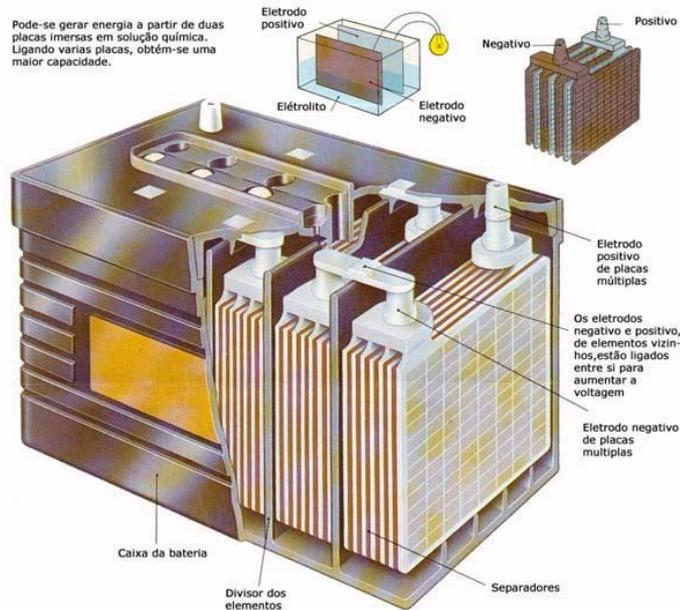
Ao conectarmos a bateria ou acumulador a uma fonte elétrica externa, a corrente elétrica faz com que a reação de oxidação e redução se torne reversível. Dessa forma, os componentes do redutor voltam a ser originados. Quando a quantidade do redutor retorna totalmente à quantidade anterior, dizemos que a bateria foi recarregada.

Existem três tipos de baterias muito utilizadas nos dias atuais:

- Baterias ou acumuladores de chumbo;
- Bateria de Níquel-Cádmio;
- Bateria de íons Lítio.

2.3.2 Baterias de chumbo

Figura 20: Bateria de chumbo para carros

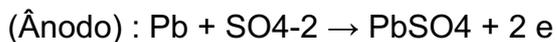


Fonte: www.carrosinfoco.com.br/carros/2015/05/funcionamento-e-detalhes-da-bateria-chumbo-acido-automotiva/

São compostas por seis pilhas convencionais dispostas em série. Cada pilha apresenta dois eletrodos que sempre estão imersos em uma solução de H₂SO₄. Um dos eletrodos é chamado de cátodo (PbO₂) e o outro é chamado de ânodo (Pb).

Durante o funcionamento da bateria, o Pb sofre oxidação, transforma-se em um cátion (Pb⁺²) e reage com o SO₄ da solução, formando o PbSO₄, que é um sal insolúvel. Assim, a solução não fica com excesso de cátions.

Abaixo temos as equações que representam o que ocorre no ânodo e no cátodo dessa bateria:



Quando essa bateria é submetida a uma fonte elétrica externa, a substância PbSO₄ formada no ânodo e no cátodo é transformada novamente em Pb e PbO₂.

2.3.3 Bateria de Níquel-Cádmio

Essa bateria apresenta dois eletrodos imersos em uma solução aquosa de KOH (hidróxido de potássio). Um eletrodo é constituído de um ânodo (oxida) de cádmio

(Cd) e o outro é um cátodo (reduz) composto por óxido de Níquel (NiO₂).

(Ânodo) : $\text{Cd} + \text{OH}^- \rightarrow \text{Cd(OH)}_2 + 2 e^-$

(Cátodo) : $\text{NiO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 2 e^- \rightarrow \text{Cd(OH)}_2 + \text{Ni(OH)}_2$

A descarga elétrica do meio externo faz com que as espécies $\text{Cd(OH)}_2 + \text{Ni(OH)}_2$ transformem-se novamente em Cd e NiO₂.

Figura 21: Pilhas recarregáveis



Fonte: www.makitastore.com.br/bateria-de-niquel-cadmio-ni-cd-makita-6723dw-p21290754/

2.3.4 Bateria de íons Lítio

Figura 22: Bateria de notebook



Fonte: Autor.

Essa bateria não apresenta pilhas. Ela é constituída por um ânodo de grafite que é recoberto por um sal de Lítio (Li_xCoO₂). O c de fórmula Li_xCoO₂. Veja as equações que representam o que ocorre no ânodo e no cátodo dessa bateria:

(Ânodo) : $\text{Li}_y\text{C}_6 \rightarrow \text{C}_6 + y \text{Li}^+ + y e$

(Cátodo) : $\text{Li}_x\text{CoO}_2 + y \text{Li}^+ + y e \rightarrow \text{Li}_x\text{CoO}_2$

A descarga elétrica do meio externo faz com que a substância Li_xCoO_2 converta-se novamente em Li_yC_6 e Li_xCoO_2 .

2.4 Ponte H

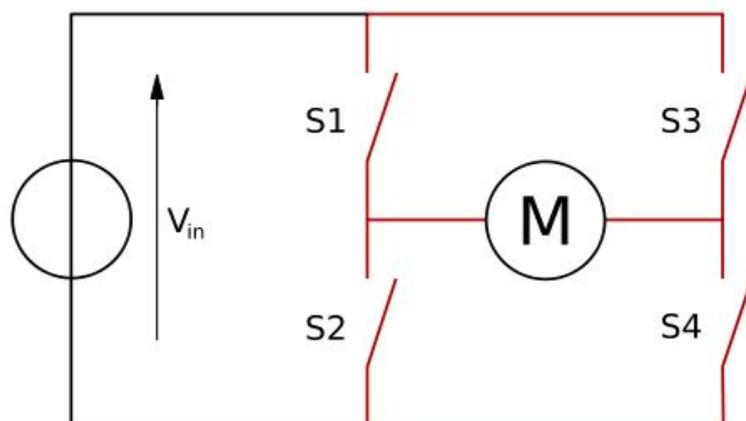
Uma Ponte H é um circuito especial que permite realizar a inversão da direção (polaridade) da corrente que flui através de uma carga. É muito utilizada, por exemplo, para controlar a direção de rotação de um motor DC.

O circuito necessita de um caminho que carregue a corrente ao motor em uma direção, e outro caminho que leve a corrente no sentido oposto. Além disso, o circuito deve ser capaz de ligar e desligar a corrente que alimenta o motor. (BOYLESTAD, Robert L.)

Uma ponte H possui quatro interruptores eletrônicos, que podem ser controlados de forma independente.

A figura a seguir mostra a disposição dessas quatro chaves (switches) (S1 a S4) em relação a um motor DC controlado:

Figura 23: Diagrama de um circuito "Ponte H"



Fonte: pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_H

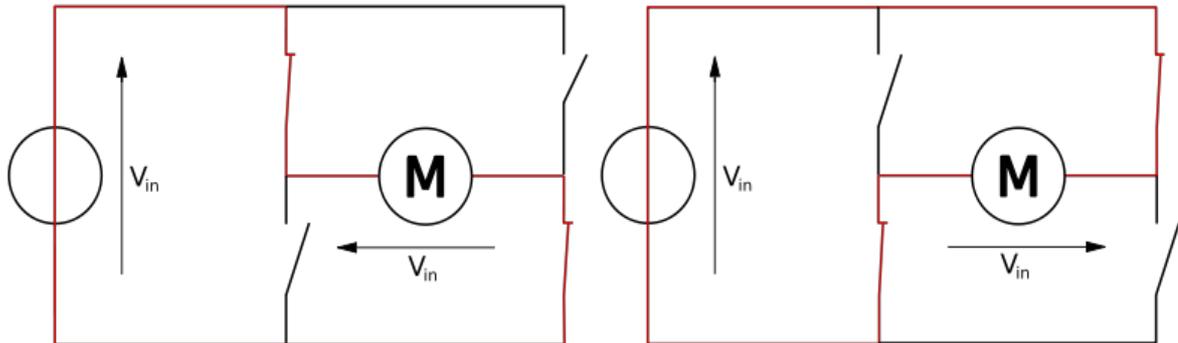
O funcionamento do motor depende dos estados das chaves, que podem ser combinadas de várias formas, como:

- S1 e S4 fechadas, S2 e S3 abertas: A corrente passa pelo motor em um

sentido, fazendo-o girar em uma direção.

- S1 e S4 abertas, S2 e S3 fechadas: A corrente passa pelo motor no sentido inverso, fazendo-o girar na direção contrária.
- S1 e S3 abertas: O motor não gira, pois não há fluxo de corrente por ele.

Figura 24: Acionamento do motor elétrico por ponte H



Fonte: www.bosontreinamentos.com.br/eletronica/curso-de-eletronica/como-funciona-uma-ponte-h-control-direcional-de-motores-dc/

3 Materiais e procedimentos

3.1 Drivers

Para o desenvolvimento do projeto utilizamos 3 placas diferentes

Figura 25: Driver de saída genérico



Fonte: Autor

Especificação para DC10/50DPW15BL

Fabricante: Keya Electron

Faixa de tensão de entrada: DC10-50VMax

Corrente de saída:15A

Tensão de saída: DC10-50V

Modo de operação: modo de velocidade, modo de Torque

Formas de controle: 0-5 V, PWM, potenciômetro

Proteção: Abnormalitise como excesso de corrente, superaquecimento, sobre a tensão, menos tensão e curto circuito vai começar a função de proteção.

Proteção da temperatura: quando a temperatura é de 70, o controlador irá reduzir a produção por proteção de superaquecimento e parar de saída.

Temperatura Invironment -10... + 60

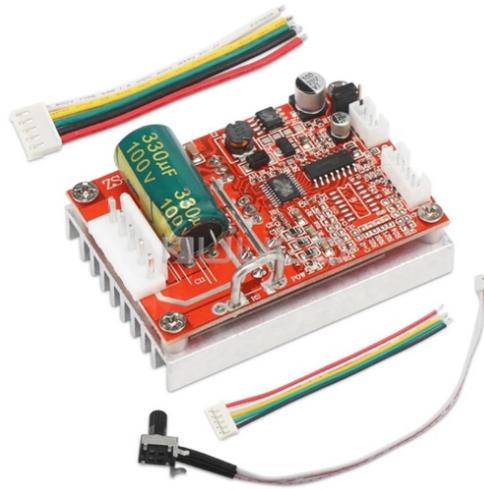
Umidade do ambiente: umidade relativa do ar inferior a 80RH

Tamanho: L * W * H = 122*72*35 milímetros

Peso: 300g

Combinado do motor: motor DC Brushless

Figura 26: Driver de saída genérico 2



Fonte: pt.aliexpress.com/item/Placa-de-Control-do-Motor-Brushless-Sensored-Motor-Driver-Controlador-Regulador-DC-5-36-V-16A/32836526740.html?spm=a2g03.search0104.0.0.70f347bcvTzMQz

Especificação para Brushless motor controller

Tensão de funcionamento: DC 5 ~ 36 V

Max. atual: 16A

Max. power: 350 W

Proteção de sobre corrente: Sim

Dimensões: 63x45x28mm

Peso: cerca de 93g

Figura 27: Driver padrão do motor



Fonte: Autor

Tensão de funcionamento: DC 5 ~ 36 V

Max. atual:13A

Max. power: 250 W

Proteção de sobre corrente: Sim

Peso: cerca de 110g

3.2 Equipamentos

Osciloscópio: utilizado para analisar graficamente os sinais dos drivers;

Figura 28: Osciloscópio minipa MO 2061



Fonte: produto.mercadolivre.com.br/MLB-798374939-osciloscopio-digital-minipa-mo-2061-_JM#redirectedFromSimilar

Multímetro: utilizado para medir a corrente sobre o motor e a tensão da bateria;

Figura 29: Multímetro minipa ET-2042D



Fonte: Autor

Gerador de frequência: utilizado para gerar um sinal para o transistor e ver o seu ganho;

Figura 30: Gerador De Função minipa Mfg-4202



Fonte: es.olx.com.br/norte-do-espírito-santo/agro-e-industria/outros-itens-para-agro-e-industria/gerador-de-funcao-511561705

Fonte de corrente contínua: utilizado para energizar o transistor;

Figura 31: Fonte de corrente continua



Fonte: www.eletronicadidatica.com.br/equipamentos/fonte_alimentacao/fonte_alimentacao.htm

Reostato: utilizado como resistência mínima para medir a corrente do motor;

Figura 32: Reostato para até 7 kilowatts



Fonte: www.directindustry.com/pt/prod/coudoint-sas/product-64090-419303.html

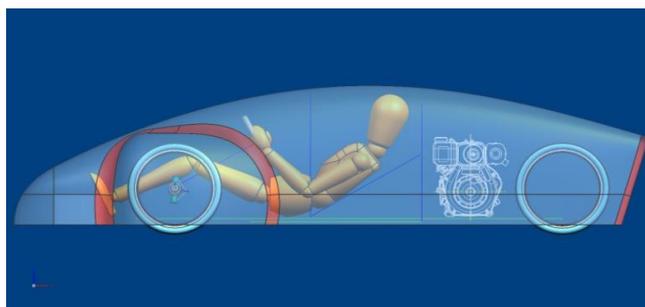
3.3 As competições

O veículo foi desenvolvido inicialmente para a competição de eficiência energética criada pela Petrobrás, e em seguida para a competição da maratona ecológica da Shell. Ambas possuem regulamentos que serão mostrados a seguir:

- O piloto (titular e o reserva) devem ter o peso mínimo de 50 Kg com todos os equipamentos, caso contrario deve ser colocado lastros no veículo até atingir este peso. Este lastro deve ser colocado no cockpit junto ao piloto, sem apresentar riscos ao piloto ou aos outros competidores;
- É obrigatório o uso de capacete homologado em qualquer atividade na pista;
- É obrigatório o uso de luvas e sapatos fechados, e também macacão de corrida (de preferência antichama);
- O veículo deve ter no mínimo 3 rodas e todas devem tocar o solo continuamente;
- A carroçaria não deve ter partes perigosas para os membros da equipe (ex: partes pontiagudas);
- Todos os veículos devem ter piso sólido;
- A tampa do compartimento de energia deve ter fácil abertura para acesso rápido e inspeção;
- Todos os veículos devem ser totalmente cobertos e possuir um roll-bar (santo-antonio);

- Pode-se utilizar de qualquer motor elétrico, e a bateria deve respeitar os limites no joulemeter;
- Qualquer dispositivo que consuma energia deve-se utilizar da bateria do veículo e não deve possuir nenhum sistema suplementar;
- A carroçaria deve ser independente da estrutura tubular;

Figura 33: Design inicial da carroçaria



Fonte: gpbrazildeenergia.com.br

- Toda equipe deve possuir um extintor de incêndio de 1 Kg para cada veículo competindo;
- Um painel corta-fogo deve isolar o motor completamente do piloto;
- O sistema de direção deve permitir um raio de giro mínimo de dez metros e só pode ser instalado na dianteira do veículo;
- É obrigatório o uso de duas chaves gerais, sendo uma interna e outra externa, identificadas visualmente.
- A bateria deve ter a tensão máxima de 42 V e / ou a corrente máxima de 20 A.
- É proibido qualquer sistema que possa amplificar os valores acima, pois podem danificar o joulemeter;
- A fiação da bateria deve seguir a norma de identificação a seguir:
Vermelho para o polo o positivo;
Preto para o polo negativo;

3.4 Testes

Começamos com a instalação dos controladores, tanto o próprio para o motor como os outros genéricos.

Figura 34: Veículo com driver genérico

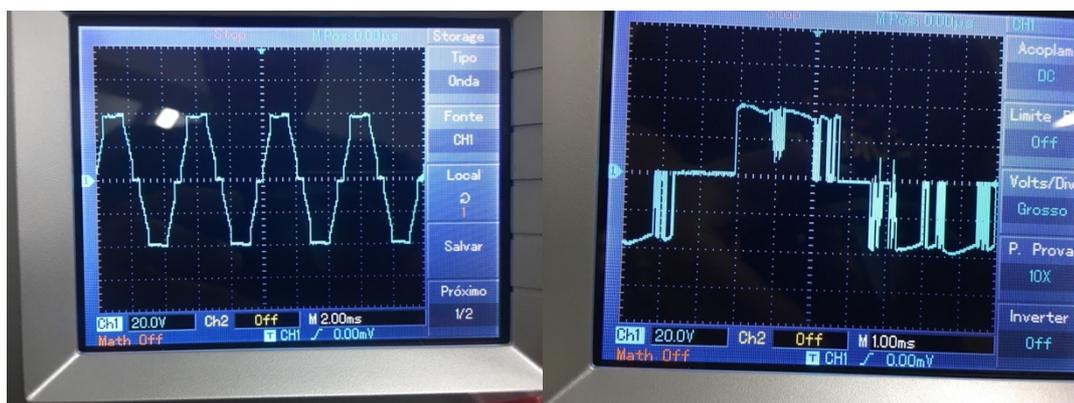


Fonte: Autor

Após a instalação fizemos o motor funcionar, porem percebemos que com os genéricos ele não funcionava adequadamente e não foi possível acoplar o acelerador do veiculo a elas, fazendo com que tivéssemos que usar os potenciômetros que vieram com eles.

O primeiro teste foi a verificação do trabalho do controlador com as bobinas, utilizando o osciloscópio para ver o funcionamento das bobinas.

Figura 35: Funcionamento das bobinas do motor (original e genérico)



Fonte: Autor

Vimos que os genéricos não trabalhavam adequadamente, criando uma espécie de oscilação no sinal pouco antes de acionar a bobina.

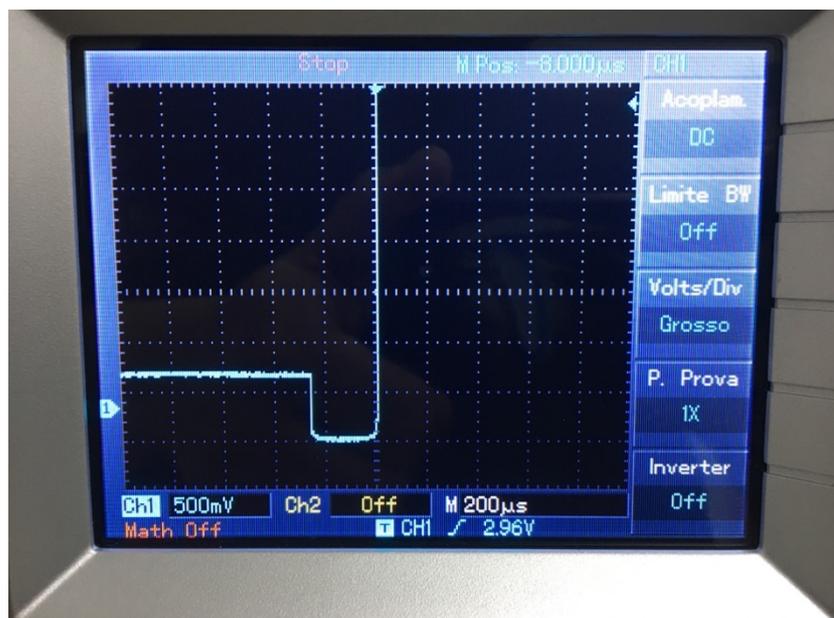
Figura 36: funcionamento das bobinas do motor com o genérico 2



Fonte: Autor

Em seguida colocamos o veículo em velocidade máxima e medimos a sua perda nos transistores, que se apresentou de acordo com o padrão que é de 0,7V.

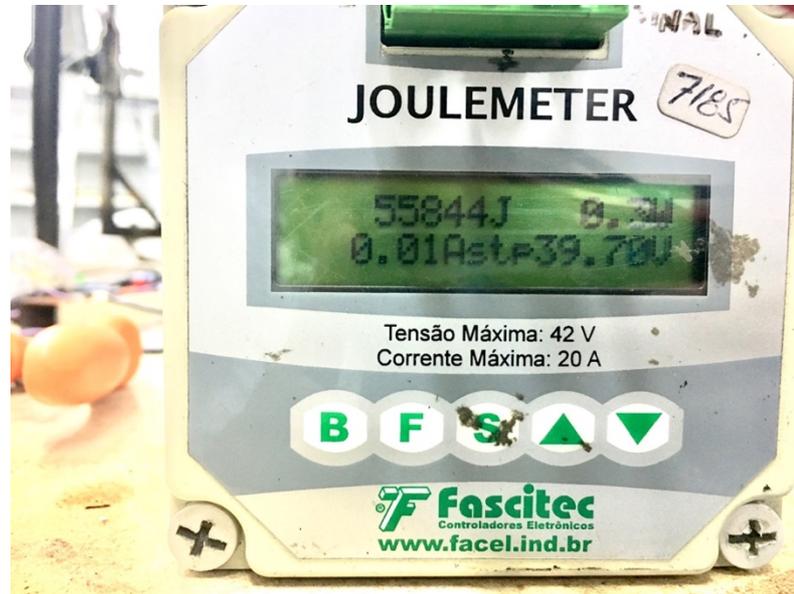
Figura 37: Sinal da queda de tensão no transistor



Fonte: Autor

O próximo é o teste em bancada, deixando-o ligado em velocidade máxima por 30 minutos, utilizando um joulemeter para vermos o quanto eles consomem

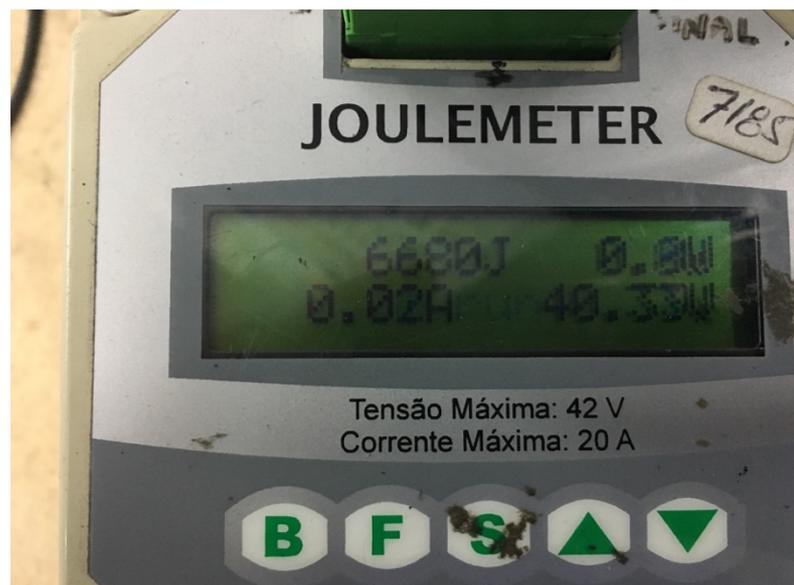
Figura 38: Medição do consumo de energia



Fonte: Autor

O próximo teste e a medição com uma pequena carga no motor, para este teste nós travamos o motor com o próprio freio e colocamos em velocidade máxima por 1 minuto.

Figura Erro! Indicador não definido.: Valor do consumo de energia em carga



Fonte: Autor

Verificamos que com esta calibração de carga a corrente entregue no motor ainda estava abaixo do valor máximo indicado pelo fabricante, mas não aumentamos a carga para não danificar o sistema de freios e posteriormente o próprio motor.

4 Considerações finais

A proposta inicial na busca da otimização do drive para Motores Brushless, consistia na pesquisa de qual é o melhor dos semicondutores trabalhando como chave, otimizando as perdas.

Ao longo dos testes verificou-se que embora as perdas de condução dos MOSFET's de saída cresçam com o aumento da corrente, chegando ao limite máximo, na máxima corrente do componente, um recurso foi aplicado com ótimo resultado.

O superdimensionamento dos MOSFET's da ponte H de saída, permitem a operação com menor perda de condução. Desta forma o superdimensionamento dos MOSFET's proporciona ao conjunto operação com perdas de condução próximas as perdas de um Transistor Bipolar convencional, que são as menores possíveis.

Agrega-se então ao MOSFET de baixas perdas de comutação, uma de suas principais características, as baixas perdas do Transistor Bipolar, resultando em alta eficiência para o drive do motor.

Embora esta solução não seja economicamente viável na engenharia, atende ao objetivo da competição de melhor aproveitamento energético, proposto neste trabalho.

Outra forma possível de melhorar seria o desenvolvido um driver que use o transistor IGBT com uma amplitude de corrente maior, para que o VGS seja baixo e tenha a menor perda quando em carga máxima.

5 Propostas futuras

Construir um driver com o transistor IGBT e também com transistores Bipolares, fazer os testes e verificar o rendimento em relação ao driver com MOSFET;

Estudo da estrutura do veículo para desenvolver um chassi mais rígido com menos peso, ao final comparando consumo e eficiência final;

Estudo para aperfeiçoamento do motor brushless, verificando componentes e o que pode ser alterado para melhorá-lo.

6 Referencias bibliográficas

- A.Nakagawa et al., **Safe operating area for 1200-V non-latch-up bipolar-mode MOSFETs**, IEEE Trans. on Electron Devices, ED-34, pp.351-355(1987);
- BOYLESTAD, Robert L. Introdução a Análise de Circuitos. 10º edição.
- B. Van Zeghbroeck (2011). MOS Field-Effect-Transistors (http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter7/ch7_7.htm). Acesso em 3 de Abril de 2018;
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS**. 6ª Edição. Rio de Janeiro. Prentice - Hall do Brasil.
- Fogaça, Jennifer Rocha Vargas. "História das pilhas"; *Brasil Escola*. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/historia-das-pilhas.htm>>. Acesso em 24 de março de 2018;
- Dias, Diogo Lopes. Baterias ou acumuladores; Mundo Educação. Disponível em <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/curiosidades/baterias-ou-acumuladores.htm>> Acesso em 17 de março de 2018;
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, JR.; UMANS, STEPHEN – **Máquinas Elétricas** – 6a. edicao – Editora Bookman – RS – Ano 2006.
- GIERAS, J. F.; WING, M. **Permanent Magnet Motor Technology**. First Edition. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002.589 p.
- GONELLA, M. C. **Acionamento e Controle Sensorless para Motores Brushless DC Aplicados a Compressores Herméticos para Refrigeração Doméstica**. 2006. 115 f. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/>. Acesso em: 05 de março de 2018;
- JULIANI, A. D. P. **Análise do campo magnético de um motor de ímã permanente no rotor utilizando o método dos elementos finitos**. 2007. 136 f. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/>. Acesso em: 05 de março de 2018;
- KENJO, T; NAGAMORI ,S. **Permanent-Magnet and Brushless DC Motors**. First Edition. New York: Oxford University Press, 1985. 194p;
- Matias, José V. C.; **O Que São Transístores?**; josematias. Disponível em: <http://www.josematias.pt/eletr/o-que-sao-transistores/>. Acesso em 22 de março de 2018;

MONTEIRO, J. R. B. A. **Transformação DQ Não Senoidal para Máquinas Síncronas com Ímã Permanente no Rotor**. 2002. 108 f. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002;

SILVA, RENATO A. – **Programando Microcontroladores PIC** – Editora Ensino Profissional, 2006;

Silveira, Cristiano Bertulucci; **Motor CC: Saiba como ele funciona e de que forma especificar**; Citisystems. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/motor-cc/>. Acesso em 20 de março de 2018;

www.shell.com.br/energia-e-inovacao/ecomarathon/shell-eco-marathon-brasil.html
Acesso em 30 de novembro de 2018;

<http://gpbrasildeenergia.com.br> Acesso em 30 de novembro de 2018.