

CONTROLE PWM PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

Fábio Márcio Minervino Pelegrini ¹

Prof. Dr. Júlio Cesar Chaves Câmara ²

RESUMO

O presente artigo apresenta o desenvolvimento de um controlador de velocidade de motor CC com escovas, com potência de até 1000W, o qual futuramente servirá de base para projetos de motonetas e bicicletas elétricas, sendo esta uma alternativa de baixo custo para a produção de meios de transporte possuidores de fontes renováveis. O controle é feito através de um micro controlador que recebe informações fornecidas pelo usuário e sinais do sistema para gerar o sinal de controle acionando o motor, em uma malha fechada de controle. O modelo do micro controlador utilizado foi o Atmel AT89S8253 de 8 bits, com software desenvolvido em linguagem assembly, que, após processar os sinais de entrada, fornecerá um sinal PWM de saída a ser aplicado à etapa de potência formado por semicondutores tipo MOSFET.

Palavras-chave: Controlador PWM – driver mosfet – bicicleta elétrica – mobilidade elétrica.

¹ Bacharelato em engenharia de automação e controle – FTC-Salvador.

E-mail: worksuper@hotmail.com

² Doutorado em modelagem computacional e tecnologia industrial.

E-mail: prof.jcamara@gmail.com

1. Introdução

As mudanças ocorridas na matriz energética mundial tem favorecido as pesquisas no conceito mais amplo das alternativas energéticas, que aborda todo o processo da produção ao consumo.

“Alternativas energéticas são todas as fontes energéticas primárias, tecnologias de transformação e conversão, objetivando a produção e uso final de eletricidade, calor ou movimento, além das tecnologias associadas de armazenamento, automação e controle e eficiência energética” (SILVA, 2012)

Segundo Silva (2012), este conceito se apresenta mais apropriado do ponto de vista de planejamento nacional e/ou empresarial e foca também o conceito de geração distribuída que é um dos caminhos para implementação do conceito de redes inteligentes que tem como um dos pilares o uso de veículos elétricos.

A utilização de veículos elétricos de duas rodas tais como bicicletas, motonetas e motocicletas são uma alternativa para o transporte urbano por se encaixar nessa nova realidade do consumo de energia, que além de renovável é menos poluente comparado ao uso de combustíveis fósseis, ainda que existam impactos ambientais importantes advindos da produção de energia elétrica. Contudo este impacto diminui quando se considera formas alternativas de geração, tais como eólica e solar, as quais tendem a suprir parte da demanda da energia elétrica consumida no mundo.

Neste trabalho, buscou-se recursos de fácil acesso no mercado para focar na difusão da tecnologia de veículos elétricos. Optou-se pelo uso do motor CC com escovas e ímã permanente, dada facilidade de obtenção e acionamento simplificado uma vez que a variação de velocidade se dá pela variação de energia aplicada à armadura sem necessidade de controle separado do torque que se mantém próximo do máximo em se tratando do controle PWM. Como técnica de controle de potência, foi escolhida a Modulação por Largura de Pulso, ou PWM como é abreviado do inglês *Pulse Width Modulation* que além de simplificado, confere ao sistema uma

excelente eficiência na transferência de energia. Assim, o controlador reúne características como: simplicidade, baixo custo e versatilidade, conferida pela flexibilidade de software em permitir otimizar ou mesmo implantar novos recursos sem necessariamente realizar mudanças de hardware.

Ao apresentar um estudo sobre a construção de uma bicicleta elétrica com motor CC de escovas é interessante, antes de tudo, trazer o conhecimento do que é um veículo elétrico. Um veículo elétrico (VE) é movido por um motor elétrico ao invés de um motor de combustão interna (MCI), e o motor funciona utilizando a energia armazenada nas baterias, que precisam ser carregadas com frequência (EMADI, 2005). Veículos Elétricos existem há muito mais tempo do que as pessoas imaginam. Eles foram vistos logo após Joseph Henry introduzir o primeiro motor CC, em 1830 (EMADI, 2005). Do ponto de vista histórico, os VE automotivos competiam com os veículos de MCI no final do século XIX, mas o elevado custo e limitada autonomia de percurso favoreceram a prevalência do carro a gasolina em detrimento do carro movido a bateria (FERREIRA, 2007).

Veículos Elétricos são conhecidos como veículos de emissão zero e são muito mais “amigáveis” com o meio ambiente do que os veículos à diesel ou gasolina. Veículos elétricos também possuem menos partes móveis e a manutenção é mínima. Sem o motor de combustão interna, não há troca de óleo, ajustes e não há exaustão de gases. VEs também têm mais eficiência energética do que os motores a gasolina e ainda são mais silenciosos em operação (EMADI, 2005). Infelizmente os VEs possuem uma séria desvantagem em relação aos veículos de MCI: alcance limitado, ou seja, a sua autonomia é ainda muito baixa. Outra desvantagem, é que recarga leva tempo. Veículos com MCI podem ir muito mais longe com um tanque de gasolina e podem ser rapidamente reabastecidos (EMADI, 2005).

Por isso, um empecilho para a adoção em larga escala desta tecnologia não é o motor elétrico em si, mas o alto custo das baterias é considerado uma das principais barreiras à popularização dos veículos elétricos (Itaipu, 2016) e a armazenagem da energia por ele utilizada. Mesmo assim, é inegável que tenham

existido melhorias nas baterias e tais avanços tenha propiciado a concepção de carros elétricos à bateria para certos nichos de mercado (PACCA, 2008). Diversos fatores devem ser considerados para a adoção de um sistema de potência para um veículo elétrico, como quantidade e tipo de motores; quantidade e tipo de caixas de transmissão; tipo de conversor e controle, e os correspondentes valores de máxima corrente e voltagem; características do motor em relação à velocidade e torque; tipos de sistema de suprimento de energia e capacidade de potência; esquema de baterias e relação da redução do eixo do veículo, essas fatores podem ser resumidos em três áreas principais: Motor, controle e eletrônica de potência (AMARAL, 1998).

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Motores

Máquinas elétricas, como motores, convertem energia elétrica em energia mecânica. Elas também podem operar como geradores e podem entrar no modo de geração de energia quando estão desacelerando o veículo (MOHAN, 2003). Os motores elétricos são compostos por uma parte fixa, chamada de estator, e uma parte rotativa, chamada de rotor, separadas por um entreferro que permite que o rotor gire livremente em um eixo, suportado por rolamentos (MOHAN, 2003).

Em máquinas elétricas, um campo magnético é também produzido por ímãs permanentes ou por enrolamentos que são alimentados com corrente para produzir uma linha de fluxo radial através do entreferro (MOHAN, 2003).

Os motores elétricos são compostos por uma parte fixa, chamada de estator, e uma parte rotativa, chamada de rotor, separados por um entreferro que permite que o rotor gire livremente em um eixo, suportado por rolamentos, como mostrado na Figura 1 (MOHAN, 2003, p.170). É muito importante selecionar o tipo apropriado de motor através de uma avaliação adequada, pois dessa escolha advirá a seleção do tipo de controlador a ser empregado. Na próxima seção, serão conceituados alguns

tipos de motores elétricos, com ênfase nos principais tipos de motores de corrente contínua.

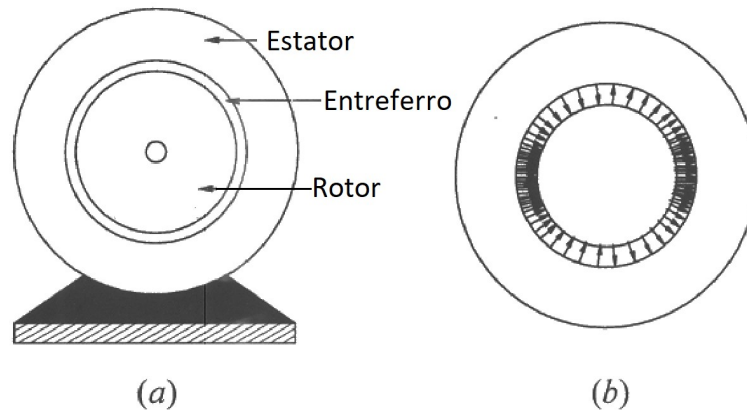


Figura 1 - Representação em corte de um motor elétrico.

Fonte - MOHAN, 2003

a. Motores de Corrente Alternada

Os motores CA operam a uma alta rotação e requerem um mecanismo de controle de velocidade complexo (EMADI, 2005). Eles são alimentados por tensão alternada senoidal e diferentemente do motor CC, utiliza o princípio dos campos girantes, ou seja, em seu estator é gerado um campo magnético girante pela disposição das espiras e a forma de onda da corrente que nelas circula. No rotor existe outro campo magnético, que interage com o campo do estator, provocando um torque no rotor, fazendo-o girar.

b. O Motor de Corrente Contínua

Motores CC foram muito utilizados no passado, para todo tipo de operação, e ainda continuam sendo utilizados em aplicações que se precise controlar velocidade e posição, já que esse tipo de motor possui excelente desempenho dinâmico, com facilidade de controle de posição e velocidade, por isso ele é bastante utilizado em aplicações onde ocorrem frequentes partidas e paradas, e que requerem um bom controle de velocidade. Por esses motivos, e pela possibilidade de variar o torque de

0 a 100% do torque nominal em quaisquer faixas de velocidade, o motor CC é muito utilizado em tração elétrica, em aplicações tais como: locomotivas, carros elétricos, bondes, bicicletas elétricas, walk machines e outros (DEL-PUPPO, 2007).

É muito importante avaliar criteriosamente o tipo de motor a ser utilizado, uma vez que este é o elemento mais importante do veículo elétrico. Abaixo, seguem detalhados alguns tipos de motores CC.

b.1 Motor de Corrente Contínua de Excitação Série

Nesse tipo de motor, o enrolamento magnético e o induzido estão ligados em série. Neles a velocidade varia com a carga e o conjugado de partida é muito grande. Esse tipo de motor gira lentamente em grandes cargas e rapidamente em pequenas (MUSSOI, 2000, p.12).

Eles são os melhores para os veículos elétricos urbanos hoje em dia, já que eles têm um torque alto, são baratos comparados com os outros tipos, são facilmente encontrados e requerem um controle simples em comparação aos outros tipos (EMADI, 2005, p.57). A grande desvantagem deste motor é que se há uma restrição muito grande ao giro do eixo e a corrente do motor pode atingir níveis muito altos, podendo danificar os enrolamentos.

b.2 Motor de Corrente Contínua Sem Escova (*Brushless*)

Os motores *DC Brushless*, ou CC sem escovas, requerem controladores caros, mas precisam de muito pouca manutenção (EMADI, 2005). Motor *DC Brushless* é um conceito novo. Pelo fato de não possuir comutação, este motor exige controle externo para realizar a comutação de fase entre as bobinas. Ao contrário do motor CC com escovas, as bobinas estão localizadas no estator e no rotor estão os ímãs permanentes. Motores *DC Brushless* têm muitas vantagens quando comparados aos motores de corrente contínua e aos motores de indução como, por exemplo, melhor característica de velocidade versus torque, resposta dinâmica, alta eficiência, longa vida útil e operação silenciosa (PADMARAJA YEDAMALE, 2003).

b.3. Motor de Corrente Contínua Excitação Paralelo (Shunt)

O motor de Excitação Paralelo, ou Shunt, é caracterizado pelo enrolamento de campo e o de armadura conectados em paralelo. O campo magnético apresenta-se independente da corrente de carga e da rotação do induzido, para qualquer carga. São empregados quando as características de partida (torque, tempo de aceleração) não são muito severas. (MUSSOI, s.d.). Esse tipo de motor é mais caro, e tem a aceleração mais pobre do que os motores em série (EMADI, 2005).

b.5 Motor de Corrente Contínua de Ímã Permanente

O campo magnético é produzido por um ímã permanente na carcaça e dispõem de apenas dois terminais para levar a corrente ao induzido (armadura) através do comutador (MUSSOI, 2000, p.12). São muito eficientes, mas apenas em uma banda de RPM limitada (EMADI, 2005, p.58). De acordo com Tavares (1984), o funcionamento do motor CC baseia-se no seguinte princípio: Um condutor, imerso em campo magnético, ao ser atravessado por corrente elétrica, sofre a ação de uma força mecânica de origem eletromagnética.

Para entender esse funcionamento, é necessário relembrar alguns aspectos de conversão eletromecânica de energia. Um condutor elétrico de comprimento l , no qual circula uma corrente elétrica i , quando submetido a um campo magnético de densidade Φ (chamado de B , na Figura 2) sofre a ação de uma força F , resultante da interação de fenômenos magnéticos (campo Φ) e elétricos (corrente i) (MELCHIORS & SCHARLAU, s.d). A Figura 2 apresenta um esquema deste princípio, supondo que o campo magnético seja gerado por ímãs permanentes. A força F é matematicamente representada pela equação (1).

$$F = \Phi.i.l \quad (1)$$

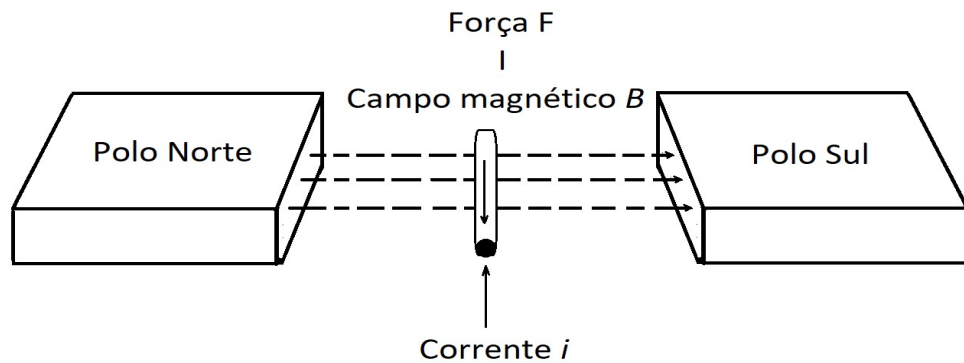


Figura 2 - Princípio de funcionamento motor CC

Fonte: Próprio autor

Supondo que os polos dos ímãs permanentes da Figura 2 tenham suas partes internas geometricamente projetadas de forma que resultem em duas semicircunferências de raio r , e que o condutor elétrico no qual circula a corrente i é uma bobina disposta internamente a estas semicircunferências, pode-se constatar que existirá por efeito da força F um conjugado de movimento desta bobina. A Figura 3 apresenta o esquema proposto para funcionamento do motor CC. Verifica-se que a mudança na magnitude e no sentido de circulação da corrente i vão consequentemente alterar a velocidade e o sentido de giro do motor (MELCHIORS & SCHARLAU, s.d.).

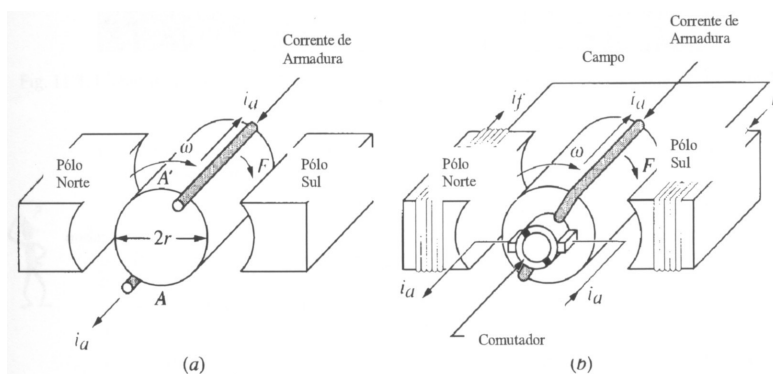


Figura 3 - Esquema de funcionamento do motor CC

Fonte: MELCHIORS & SCHARLAU, s.d.

A equação (2) apresenta a determinação matemática do conjugado de movimento (T_e) do motor CC, onde K_t é definida como a constante de torque do motor (MELCHIORS & SCHARLAU, s.d.).

$$T_e = 2.r. \Phi.i.a.l = K_t.i \quad (2)$$

Onde: Φ = campo magnético

l = comprimento do condutor elétrico

Pela simplicidade do sistema de acionamento, optou-se por utilizar um motor CC de ímã permanente, hoje muito usado em kits de adaptação para bicicletas elétricas, patinetes dentre outros equipamentos simples de locomoção. A seguir serão apresentadas as equações do motor CC.

b. Equações de Torque e Velocidade para Controle do Motor CC

Será tomado um motor de ímãs permanentes, onde o fluxo de campo é constante, e de excitação separado. Onde os enrolamentos da armadura (induzido) e de campo (excitação) estão eletricamente separados, e são alimentados por fontes distintas, que permite o controle total da corrente de excitação e da corrente da armadura. (RASHID M. A., 1999). Quando uma máquina de excitação separada é alimentada com uma corrente de campo i_f e uma corrente de armadura i_a flui no circuito de armadura, a máquina desenvolve uma força contra-eletromotriz (f_{cem}) e um torque para equilibrar o torque da carga a uma determinada velocidade. A corrente I_f de uma máquina CC de excitação separada é independente da corrente de armadura i_a e qualquer variação na corrente de armadura não produz qualquer efeito na corrente de campo. A corrente de campo normalmente é muito menor que a da armadura (RASHID M. A., 1999).

O torque eletromagnético se dá através da ação conjunta das diversas forças que agem sobre cada condutor, sendo dado pela seguinte expressão (TORO, 1990).

$$T_e = K_e \Phi i_a \quad (2a)$$

Onde: T = torque eletromagnético do motor (Nm)

K_e = constante que representa as grandezas fixas do circuito da armadura (Nm/A.Wb)

ϕ = fluxo magnético dos polos (Wb)

I_a = corrente de armadura (A)

Cabe salientar também que os condutores, ao entrarem em movimento e efetuarem o corte das linhas de força dos polos, fazem surgir uma força contra-eletromotriz, contrária à corrente de armadura. O módulo de tal força contra-eletromotriz é dado pela seguinte equação (TORO, 1990 apud CARVALHO & BEDERODE, 2005, p.12).

$$E = K_e \phi \omega_m \quad (2b)$$

Onde: E = força contra-eletromotriz (V)

K_e = constante que representa as grandezas fixas do circuito da armadura (V/Wb.rpm)

ω_m = velocidade do motor CC (rpm)

ϕ = fluxo magnético dos polos (Wb)

Para se obter a equação da corrente de armadura, faz-se uso da Lei de Ohm, tendo o cuidado de subtrair da tensão aplicada (V_a) o valor da força contra-eletromotriz (TORO, 1990 apud CARVALHO & BEDERODE, 2005, p.13).

$$I_a = (V - E) / R_a \quad (2c)$$

onde:

I_a = corrente de armadura (A)

V = tensão aplicada na armadura (V)

E = força contra-eletromotriz (V)

R_a = resistência da armadura (Ω)

Como o motor analisado possui, no estator, imã permanente, admite-se fluxo constante, tem-se então (DEL-PUPPO, 2007, p.12):

$$K \text{ e } \Phi = K \text{ (constante)} \quad (2d)$$

Das equações anteriores, resulta:

$$E = K \cdot \omega_m \quad (2e)$$

$$T_e = K \cdot I_a \quad (2f)$$

E a partir destas, obtém-se:

$$\omega_m = (V / K) - (R_a / K) \cdot I_a \quad (2g)$$

$$\omega_m = (V / K) - (R_a / K^2) \cdot T_e \quad (2h)$$

De acordo com (2h) pode-se observar que a característica Velocidade x Torque do motor CC com excitação separada é uma linha reta, como mostrado na Figura 4. Na equação (2f), pode-se observar que o torque varia linearmente com a corrente, portanto a característica Velocidade x Corrente é equivalente à característica Velocidade x Torque. Pode-se então ter ampla variação de torque numa pequena faixa de velocidade (DEL-PUPPO, 2007).

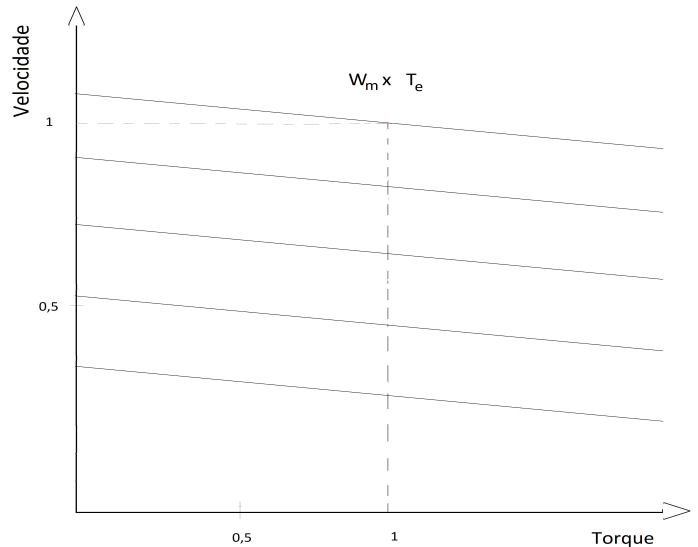


Figura 4 - Característica Velocidade x Torque

Fonte: Próprio autor, 2019

2.2 Baterias

Baterias normalmente ocupam um terço, ou mais, do peso do veículo e um quarto ou mais do custo do ciclo de vida do veículo. A lista de baterias possíveis para uso em veículos é imensa, incluindo pelo menos 20 tipos distintos (EMADI, 2005). A realidade é que a ciência por trás da tecnologia da bateria é altamente complexa e não é bem compreendida, tornando a engenharia de baterias uma grande dificuldade. Muitos esforços de pesquisa estão em andamento para desenvolver e comercializar as baterias avançadas, mas geralmente o que se parece promissor em uma cela pequena, muitas vezes fica aquém quando ampliadas para um veículo. (EMADI, 2005).

Atualmente, as baterias de chumbo-ácido ainda possuem a melhor relação custo benefício para diversas aplicações. As baterias de níquel-cádmio possuem baixo tempo de recarga e são tão tóxicas quanto às de chumbo-ácido. As baterias de níquel-metal hidreto possuem moderada densidade de energia e reduzido ciclo de vida. As baterias de íons de lítio proporcionam elevada densidade de energia e

baixa toxicidade, tornando-as uma tecnologia bastante promissora para aplicações em veículos elétricos (FERREIRA, 2007).

A bateria é um dispositivo eletroquímico que converte diretamente a energia armazenada na forma química em eletricidade. Na bateria recarregável, a energia fornecida por uma fonte externa recompõe as características químicas do dispositivo (FERREIRA, 2007). A Figura 5 ilustra o esquema simplificado da estrutura interna de uma bateria de chumbo ácido.

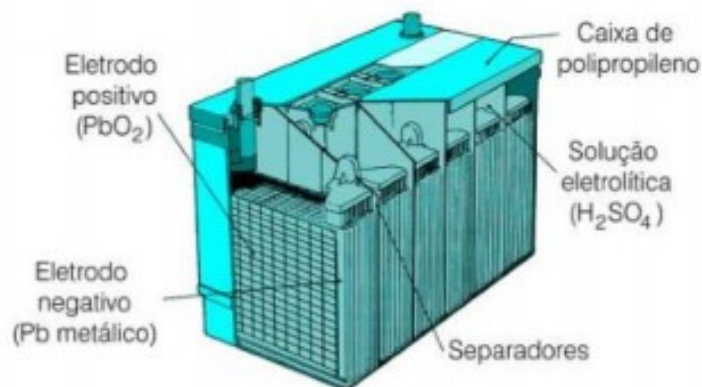


Figura 5 – Representação de uma bateria de chumbo-ácido

Fonte: BOCCHI, 2000

O eletrodo positivo, anodo, é constituído por uma placa de peróxido de chumbo e o eletrodo negativo, catodo, é composto por uma placa de chumbo esponjoso; Eles são isolados por um material separador poroso que impede a condução eletrônica entre as placas e permite o livre trânsito de íons imersos em um eletrólito (ácido sulfúrico diluído em água pura). Na solução do eletrólito ocorre a dissociação eletrolítica, ou seja, a decomposição da molécula de ácido sulfúrico em íons de hidrogênio (positivo) e íons de sulfato (negativo) (BARRETO, 1986).

No processo de descarga, os elétrons migram do catodo em direção ao anodo via condutor externo, enquanto os íons do anodo fluem em direção ao catodo através do eletrólito. Os dois eletrodos reagem com o eletrólito, que possui alta

concentração de ácido sulfúrico, convertendo os dois eletrodos em sulfato de chumbo ($PbSO_4$) e o eletrólito parcialmente em água. No processo reverso, de carregamento, a injeção de corrente recompõe os eletrodos em chumbo esponjoso (Pb) e peróxido de chumbo (PbO_2), e a água em ácido sulfúrico (FERREIRA, 2007).

2.3 Transistores de Potência

Transistores de potência têm características de entrada em condução e de corte controladas. Os Transistores, utilizados como elementos de chaveamento, são operados na região de saturação, resultando em uma baixa queda de tensão em estado condutor (RASHID M. A., 1999). Eles geralmente são utilizados em aplicações de baixa e média potência, e se dividem em 4 categorias: Transistores bipolares de junção (*TBJ*); Transistores de efeito de campo de óxido metálico semiconductor (*MOSFET*); Transistores de indução estática (*SIT*); Transistor bipolar de porta isolada (*IGBT*).

Os transistores têm certas limitações e seu uso é limitado apenas para determinadas aplicações. A Figura 6 mostra as faixas de tensão e corrente, em termos de frequência, que a maioria dos dispositivos semicondutores de potência comum podem operar (RASHID M. H., 2001).

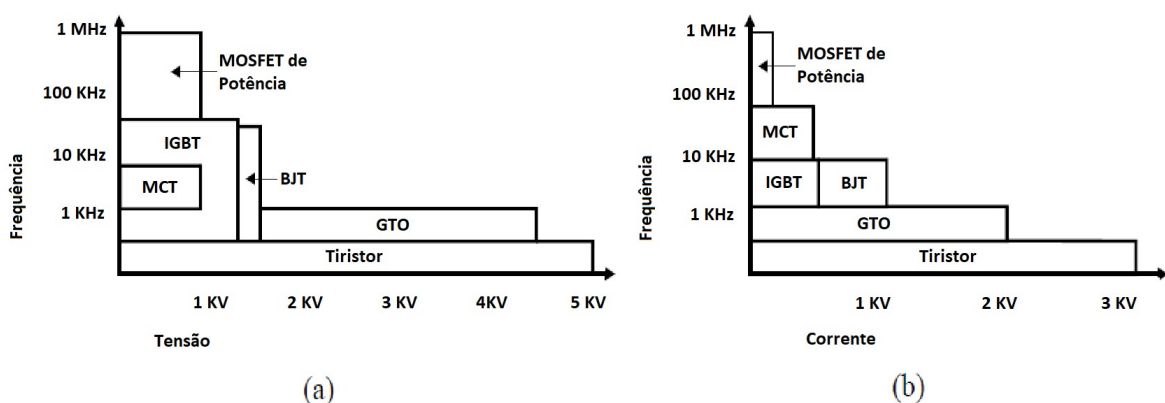


Figura 6 - Região de operação de semicondutores. (a) voltagem x frequência; (b) corrente x frequência.

Fonte: Próprio autor, 2019

a. Transistores Bipolares De Junção (TBJ).

Um terminal chamado de base permite fazer com que o transistor abra ou feche (conduza ou não) entre os dois outros terminais denominados de emissor e coletor. Um transistor bipolar tem duas junções, a junção coletor-base (CB) e a base-emissor (BE) (RASHID M. A., 1999), como é ilustrado na Figura 7.

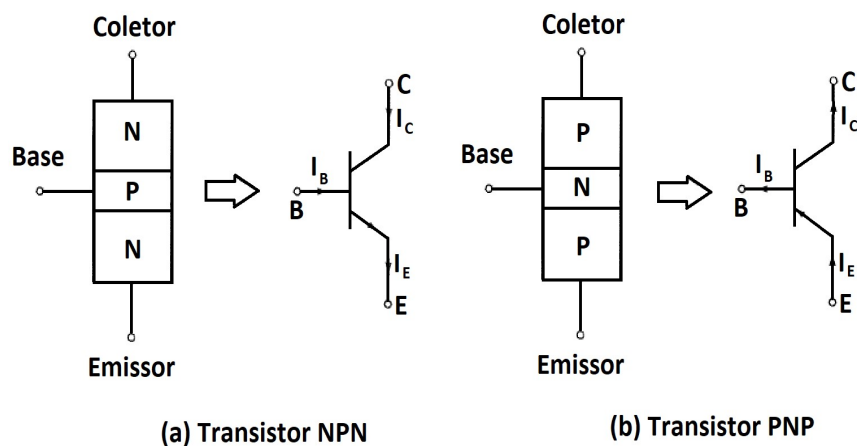


Figura 7 – Disposição interna e dos terminais do TBJ

Fonte: Próprio Autor, 2019

Um transistor bipolar de junção é um dispositivo controlado por corrente e requer corrente na base para que flua corrente no coletor. Como a corrente do coletor é dependente da entrada (base), o ganho de corrente é altamente dependente da temperatura da junção (RASHID M. A., 1999).

b. Transistores De Efeito De Campo De Óxido Metálico Semicondutor (MOSFET)

Um MOSFET é um dispositivo controlado por tensão e requer apenas uma pequena corrente de entrada. A velocidade de chaveamento é muito alta e os tempos de chaveamento são da ordem de nano segundos. Os MOSFETs são encontrados em aplicações crescentes em conversores de alta frequência e baixa

potencia. Os MOSFETs não têm os problemas do fenômeno de ruptura secundária como os TBJs, entretanto, os MOSFETs têm os problemas de descarga eletrostática e necessitam de cuidados especiais no manuseio. Além disso, é relativamente difícil protegê-los sob condições de falta em curto-circuito (RASHID M. A., 1999). Eles se classificam em dois tipos: MOSFETs de depleção e MOSFETs de enriquecimento.

Segundo Rashid, para os MOSFETs do tipo depleção, a tensão de porta (ou de entrada) pode ser tanto positiva quanto negativa. Já o transistor de enriquecimento pode ser dividido em dois tipos. O mais comum, é chamado de nMOS, que apresenta um V_T positivo. O outro, complementar a este, é chamado de pMOS de enriquecimento, que apresenta um V_T negativo. Por definição, transistor de enriquecimento é um transistor normalmente cortado, ou seja, se a tensão de porta for nula, a corrente será nula. Esta definição se aplica tanto ao nMOS como ao pMOS. Os MOSFETs de potência geralmente são do tipo enriquecimento. Entretanto, os MOSFETs do tipo depleção seriam vantajosos e simplificariam o projeto lógico em algumas aplicações que necessitam de alguma forma de chave CA ou CC de lógica compatível, a qual permaneceria ligada quando a alimentação da parte lógica caísse e a tensão do gate se tornasse zero. (RASHID M. A., 1999)

c. Transistor Bipolar De Porta Isolada (IGBT)

Um IGBT combina as vantagens dos TBJs e dos MOSFETs. Ele tem impedância de entrada elevada como os MOSFETs, e baixas perdas em condução, como os TBJ, mas não tem o problema de ruptura secundária dos mesmos (RASHID M. A., 1999).

2.4 Controlador de Velocidade

O controle de velocidade é crucial para a eficiência e para uma operação suave do veículo elétrico. Controladores de velocidade são classificados de acordo com a faixa de voltagem e amperagem (EMADI, 2005, p.58). Nesse trabalho, será utilizado um controlador PWM (Pulse width modulation).

O PWM é uma poderosa técnica para controlar circuitos analógicos a partir de circuitos digitais, que consiste em variar a largura do pulso de tensão na carga. Ele é utilizado num vasto campo de aplicações, como por exemplo: controle de motores, medidas de temperaturas, comunicações, etc (ARAÚJO, 2002, p.45).

Essa técnica pode ser utilizada para controlar motores CC. O conceito por trás dessa utilização está no fato que motores elétricos possuem uma alta carga indutiva, isto é, a corrente entre seus terminais não sofre variações bruscas. Assim, a corrente gerada por uma onda quadrada aplicada a seus terminais será “atenuada” pela indutância, fazendo com que surja uma tensão média sobre o motor. Essa tensão média do PWM será tão alta quanto for a largura dos pulsos. Dessa forma, ao variar a largura dos pulsos aplicado, irá variar a tensão sobre o motor e, conseqüentemente, sua velocidade (ARAÚJO, 2002, p.45).

No controle PWM, os sinais de gatilho são gerados através da comparação de uma onda triangular com um sinal CC, como mostrado na Figura 8b. A Figura 8a mostra a tensão de entrada, a tensão de saída e a corrente de entrada. .

Na operação de um controle por PWM existem diversas vantagens a serem consideradas. Na condição de aberto, nenhuma corrente circula pelo dispositivo de controle e, portanto, sua dissipação é nula. Na condição de fechado, teoricamente, se ele apresenta uma resistência nula, a queda de tensão é nula, e ele não dissipa também nenhuma potência. Isso significa que, na teoria, os controles PWM não dissipam potência alguma e, portanto, consistem em soluções ideais para este tipo de aplicação. Na prática, entretanto, isso não ocorre (GHIRARDELLO, s.d.).

Em primeiro lugar, os dispositivos usados no controle não são capazes de abrir e fechar o circuito num tempo infinitamente pequeno. Eles precisam de um tempo para mudar de estado e, neste intervalo de tempo, sua resistência sobe de um valor muito pequeno até infinito e vice-versa. Entretanto, mesmo com este problema, a potência gerada num controle PWM ainda é muito menor do que num circuito de controle linear equivalente e sua eficiência é bastante alta em se tratando de controle de motores. (GHIRARDELLO, s.d.)

A Figura 8 demonstra técnica de modulação PWM.

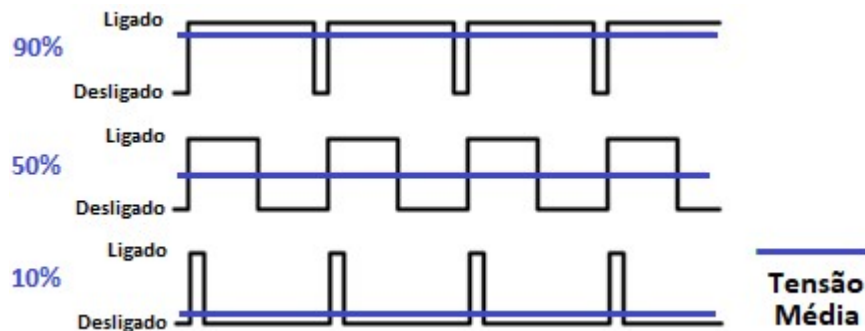


Figura 8 – Técnica de modulação PWM

Fonte: Próprio Autor, 2019

3. Testes e Avaliação

3.1 Descrição do Circuito

O circuito proposto na Figura 9 está baseado no microcontrolador Atmel 89S8253, onde está gravado o software que produz o sinal modulado PWM, que por sua vez acionará a etapa de potência. Como pode ser observado, o motor está sendo chaveado pelo MOSFET Q5 de referência IRF 3205, que suporta uma corrente ID de até 110A contínuos e uma tensão Vdss de 55V. O diodo D1 tem a função de grampear a tensão reversa nos terminais do motor que aparece no momento que cessa a circulação de corrente pelo corte de Q5, a qual tenderia a queimar este componente. O acionamento de Q5 é feito pela etapa anterior, compreendida entre o pino P1.7 e R7. Esta etapa tem duas principais funções: a primeira através do inversor formado por Q1 e Q2, é complementar o sinal gerado pelo microcontrolador, para evitar o acionamento momentâneo do motor no momento em que o circuito for alimentado já que as saídas do microcontrolador assumem o nível lógico 1 por padrão; a segunda função é de chavear o gate de Q5 com a tensão de 12V e não com 5V, fornecido pela porta do microcontrolador. Q3 é responsável por saturar Q5 ao passo que Q4 força o corte de Q5.

fase, constatou-se o sobreaquecimento do MOSFET em operação. Verificadas algumas hipóteses, e após pesquisas acompanhadas de experimentos, pode-se estudar, o sinal aplicado no Gate do MOSFET, conforme mostrado na Figura 10. Nesta foto observa-se a transição do sinal do valor 0V para 12V ocorrendo de modo rápido, contudo no momento do corte, em que há o retorno de 12V para 0V, o sinal (onda inferior) decai de maneira lenta, revelando um regime de operação prolongado e indesejado no Dreno do MOSFET (onda superior), forçando-o a operar na região intermediária entre a saturação e corte onde há muita dissipação de potência por efeito Joule. Este fato além de impor condições extremas de funcionamento ao componente de potência, podendo até levá-lo à queima, acaba por comprometer a eficiência energética do sistema, aumentando as perdas e diminuindo a autonomia das baterias.

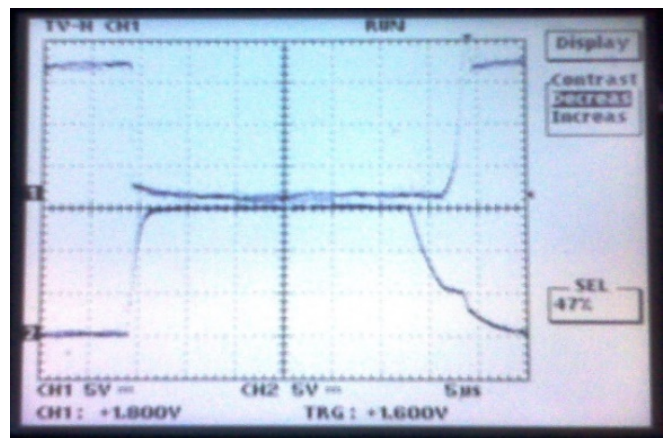
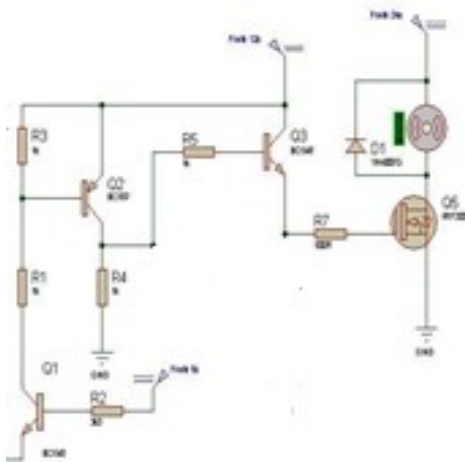


Figura 10 – Circuito e formas de onda encontradas no Gate e no Dreno de Q5, no primeiro teste.

Fonte – Próprio autor, 2010

Com o intuito de promover o escoamento da carga elétrica acumulada pelo efeito capacitivo do Gate, no momento do corte, intercalou-se um resistor entre o Gate e o Souce do MOSFET.

Uma pequena melhora do sinal de Gate foi obtida, porém insuficiente para promover o corte no tempo indicado. Outros ensaios foram realizados, diminuindo-se o valor da resistência deste resistor de escoamento, no sentido de diminuir o tempo de corte do MOSFET, contudo à medida que melhorava-se a curva de corte, a curva da saturação passava a ser mais longa, provocando o mesmo efeito de aquecimento no momento da transição positiva.

A solução definitiva veio com a otimização do circuito de acionamento do MOSFET pela adição de um novo transistor Q4 que imediatamente após o corte de Q3, entraria em saturação impondo, de maneira rápida, o corte do MOSFET, pela drenagem instantânea a carga elétrica acumulada pelo efeito capacitivo do Gate. Esta alteração no circuito de disparo do MOSFET permitiu que ambas as rampas, de subida e de descida, tivessem um perfil próximo do ideal de transição instantânea onde o MOSFET apenas trabalhasse estritamente na região de saturação absoluta ou de corte absoluto e as perdas de potência por efeito Joule no componente seriam praticamente nulas.

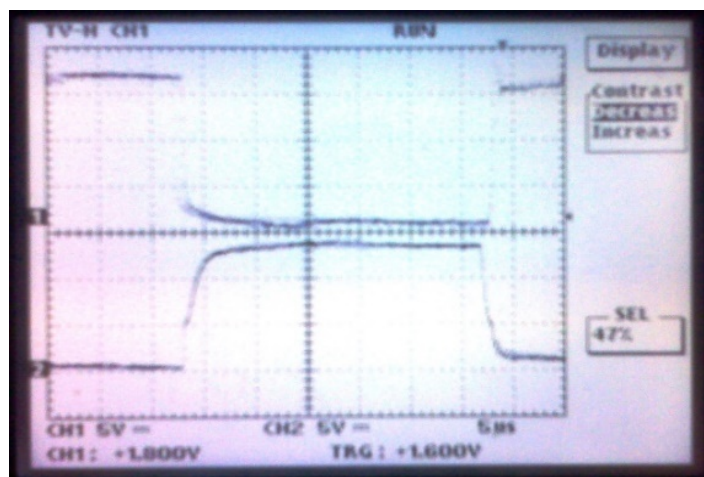
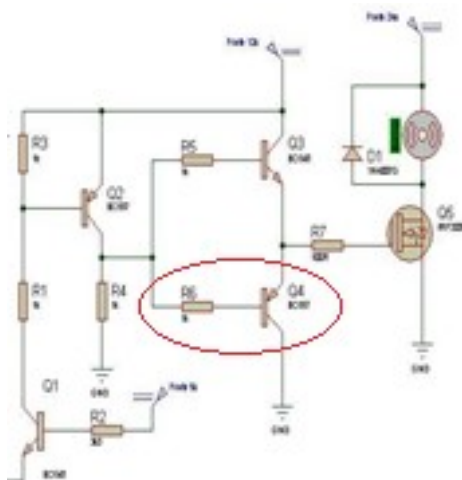


Figura 11 – Circuito definitivo e formas de onda encontradas no Gate e no Dreno de Q5, após modificação no acionamento do MOSFET.

Fonte – Próprio autor, 2010

4. Resultados

Observou-se que o sucesso da utilização do MOSFET em correntes elevadas, acima de 100A, está diretamente ligado ao alto fluxo de corrente instantâneo que se pode fornecer ou drenar do Gate deste transistor no momento da saturação ou corte, uma vez que a alta capacitância do Gate-Source. Esta característica de MOSFETS de alta potência, provocam picos de correntes severos demandando um circuito de acionamento capaz de suprir essa alta demanda de corrente de modo instantâneo. Nos diversos experimentos realizados, verificou-se que a criticidade do circuito residia justamente nesta etapa de acionamento dos MOSFETS cuja ineficiência provocava o aquecimento excessivo ou até mesmo sua queima.

Sabe-se que o produto $U \cdot I$ que, responsável pela potência dissipada no elemento chaveador, no corte onde I tende a zero, este produto também tende a zero atendendo ao princípio de operação do controle PWM. Nos testes posteriores a controladora apresentou-se bastante estável no que tange à dissipação de calor e conseqüentemente ao rendimento energético, sendo que este não foi especificamente determinado nos experimentos realizados neste trabalho, devido à necessidade de otimização de tempo para a conclusão do mesmo.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível dimensionar os componentes de potência e verificar na prática o comportamento destes componentes frente às condições adversas de funcionamento e algumas vezes severas a que está submetido quando aplicado ao controle de potência de motores responsáveis pela locomoção de veículos elétricos. No decorrer dos testes de bancada estabeleceu-se a correlação entre a curva de condução do MOSFET, especificamente nos seus tempos de transição, com o desempenho da

controladora, balizando as alterações futuras, realizadas no circuito de acionamento do MOSFET.

Uma vez alcançada a montagem de um protótipo do circuito funcional do controlador, pode-se desenvolver um software para geração do sinal PWM de acionamento que comandou a etapa de potência acionando por sua vez o motor CC.

Para o desenvolvimento do projeto de uma controladora PWM, é necessário o conhecimento dos principais componentes que compõem um veículo elétrico. Baterias, tipos de motores e seus respectivos controladores. Aliado ao conhecimento destas tecnologias, é primordial uma criteriosa escolha e dimensionamento dos componentes utilizados, para que o consumo de energia seja otimizado ao máximo, dadas as limitações impostas pelas tecnologias das baterias disponíveis no mercado assim como pelos custos que envolvem a utilização das mesmas. Partindo dessas premissas foi possível construir um circuito eletrônico de controle e potência capaz de gerar um sinal PWM escrito em linguagem C para microcontroladores AT 89C2051, permitindo assim realizar testes de funcionamento no protótipo de um Controlador PWM para uma Motocicleta Elétrica.

Recomenda-se a quem deseje continuar este trabalho a adição de algumas funções ao controlador no sentido do gerenciamento de energia. Uma importante função a ser acrescida ao sistema a de controle e limitação de corrente. Isto poderá ser realizado adicionando-se um resistor de shunt em série com a alimentação do motor CC, onde poderá ser monitorada a corrente que circula no sistema de potência, através da queda de tensão por ele produzida. Este sinal de tensão obtido, e devidamente tratado, servirá como um sinal de realimentação para que o software de controle possa processá-lo e considera-lo na geração do sinal de saída. Outra importante função a ser contemplada poderá ser o monitoramento e exibição de parâmetros como nível de carga das baterias e velocidade do veículo para serem também processados pelo sistema e possam fazer parte da tomada de decisões do controlador, conferindo um gerenciamento mais eficaz do processo como um todo.

Referências

- AMARAL, E. G. **Veículo Elétrico Com Sistema Energético Híbrido : Célula De Combustível/Baterias Eletroquímicas**. Tese (Graduação) – UNICAMP. Campinas. 1998
- ARAÚJO, R. M. **Projeto E Implementação De Um Robô Holonômico Para Futebol De Robôs**. Tese (Doutorado) – FURG. Rio Grande. 2002
- BARRETO, G. **Veículo Elétrico A Bateria : Contribuições A Análise De Seu Desempenho E Seu Projeto**. Campinas. [S.N]. 1986.
- BOCCHI, N., FERRACIN, L. C., BIAGGIO, S. R. Pilhas e Baterias: Funcionamento e Impacto Ambiental. Revista Química Nova na Escola, nº 11, 2000.
- COELHO, R. R., de ALMEIDA, C. M. & PECCIN, V.B. **Controle Em Malha Fechada Da Velocidade De Um Motor DC Utilizando Um Microcontrolador 8051**. Santa Catarina. [s.n.]. [s.d.]
- DEL-PUPPO, E. L. **Acionamento Microcontrolado De Um Motor CC Com Frenagem Regenerativa**. Tese (Graduação) – UFES. Vitória. 2007.
- EMADI, A. **Handbook Of Automotive Power Electronics And Motor Drives**. Chicago. Taylor & Francis Group. 2005.
- FERREIRA, A. A., **Sistema Supervisório De Gestão De Múltiplas Fontes De Suprimento Para Aplicações Em Veículos**. Campinas. [s.n.]. 2007.
- GHIRARDELLO, A. **Apostila sobre Modulação PWM**. Curso Técnico em Eletrônica. Americana. [s.d.]
- GOMES, R. F. T. **Ensaio de um Motor Shunt de Corrente Contínua para Obtenção da sua Característica Electromecânica e Mecânica**. Tese (graduação). Instituto Politécnico do Porto. Porto. 2004.
- MELCHIORS, J. L. & SCHARLAU, C. C. **Motores De Corrente Contínua**. Visconde de Mauá. SENAI. [s.d.]
- MUSSOI, F. L. **Eletricidade E Instalações : Máquinas Elétricas**. Florianópolis. Gráfica CEFET. [s.d]
- PACCA, S. **Veículos Elétricos : Uma Esperança Renovada De Ganhos Ambientais E Econômicos Para Novos Investidores Em Energia No Brasil**. São Paulo. [s.n.]. 2008.

RASHID, M. A. ***Eletrônica De Potência***. São Paulo. MAKRON books. 1999.

RASHID, M. H. ***Power Electronics Handbook***. Canadá. ACADEMIC PRESS. 2001.

SILVA, H.F. Belo Horizonte. **Alternativas Energéticas: Uma Visão CEMIG**. COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. 2012.

TAVARES, A. ***Maquinas De Corrente Contínua***. Pelotas. ETFPel. 1984.

TORO, V.D. ***Fundamentos De Máquinas Elétricas***. Rio de Janeiro. Prentice-Hall do Brasil. 1990.

YEDAMALE, P. Bbrushless DC (BLDC) Motor Fundamentals.
Technical Report, Microchip Technology Inc. Technology Inc., 2003.