

SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE PARA UM MOTOR CC APLICADO EM UM PROTÓTIPO DE ALTO RENDIMENTO

Jólio Ribeiro Maia Neto, netomaia17@hotmail.com¹

João Alexandrino Bemfica Neto, joao_bemfica96@hotmail.com²

Ícaro Lofego Mota, icaromota@alunos.utfpr.edu.br¹

Douglas da Costa Ferreira, douglascfeng@gmail.com²

Fábio Roberto Chavarette, chavarette@gmail.com³

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica, Pato Branco – Paraná – Via do Conhecimento, s/n - Fraron, Pato Branco - PR, 85503-378

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Departamento de Engenharia Mecânica, Pato Branco – Paraná – Via do Conhecimento, s/n - Fraron, 85503-378

³UNESP, Universidade Estadual Paulista - Departamento de Matemática, Ilha Solteira - São Paulo – Av. Brasil Sul, 56 – Centro, 15385-000

Resumo: Visando realizar um controle de velocidade em um motor que possuísse um baixo custo e consumo, elaborou-se um controlador que baseado na tensão média controla o motor de maneira eficiente para ser implementado em um protótipo de veículo de alto rendimento. No Campus de Pato Branco da Universidade Federal do Paraná, a Equipe 'Tubarão Branco' é responsável pelo desenvolvimento de um protótipo de veículo de alto rendimento cuja energia motriz base é elétrica. Após estudos e análises na área optou-se por um motor elétrico de corrente contínua (CC) devido ao seu baixo custo. O motor escolhido permite que seja ligado diretamente em uma fonte de energia, no entanto, tal procedimento resulta em um pico de corrente prejudicial não somente a parte elétrica, por drenar desnecessariamente altos níveis de energia, como também a parte mecânica, por gerar uma vibração excessiva podendo causar prejuízos estruturais ao veículo. Esse trabalho explora o desenvolvimento de um controlador que utilizando um PWM para acionar uma chave semicondutora, resulta em uma onda discretizada de maneira que permita um controle analógico, por meio de um potenciômetro, da velocidade do motor. O principal resultado implica na eliminação dos picos de corrente no motor e consequentemente redução dessas perdas, além de permitir o controle de velocidade do motor CC ligado a uma bateria que não permite variação de tensão.

Palavras-chave: Controlador de velocidade, motor CC, eficiência energética

1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que de toda energia gerada, 10-15% se perde desnecessariamente em processos não otimizados na área de eletrônica de potência (BOSE, 1997). Dentre estes processos o mais comum é a partida direta em motores, essa abordagem apresenta problemas principalmente pela alta corrente drenada para a partida, sendo de 6 a 10 vezes superior a corrente nominal da máquina (CHAPMAN, 2013). Em motores de corrente contínua a abordagem mais usual para controlar sua velocidade é por meio da variação da tensão média aplicada em suas bobinas, visto que seria possível controlar a velocidade apenas ligando uma resistência variável em série com o motor como mostra a Fig. 1, mas este procedimento resultaria em um desperdício de toda energia que não estaria sendo utilizada pelo motor na forma de calor pela resistência.

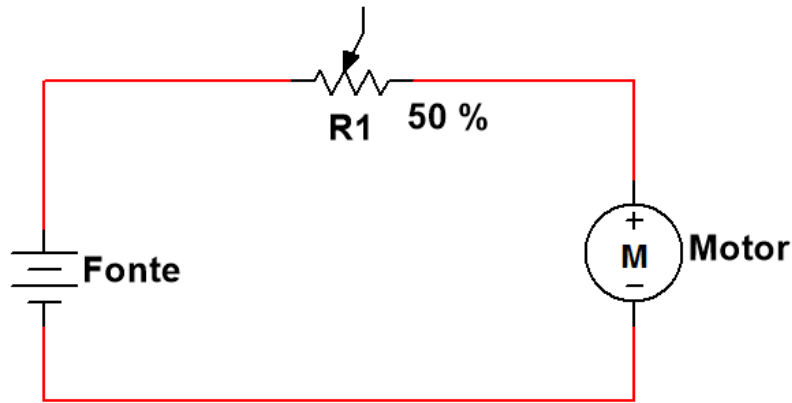


Figura 1 – Circuito com fonte de alimentação, resistência variável e motor CC.
Fonte: Autoria Própria.

Uma das estratégias para que se possa variar a tensão média é a substituição do resistor da Fig. 1 por uma chave, que controlaria quando o motor receberia energia da fonte, como mostra a Fig. 2.

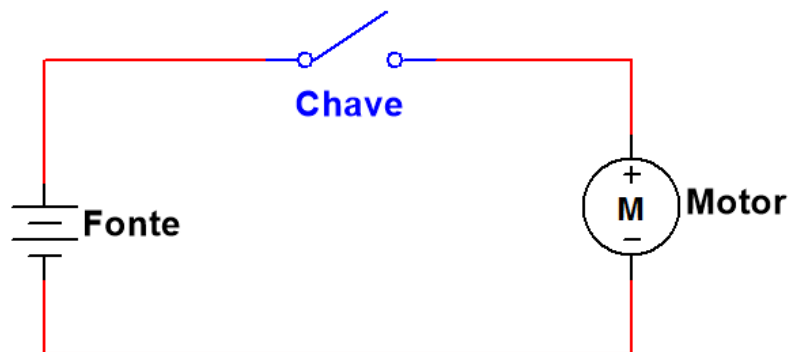


Figura 2 – Circuito com fonte de alimentação, chave e motor CC.
Fonte: Autoria Própria.

Para tornar digital o processo de acionamento deste circuito, utilizou-se no lugar da chave comum, uma chave semicondutora que controla a tensão média encaminhada ao motor com base nos períodos em que a chave está aberta ou fechada. Para este tipo de aplicação a chave semicondutora mais indicada é o MOSFET devido a sua ampla variedade de tensões e correntes, por permitir chaveamentos em altas frequências, e pela facilidade de ser controlado por sinais digitais (SHRIVASTAVA e ROHITKRISHNA, 2016). Como representado de maneira simplificada.

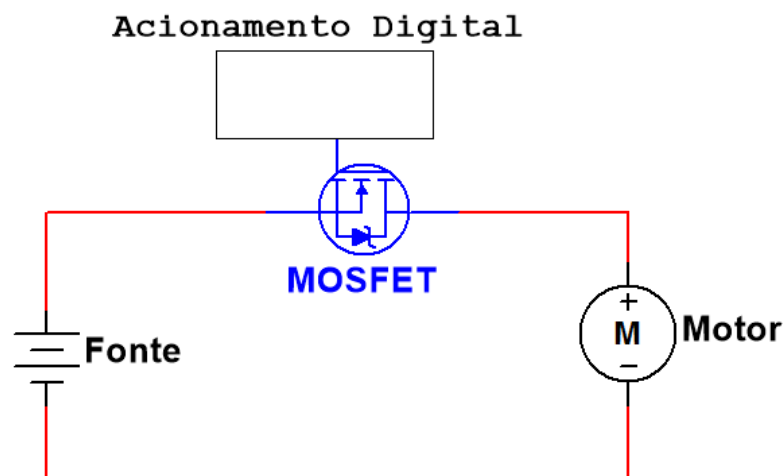


Figura 3 – Circuito simplificado com fonte de alimentação, MOSFET ligado ao circuito de acionamento e motor CC.
Fonte: Autoria Própria.

MOSFET é um tipo específico de transistor, geralmente composto por três terminais: Source, Drain e Gate. Drain e Source são responsáveis por conduzir a energia no sistema, enquanto o Gate por definir quando essa energia será conduzida, funcionando exatamente como um gatilho.

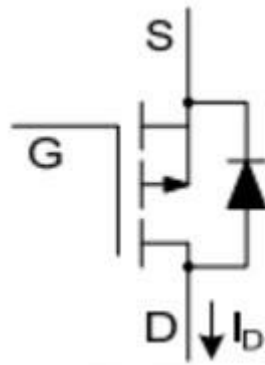


Figura 4 – Representação MOSFET.

Disponível em: <http://www.edgefxkits.com/blog/wp-content/uploads/Power-MOSFET-Symbols.jpg>

Uma estratégia bem usual para realizar o acionamento do Gate do MOSFET é a modulação por largura de pulsos (PWM), onde esta utiliza-se de uma onda quadrada com período constante, que, oscilando em alta frequência e permitindo a variação de tempo em nível lógico alto (Duty Cycle), proporciona o controle do tempo em que o MOSFET conduz energia e consequentemente a tensão média nos terminais do mesmo. Como se pode observar nas figuras a seguir.

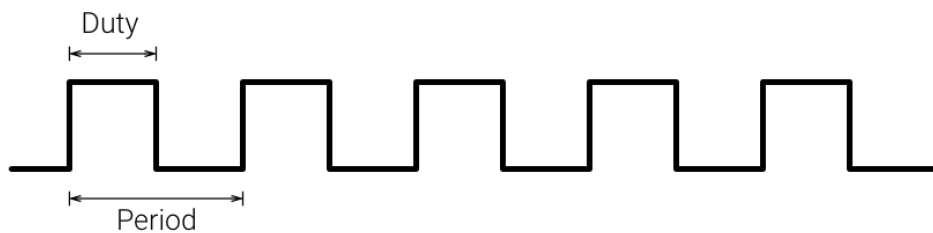


Figura 5 – Representação de um PWM, período e Duty Cycle.

Disponível em: <https://developer.android.com/things/sdk/pio/pwm.html>

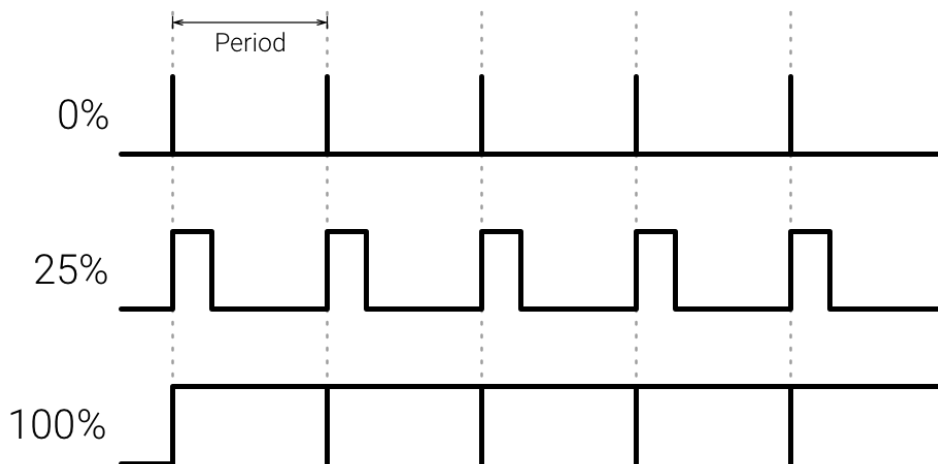


Figura 6 – Representação de um PWM, variação do Duty Cycle.

Disponível em: <https://developer.android.com/things/sdk/pio/pwm.html>

O dispositivo utilizado para geração deste pulso foi o NE555, um circuito integrado específico que indica em seu datasheet uma disposição simples para que seja possível gerar o PWM. Utilizando dois diodos simples, dois capacitores, dois resistores e um potenciômetro (resistência variável), é possível gerar um PWM preciso e estável.

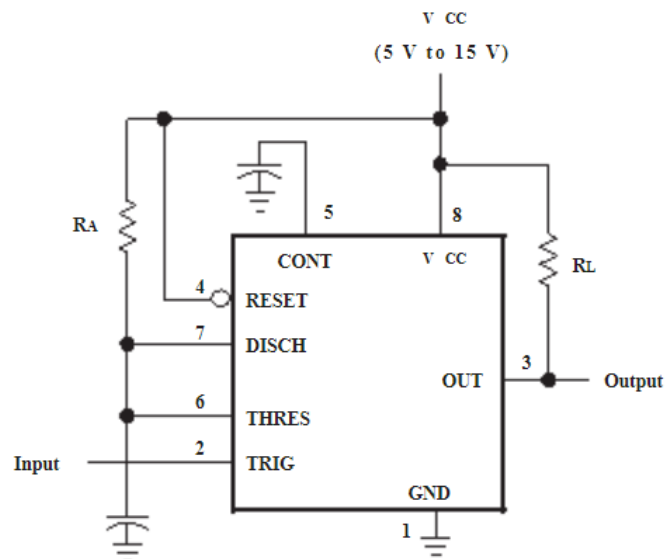


Figura 7 – Circuito NE555 PWM.
Fonte: Datasheet Componente.

Para fazer um controle da velocidade do motor mantendo uniformidade no processo de rotação, é necessário que o PWM oscile milhares de vezes por segundo. Esse procedimento resulta em transientes, que são picos de tensão no sistema. Para reduzir este efeito além de reduzir perdas na chave utiliza-se o circuito Snubber. (Hart, 2011)

Para este projeto, devido à comutação ser feita para um motor elétrico, RCD foi a disposição escolhida por contemplar todas as necessidades do MOSFET no processo de acionamento do motor. Essa topologia consiste na ligação de um resistor de potencia ligado em paralelo a um diodo, e em serie com ambos um capacitor.

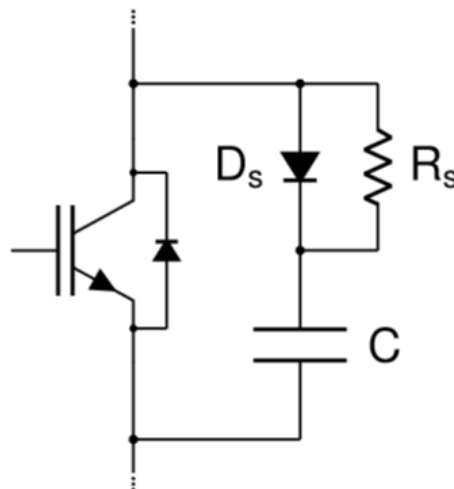


Figura 8 – Circuito Snubber.
Fonte: Hart (2011) Adaptado.

Qualquer circuito elétrico está sujeito a interferências e sinais indesejados, para que se possa reduzir tais perturbações é comum a utilização de filtros. O filtro mais simples e usual é o simplesmente capacitivo, que utiliza de um capacitor ou um banco de capacitores (Hart, 2011).

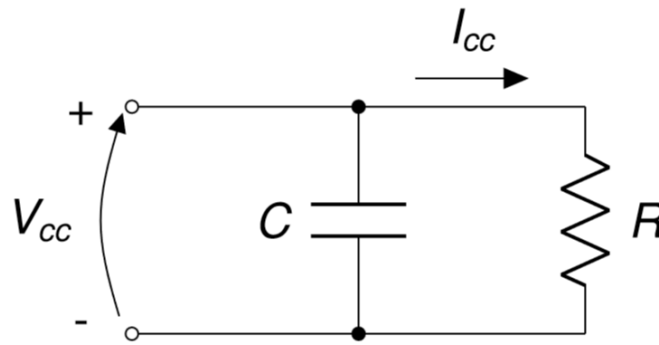


Figura 9 – Filtro Capacitivo.
Fonte: Hart (2011) Adaptado.

Outro fator a se considerar é a rotação do motor pela inércia, que se apresenta em todos os momentos em que o PWM se encontrar em nível baixo. Este fator faz com que o motor trabalhe como um gerador, funcionando como uma fonte de tensão com capacidade de danificar alguns componentes do circuito. Para que isso não ocorra deve-se alocar um diodo de roda livre em paralelo com o motor responsável por fazer com que essa energia proveniente do motor não prejudique o restante do sistema. Nesse caso utiliza-se de um diodo de ação rápida, o Diodo Schottky é o mais recomendado.

Para acionamento de chaves semicondutoras como o MOSFET escolhido, um sinal deve ser enviado para seu Gate. Neste caso, é um sinal PWM gerado em um circuito integrado específico, o NE555, no entanto, este sinal vindo da saída do CI não possui níveis adequados de tensão e corrente para liberar a passagem de corrente nos terminais da chave. Para que o PWM gerado seja capaz de polarizar o MOSFET, um driver se faz necessário. Nesta etapa do processo, optou-se pela utilização de um optoacoplador, que quando polarizado, acende um diodo infravermelho em seu interior e um receptor libera a passagem de corrente, neste caso, para um MOSFET. Foi decidido pelo CNY74-2, que se enquadra nos requisitos do sistema. Este optoacoplador de dois canais que no emissor conta com uma tensão máxima de 6V com corrente de 60mA e no detector também conta com especificações dentro do necessário, possuindo uma frequência máxima de operação de 100kHz.

Pin Connections

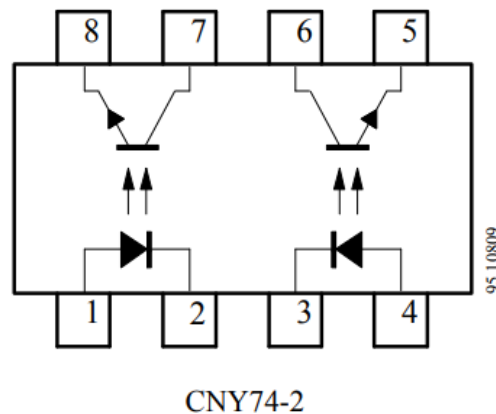


Figura 10 – Circuito Integrado CNY74-2.
Fonte: Datasheet do componente.

Como se pode observar na Fig. 10, o conjunto de pinos {1,2,8,7} correspondem a um canal, onde 1 e 2 corresponde a polarização do LED emissor, que quando energizado, libera passagem de energia de 7 para 8. Analogamente (espelhado) para o outro canal {4,3,6,5}. Assim permitindo que se polarize o Gate do MOSFET com tensão e corrente predefinidas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este projeto foi baseado em um motor com as seguintes especificações:

Tabela 1 – Parâmetros do Motor Utilizado.

Tipo de Motor	Corrente Contínua (CC)
Tensão de Alimentação	12~24 Volts
Corrente Nominal	5,2 Ampères
Potência	85 Watts
Torque	135 miliNewton * Metro

Trabalhando com a tensão de 12V para alimentação do motor e de seu acionamento não se fez necessário regular a tensão para o circuito de baixa potencia, visto que a tensão de 12V é comum para ambas as partes do projeto.

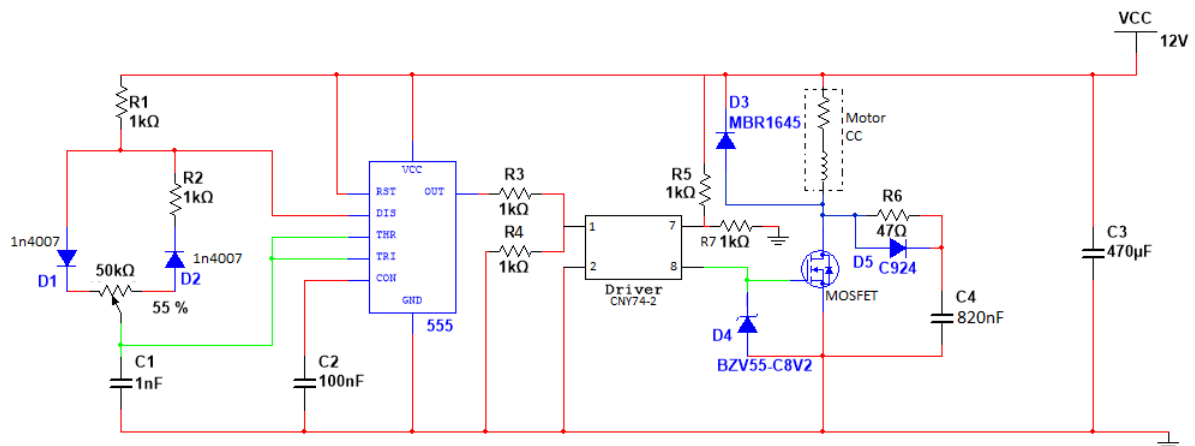
Para geração do PWM e seu controle, foi utilizado a ligação já descrita na introdução, como recomendação no datasheet do componente, porém foi inserido um potenciômetro juntamente com dois diodos 1N4007 e uma resistência de 1k Ω entre os pinos 6 e 7 do CI possibilitando um controle do Duty Cycle do PWM, assim obtendo um controle da tensão média de sua saída.

Tratando sua saída com o optoacoplador ligado a um divisor de tensão que envie apenas 6V para o emissor e o receptor do CNY74-2, tem-se o driver funcionando da maneira adequada para o acionamento do MOSFET. Este necessita de um diodo Zener para sua polarização, o escolhido foi o BZV55-C8V2 por apresentar especificações adequadas e baixo custo. Ainda na chave, temos acoplado um circuito Snubber para reduzir perdas na chave além de controlar transientes que poderiam danificá-la, em seu projeto utilizou-se um resistor de potencia de 47 Ω em paralelo a um diodo C924 e ambos em série a um capacitor de 820nF finalizando o acionamento e proteção da chave semicondutora. A chave escolhida foi IRFP250N por suportar os picos de corrente provenientes do motor.

Em serie a este MOSFET temos o motor, que se encontra em paralelo a um diodo Schottky, que é de alta velocidade, responsável por fazer com que o próprio motor consuma a energia que ele gerar por inercia, energia esta que poderia prejudicar o sistema, o escolhido foi o MBR1645.

Para finalizar, em paralelo com os terminais da fonte, foi inserido um capacitor de 470 μ F responsável por filtrar a tensão de entrada no sistema.

Todo este circuito listado acima pode ser observado na figura abaixo, destacando que o motor CC está representado por sua composição equivalente, indutor mais resistência.

**Figura 11 – Circuito Completo Controlador de Velocidade Motor CC.**

Fonte: Autoria Própria.

A Fig. 12 mostra o resultado final do protótipo construído pela equipe Tubarão Branco no ano de 2017.



Figura 12 – Representação do protótipo.
Fonte: Documentos da Equipe Tubarão Branco.

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

Dados a seguir foram obtidos em testes realizados em bancada que expressam a utilidade do controlador quanto à eficiência energética.

Tabela 2 – Testes em bancada sem Controlador

Motor Teórico (V)	Multímetro		Joulimiter				Velocidade Estimada
	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Rotação (RPM)	
12	11,9	0,67	11,7	0,6	7,0	3072	28,9km/h
24	24	0,79	23,9	0,7	16	6226	58,7km/h

Tabela 3 – Testes em bancada com Controlador

Motor Teórico (V)	Multímetro		Joulimiter				Velocidade Máxima Estimada
	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Rotação Máx.(RPM)	
12	11,8	0,58	11,6	0,5	5,8	3072	28,9km/h
24	24,1	0,70	23,8	0,6	14	6226	58,7km/h

No campo de corrente, pode-se observar que houve uma pequena diminuição no consumo do motor causado pelo controlador. Sabendo também que após o mesmo intervalo de testes segue resultados:

No caso 1 (sem controlador) a bateria acabou com uma tensão de 9,9 Volts para início com 12V; e 20,8 Volts para início com 24.

Enquanto no caso 2 (com controlador) a mesma bateria acabou com 10,5 Volts para início com 12V; e 22,0 Volts para início com 24.

Isso se deve ao controlador que reduz ao máximo as perdas na partida, por remover os picos de corrente, assim aumentando a duração da bateria. Vale ressaltar que estes testes foram realizados em bancada e sem carga alguma ligada ao motor.

Também foram realizados testes práticos em uma pista de atletismo de 400 metros com piso emborrachado como mostra a Fig. 13, este teste foi realizado com o protótipo, portanto com a carga total, veículo mais o piloto, acoplada ao eixo do motor. Anotaram-se os seguintes resultados:

- A bateria que iniciou os testes com 12,1Volts, marcava 10,3Volts;
- Corrente média drenada foi de 9,7Ampères;
- Com uma potência média de 93W;
- Consumo aproximado de 10kJ por volta.

Dados medidos pelo Joulimiter.

Por questões de segurança não foram efetuados testes sem o controlador nessas condições.



Figura 13 – Pista de Atletismo
Fonte: Google Maps

4. CONCLUSÃO

Testes em bancada demonstraram realmente o esperado, com a utilização do controlador baseado em PWM, acionando a chave semicondutora (MOSFET) eliminou os picos de corrente na partida do motor CC abordado no projeto, além de permitir um controle de sua velocidade. Por eliminar tais picos, notou-se uma melhora no tempo de duração das baterias, bem como a diminuição do esforço (perdas) na partida do veículo. Remover estas perdas é essencial para qualquer projeto que vise eficiência energética e ampliação do tempo entre cargas das baterias, assim este circuito de controle, mesmo que básico, já apresentou melhoras significativas quanto ao consumo de energia elétrica no motor, portanto o objetivo do projeto foi alcançado.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado no âmbito do Programa Institucional de Voluntariado em Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Brasil assim os autores agradecem, além do programa, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e UNESP - Univ. Estadual Paulista pelo apoio. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo FAPESP nº 2014 / 16807-3) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processo CNPq nº 301769 / 2012-5) pelo financiamento. À Fundação Araucária e à CAPES para bolsas e financiamentos. Agradecemos também todo apoio e colaboração por parte da Equipe Tubarão Branco e seus membros.

6. REFERÊNCIAS

- Bose, Bimal K. , 1997, “Power Electronics and Variable Frequency Drives:Technology and Applications”. [S.l.]: Wiley-IEEE Press.
- Chapman, Stephen J., 2013, “Fundamentos de Máquinas Elétricas”. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil: AMGH Editora.
- Fairchild Semiconductor, 2002, “Datasheet IRFP250 N-Channel Power MOSFET”.
- Halliday, D., 2006, “Fundamentos de Física: Elétrica”, vol3. 7 ed. LTC.
- Hart, Daniel W., 2011, “Power electronics”. [S.l.]: McGraw-Hill.
- Jagatheeswari, T. A. Sivakumar P., S. Anand and S. Suresh Kumar, 2014, “Performance enhancement of boost converter using snubber circuit”, American-Eurasian Network for Scientific Information. Número do documento Gale: GALE|A418088038.
- Kim, T. H., Choi J., Ko, K. C., Lee, J., 2003, “Finite-Element Analysis of Brushless DC Motor Considering Freewheeling Diodes and DC Link Voltage Ripple”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 39, NO. 5. DOI: 0018-9464/03.
- Shrivastava, Nishant e Rohitkrishna, 2016, “Nambiar Single MOSFET and relay based DC motor driver for navigational robots”. SPECIAL ISSUE ICAARS – DOI: 10.1007/s40012-016-0126-8.
- Telefunken Semiconductors, 1990, “Datasheet CNY74-2/CNY74-4”, Heilbronn, Germany.
- Texas Instruments, 1973, revisado em 2006, “Datasheet NA555, NE555, SA555, SE555 PRECISION TIMER SSLFS022F” (Old Version), Dallas, Texas.
- Umans, Stephen D., 2014, “Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley”. 7. ed. – Porto Alegre: AMGH.
- Yingtao Li, Liping Fu, 2013, “Feasibility study of using a Zener diode as the selection device for bipolar RRAM and WORM memory arrays”, Journal of Physics. DOI: 10.1088/0022-3727/47/2/025103.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

Speed control system for a DC motor applied to a highperformance prototype

Jólio Ribeiro Maia Neto, netomaia17@hotmail.com¹

João Alexandrino Bemfica Neto, joao_bemfica96@hotmail.com²

Ícaro Lofego Mota, icaromota@alunos.utfpr.edu.br¹

Douglas da Costa Ferreira, douglascfeng@gmail.com²

Fábio Roberto Chavarette, chavarette@gmail.com³

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica, Pato Branco – Paraná – Via do Conhecimento, s/n - Fraron, Pato Branco - PR, 85503-378

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Departamento de Engenharia Mecânica, Pato Branco – Paraná – Via do Conhecimento, s/n - Fraron, 85503-378

³UNESP, Universidade Estadual Paulista - Departamento de Matemática, Ilha Solteira - São Paulo – Av. Brasil Sul, 56 – Centro, 15385-000

Abstract. Aiming to perform a speed control in an engine that has a low cost and consumption, a controller was developed that, based on the average voltage, controls the engine in an efficient way to be implemented in a prototype of high performance vehicle. At Federal University of Paraná in Pato Branco Campus the Tubarão Branco team is responsible for the development of a prototype of a high-performance vehicle with electric engine bases. After studies and analysis in the area there were opted for an electric engine of direct current due to its low cost. The chosen engine allows it to be directly connected to a power source, however, such a procedure results in a current peaks damaging not only the electrical part, by draining unnecessarily high energy levels, as well as the mechanical part, by generating a vibration may cause structural damage to the vehicle. This work explores the development of a controller that uses a PWM to trigger a semiconductor key resulting in a discretized wave in a way that allows an analog control, through a potentiometer, for the engine speed. The main result implies the elimination of current peaks in the electric engine and consequently reduction of these losses, besides allowing the speed control of the DC motor connected to a battery that does not allow voltage variation.

Keywords: Speed controller, DC motor, Energy efficiency.