

## Aplicações práticas de controladores analógicos na regulação de velocidade em MCCs de baixa potência

### Practical applications of analog controllers in speed regulation to low power MCCs

**Erick Chanhi Maroni**  
[erickmaroni@icloud.com](mailto:erickmaroni@icloud.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, PR, Brasil

**Felipe Walter Dafico Pfrimer**  
[pfimer@utfpr.edu.br](mailto:pfimer@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, PR, Brasil

**Alberto Yoshihiro Nakano**  
[nakano@utfpr.edu.br](mailto:nakano@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, PR, Brasil

**Rodrigo da Ponte Caun**  
[rodrigocaun@utfpr.edu.br](mailto:rodrigocaun@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, PR, Brasil

#### RESUMO

Atualmente, as indústrias demandam soluções eficientes para a aplicação de motores elétricos, visando altos rendimentos que podem ser viabilizados por conversores de energia. Esta classe de máquinas elétricas é composta, entre outras, por máquinas de corrente contínua (MCC) que, no atual contexto tecnológico, necessitam de métodos aprimorados de controle de velocidade e conjugado para obter alta eficiência, baixo custo e complexidade de operação. Assim, este trabalho descreve o desenvolvimento de um protótipo de conversor classe A aplicado a máquinas de corrente contínua que possa satisfazer especificações de operação, tais como níveis desejados de sinais transitórios e regime permanente, utilizando componentes eletrônicos analógicos. Para tanto, a energia proveniente da fonte de corrente contínua é condicionada pelo conversor, sendo o sinal modulante (ou, sinal de erro) comparado a uma forma de onda periódica que produz o sinal de ataque da chave semicondutora, regulando o valor médio da tensão de armadura da máquina elétrica. Após testes práticos, constatou-se plena eficiência da operação em malha fechada do sistema, ou seja, nossos resultados evidenciam a vantagem entre simplicidade e eficiência da estrutura implementada. O sucesso desta etapa de desenvolvimento motiva a implementação prática do controlador analógico e a extensão de sua aplicação a motores de pequeno porte.

**PALAVRAS-CHAVE:** MCC. Conversor classe A. Controle de velocidade.

#### ABSTRACT

Nowadays, industries have demanded efficient solutions for application in electric motors, aiming high performance which can be obtained by power converters. This class of electrical machines includes the DC machines, which in current technological context, it needs improved methods in speed control and torque to get high efficiency, low cost and operation complexity. Thus, this work describes the development of a class A converter prototype applied to DC machines that can satisfy design conditions, such as desired levels of transient and steady-state signals, using analog electronics devices. In order, the energy of direct current source is conditioned by converter, i.e. modulation signal (or, error signal) is compared to periodic wave form that generates the attack signal of the semiconductors with, with armature voltage control of the electrical machine through the average value. After practical tests, it was verified the full efficiency of closed-loop system operation, i.e. our results exhibit the advantage between simplicity and performance of the implemented structure. The success of this development stage motivates the practical implementation of the analog controller and the extension of its application to small motors.

**KEYWORDS:** DC machines. Class A converter. Speed control.

**Recebido:** 30 ago. 2018.

**Aprovado:** 04 out. 2018.

#### Direito autorial:

Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil tem demandado um aumento no uso de energia elétrica, justificado pelo seu atual estágio de desenvolvimento econômico. Este fato propicia uma análise criteriosa em termos de eficiência energética, ou seja, torna-se relevante garantir alto desempenho em linhas de produção, como por exemplo, na indústria têxtil (COSTA, 2017).

Por outro lado, a baixa eficiência energética está elevando os desperdícios, cujos efeitos imprimem um custo adicional de 61,7 bilhões de reais (BRASIL, 2017). Uma forma de reduzir o referido custo, mais especificamente no uso de motores elétricos, corresponde em aplicar novas técnicas de regulação de velocidade; que objetiva promover um melhor controle do fluxo de potência absorvido no setor industrial.

Neste sentido, esforços devem ser dispendidos para resolver a sinergia entre a demanda de energia e a eficiência na operação de máquinas elétricas. Para tanto, a Eletrônica de Potência tem sido uma área promissora por prover métodos baseados em conversores de energia aplicados a motores de corrente contínua (CC), valendo-se de componentes eletrônicos, que permite obter condições eficientes de operações (POMILIO, 2014).

Deste modo, este trabalho descreve o desenvolvimento da implementação prática de um sistema em malha fechada para o controle de velocidade, no domínio da frequência, de um motor de corrente contínua de ímãs permanentes. A priori, optou-se por uma topologia simples de conversor CC-CC denominado Classe A.

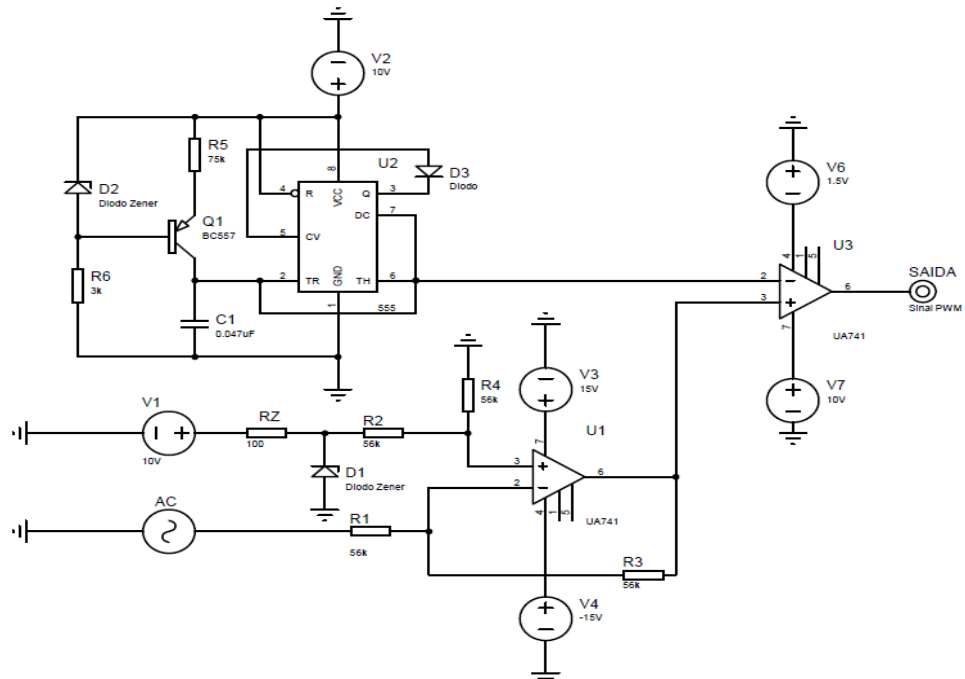
## MÉTODOS

Circuitos eletrônicos que tem como função controlar o fluxo de potência entre a fonte de energia e a carga utilizam, na maioria das vezes, conversores de energia desempenhando a função de interruptores. Atualmente, estes dispositivos são extremamente populares, podendo ser encontrados em equipamentos de telecomunicações, por exemplo.

Dentre outras, uma aplicação consolidada no meio acadêmico refere-se ao controle de velocidade de rotação em motores elétricos. Um modo para obter esse controle envolve a técnica PWM (do inglês, *Pulse-Width Modulation* – PWM), empregando dispositivos semicondutores que operam no modo chaveado, sendo conhecidos por fontes chaveadas (Barbi, 2005). A modulação PWM, no caso de motores CC, controla o valor médio da tensão de armadura, e, a partir disso, é possível controlar sua velocidade terminal.

A geração do sinal modulado envolve a comparação de dois sinais, um de alta frequência (chamado portadora) e o outro de baixa frequência (chamado modulante), produzindo um sinal alternado com frequência fixa e largura de pulso variável. Assim, o sinal da portadora é o responsável pela frequência de chaveamento dos interruptores (semicondutores) e pela razão cíclica. Em conversores CC-CC, emprega-se um sinal dente-de-serra como portadora. Por outro lado, o sinal modulante representa uma tensão contínua, pois objetiva-se uma tensão de mesma natureza na saída do conversor. A Figura 1 ilustra o projeto do circuito eletrônico de geração de sinais PWM.

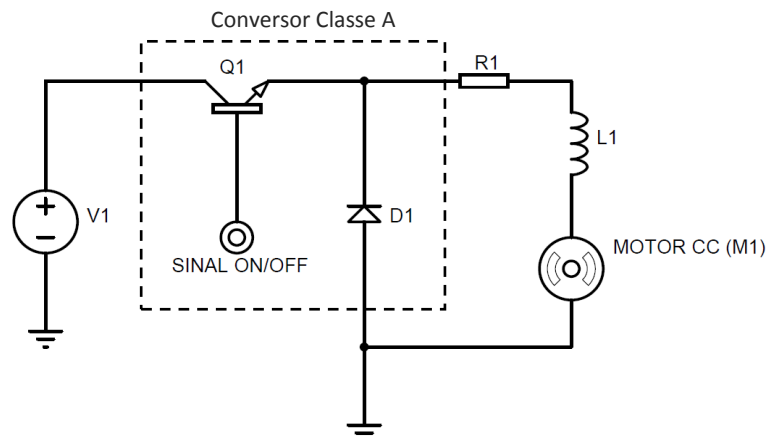
Figura 1 – Circuito do gerador PWM



Fonte: Autoria própria (2018).

Por fim, a seleção do tipo de conversor CC-CC aplicado ao protótipo baseou-se em uma estrutura simples e eficiente. Para tanto, optou-se por um conversor Classe A. Uma visão geral de operação desta classe de conversor aplicado no controle de um motor CC, pode ser observado através da Figura 2. Um fato importante na operação desta estrutura envolve a desmagnetização dos enrolamentos da máquina elétrica garantido pelo diodo de roda livre(D1).

Figura 2 – Conversor Classe A operando em malha aberta



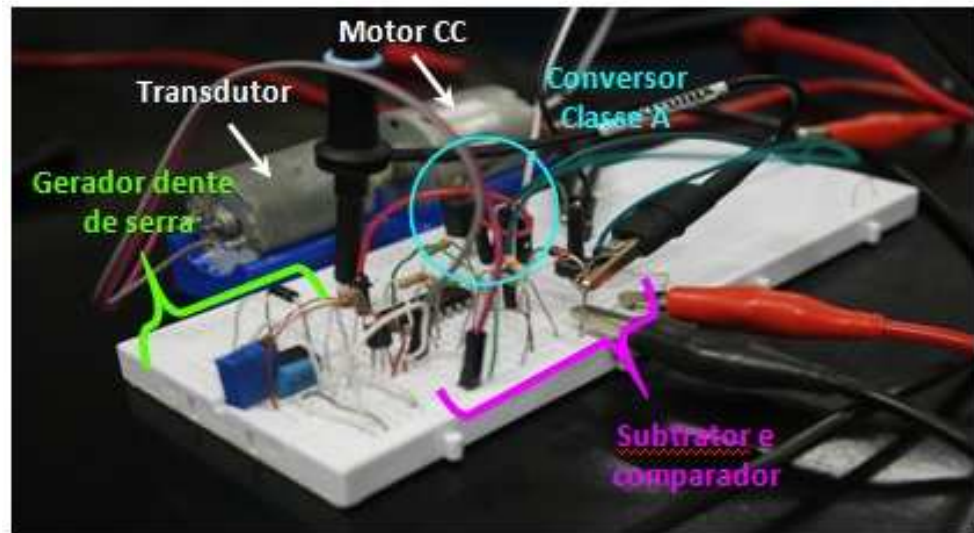
Fonte: Autoria própria (2018).

O princípio de funcionamento é definido conforme segue: O transistor (Q1) é alocado em posição de chave, sendo que o terminal de base recebe o sinal "on/off" que conecta a fonte de energia (V1) ao motor CC (M1). O diodo (D1) opera em "roda-livre" no momento da desmagnetização do enrolamento da máquina, ou seja, chave na posição "off". O objetivo é regular a tensão média no terminal do motor, controlando sua velocidade de operação.

## RESULTADOS

A implementação prática do sistema, em matriz de contatos, pode ser visualizado na Figura 3, executado após a etapa de projeto e validação por simulação via *software* PowerSim.

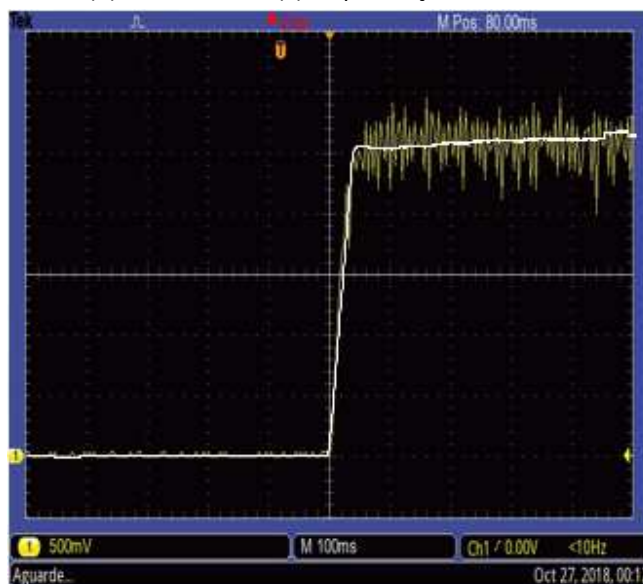
Figura 3 – Implementação prática do controle de velocidade do motor CC



Fonte: Autoria própria (2018).

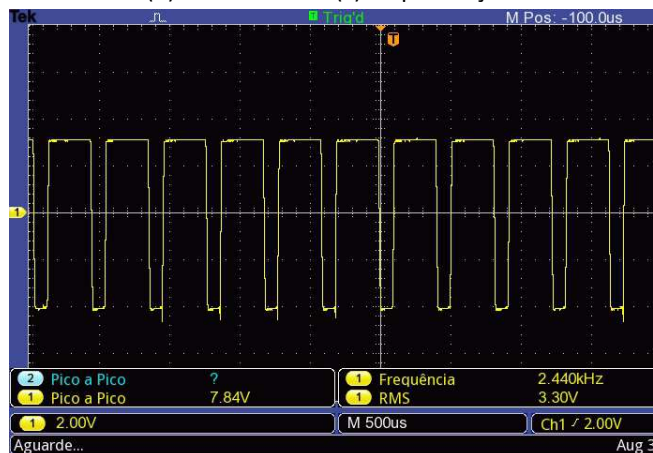
Considerando os resultados obtidos na Figura 4, observa-se que os principais sinais envolvidos no projeto da malha de realimentação foram suficientes para a operação da MCC. Além disso, nota-se que o sistema apresenta características de sistema de primeira ordem (vide Figura 4a), fato que motiva a implementação de controladores do tipo integral para a correção do erro de regime permanente.

Figura 4 – Comportamento temporal dos sinais, sendo (a) a resposta ao degrau (sinal amarelo) e após filtragem digital (sinal branco) obtidos pelo transdutor; tensão de armadura (b) na ausência e (c) na presença do diodo de roda livre

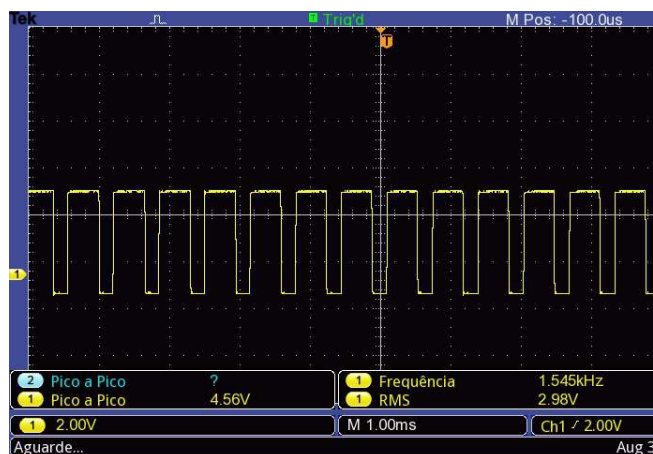


(a)

Figura 4 – (continuação) Comportamento temporal dos sinais, sendo (a) a resposta ao degrau (sinal amarelo) e após filtragem digital (sinal branco) obtidos pelo transdutor; tensão de armadura (b) na ausência e (c) na presença do diodo de roda livre



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria (2018).

## CONCLUSÃO

O projeto de IC alcançou os objetivos de prover um protótipo operando em malha fechada, no qual prezou-se pela combinação dos sinais modulante e portadora, em aplicações de controle de velocidade de motores CC de ímãs permanentes. Atualmente, o projeto está em fase de desenvolvimento da malha de controle analógica. Por conseguinte, após a finalização dos testes em matriz de contatos, uma placa de circuito impresso (do inglês, *Printed Circuit Board – PCB*) será produzida com a finalidade de estender as técnicas propostas em aplicações de MCCs utilizadas na indústria têxtil, por exemplo. As propostas futuras implicam no aprofundamento das pesquisas, seja em sistemas de controle (analógico e digital), seja em eletrônica de potência (implementação de outras classes mais sofisticadas de conversores CC-CC).

## REFERÊNCIAS

BARBI, I. **Eletrônica de Potência**. 5. Ed. Florianópolis: Ed. do Autor, 2005.



BRASIL, A. **Desperdício de energia custou mais de R\$ 60 bi para o Brasil nos últimos três anos.** Grupo Estadão. 2017. Disponível em: <https://economia.estadao.com.br/blogs/ecoando/desperdicio-de-energia-custou-mais-de-r-60-bi-para-o-brasil-nos-ultimos-tres-anos/>. Acesso em: 10 out. 2017.

COSTA, L. **Indústria começa 2017 com maior consumo de energia.** Revista Exame: Editora Abril 2017. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/economia/industria-comeca-2017-com-maior-consumo-de-energia/>. Acesso em: 10 out. 2017.

POMILIO, J. A. **Eletrônica de Potência.** Campinas: Ed. do Autor, 2014.

QUEIROZ, A. **Indústrias são maiores consumidores de energia no Brasil.** 2015 Disponível em: <https://www.ufg.br/n/85142-industrias-sao-maiores-consumidoras-de-energia-no-brasil>. Acesso em: 10 out. 2017.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Engenharia Elétrica e a Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UTFPR – Câmpus Apucarana, pelo apoio a esse trabalho.