



## INTERFACE GRÁFICA APLICADA AO CONTROLE DE VELOCIDADE DE UM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

**Carlos M. R. de Oliveira** – carlosmro@usp.br

**William C. de A. Pereira** – william.andrade@usp.br

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Elétrica.

Rua Trabalhador São-carlense, 400.

13566-590 – São Carlos – São Paulo

**Marcelo F. Castoldi** – marcastoldi@utfpr.edu.br

**Marcio A. F. Montezuma** – montezuma@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica.

Avenida Alberto Carazzai, 1640.

86300-000 – Cornélio Procópio – Paraná

**Resumo:** *Este trabalho propõe a criação de uma plataforma que possibilitará aos estudantes de cursos de graduação em engenharia elétrica compreender melhor a estratégia de controle de velocidade de um motor de corrente contínua de ímã permanente, utilizando uma interface de simulação amigável e, ao mesmo tempo, implementando fisicamente o acionamento. Neste contexto, os alunos poderão analisar e comparar os resultados obtidos em simulação com os resultados obtidos na prática, otimizando o processo de ensino-aprendizagem.*

**Palavras-chave:** *PMDC. Controle de Velocidade. Conversor CC-CC.*

### 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de técnicas pedagógicas que busquem facilitar o ensino e a aprendizagem se faz necessário nas diversas áreas do conhecimento humano (OLIVEIRA *et al.*, 2012). Em um curso de engenharia elétrica, a formação de um estudante envolve conhecimentos teóricos, construídos em sala de aula, e uma formação prática, construída por meio do trabalho com a montagem de circuitos, além da análise de diversos sistemas supervisórios. (SILVA, 2000).

A abordagem de técnicas de controle de processos aplicados no acionamento controlado de máquinas de corrente contínua é um campo bastante explorado pelas escolas de engenharia que encontram nesta aplicação a possibilidade de desenvolver experimentos de laboratório que refletem os conceitos teóricos associados a situações práticas do mundo real (PATANÉ, 2008).

A máquina de corrente contínua de ímã permanente (*Permanent Magnetic Direct Current* – PMDC) é, geralmente, a primeira abordagem de máquina de Corrente Contínua (CC) com a qual os alunos de graduação têm contato. Em função disso, este trabalho visa à compreensão, assim como uma estratégia de controle de velocidade para este tipo de máquina.

Para isso, uma plataforma virtual de ensaios é construída, onde o aluno pode alterar valores dos parâmetros do motor, além dos parâmetros dos controladores inseridos na malha de controle de velocidade. Desta forma, é possível observar a característica de funcionamento do motor operando segundo a lei de controle estabelecida, além de analisar o comportamento do motor de acordo com as alterações dos parâmetros dos controladores. Para verificar a validade da plataforma proposta, testes experimentais são realizados.

## 2. ANÁLISE DE UM PMDC

Uma vez que o PMDC possui o ímã permanente em seu circuito de campo, o fluxo de campo é considerado constante. Dessa maneira, assim como na máquina de corrente contínua com excitação independente, o torque torna-se proporcional a corrente de armadura, como descrito a seguir (KOSOW, 1982):

$$T_e = K_t \cdot I_a \quad (1)$$

sendo que  $K_t$  é a constante de torque,  $I_a$  é a corrente de armadura, respectivamente.

Por sua vez, a tensão aplicada no terminais do rotor, pode ser expressa como (KRISHNAN, 2001):

$$V_a = E_a + I_a \cdot R_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} \quad (2)$$

sendo que  $E_a$  é a força contra eletromotriz,  $R_a$  é a resistência de armadura,  $L_a$  é a indutância da bobina de armadura,  $\frac{dI_a}{dt}$  é a variação da corrente no tempo, respectivamente.

Considerando que o motor esteja operando em regime permanente (corrente constante), a velocidade do rotor é dada por (FITZGERALD *et al.*, 2006; KOSOW, 1982):

$$\omega_m = \frac{V_a - I_a \cdot R_a}{K_e} \quad (3)$$

sendo que  $K_e$  é a constante eletromotriz.

É importante analisar a equação da velocidade do PMDC, pois através dela é possível investigar quais as maneiras de se controlar a velocidade. Como a constante da força contra eletromotriz  $K_e$  depende de aspectos construtivos do motor, é possível obter o controle alterando a tensão aplicada na armadura do motor.

As equações descritas regem o comportamento da máquina, e para aplicar a teoria de controle no PMDC, é necessário escrever essas equações no domínio da frequência, criando assim o modelo para a função transferência do sistema em questão.

A função de transferência para um PMDC tendo como entrada a tensão aplicada na armadura  $V_a$  em volts e a saída velocidade  $\omega_m$  em rad/s, pode ser descrita como ilustrada pelo diagrama de blocos da Figura 1 (AGUIAR, 2010).

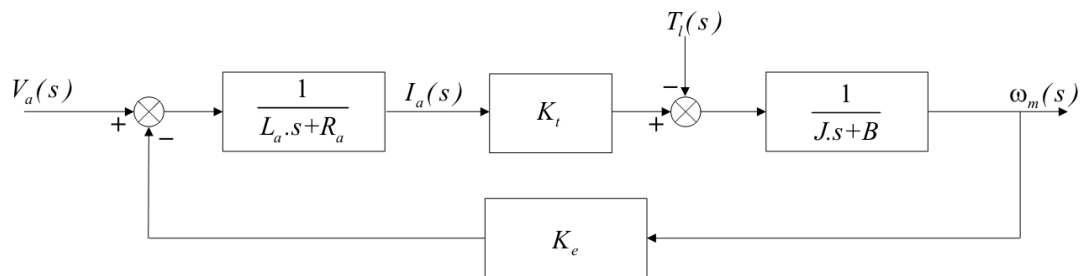


Figura 1. Diagrama de blocos do PMDC.

sendo que  $J$  é a constante de inercia e  $B$  o coeficiente de atrito viscoso.

Portanto, a expressão em malha fechada para o controle do PMDC, pode ser escrita no domínio da frequência, como segue (PATANÉ, 2008):

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{s^2 + \left(\frac{\tau_e + \tau_m}{\tau_e \cdot \tau_m}\right) \cdot s + \left(\frac{I + \frac{K_t \cdot K_e}{R_a \cdot B}}{\tau_e \cdot \tau_m}\right)} \quad (4)$$

sendo que  $\tau_m = \frac{J}{B}$  e  $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$ .

### 3. ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE VELOCIDADE

Em um sistema de controle com malha fechada, a saída do sistema é medida através de um transdutor e é comparada com o valor de referência (*set point*), gerando assim um erro. O controlador irá agir sobre o erro a fim de torna-lo zero. Assim o sistema se torna mais preciso e menos suscetível a perturbações externas.

Em grande parte das aplicações industriais utiliza-se o controlador conhecido como Proporcional-Integral (PI), devido principalmente a sua simplicidade, baixo esforço computacional e bom desempenho nas mais diversas aplicações (DORF, 2001).

A função transferência do controlador PI é dada por (OGATA, 2000):

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (5)$$

sendo que  $T_i$  é o tempo integrativo.

Para a implementação em aplicações práticas, é necessário representar o controlador PI em sua forma discreta. Dessa forma, aplicando a aproximação trapezoidal na parcela integrativa, resulta-se em:

$$s = \frac{2 \cdot (z - 1)}{T \cdot (1 + z)} \quad (6)$$

Substituindo (6) em (5) é encontrado a função de transferência:

$$G_{PI}(z) = K_p \left( 1 + \frac{T(1+z^{-1})}{2T_i(1-z^{-1})} \right) \quad (7)$$

sendo que  $T$  é o período de amostragem. Portanto, a seguinte equação de diferenças é formulada:

$$u[n] = u[n-1] + a(e[n] - e[n-1]) + \frac{b}{2}(e[n] + e[n-1]) \quad (8)$$

sendo que  $a = K_p$  e  $b = K_i \cdot T$ . Tendo o sinal de saída do controlador PI, é possível compará-lo com um sinal de referência. Este sinal é dado por uma função dente de serra.

A comparação destes sinais gera pulsos de onda quadrada, porém com a largura do pulso variada. Esta técnica é conhecida como PWM (*Pulse Width Modulation*) que atua diretamente no conversor CC-CC (*chopper*), realizando a conversão da tensão fixa (do barramento CC) para uma tensão contínua de saída variável. Como o *chopper* varia a tensão de armadura  $V_a$  a velocidade do PMDC é alterada.

## 4 PLATAFORMA VIRTUAL E VALIDAÇÃO

### 4.1 Plataforma Virtual

O *software* MATLAB/Simulink é utilizado para criação da plataforma virtual, contando com o *toolbox* GUIDE para criação da interface gráfica. O resultado pode ser visto na Figura 2, onde é possível visualizar os modos de simulação “malha aberta” e “malha fechada” disponíveis para o PMDC.

No painel “PARÂMETROS PMDC” é possível inserir os parâmetros do PMDC que será utilizado na simulação. A Tabela 1 mostra os parâmetros com as respectivas unidades que são inseridas na plataforma virtual.

Tabela 1. Parâmetros do PMDC utilizado.

Parâmetros do PMDC		
Resistência de armadura “ $R_a$ ”:	5,212536	[ $\Omega$ ]
Indutância de armadura “ $L_a$ ”:	5,212536	[mH]
Constante da força contra eletromotriz “ $K_e$ ”:	0,017	[V/(rad/s)]
Constante de torque “ $K_t$ ”:	0,017	[N.m/A]
Constante de inercia “ $J$ ”:	1,294152e-6	[Kg/m <sup>2</sup> ]
Coeficiente de atrito viscoso “ $B$ ”:	1,679063e-6	[N.m.s/rad]

No painel “MALHA ABERTA”, o usuário especificará o *duty cycle* do *chopper* que altera a velocidade do PMDC. Devem ser inseridos os parâmetros referentes à fonte de tensão, frequência de chaveamento, saturador, carga e ainda o sentido de giro. Os resultados podem

ser vistos pelo gráfico, sendo ilustrada a velocidade, tensão de armadura, corrente de armadura, torque, sinal dente de serra e os pulsos das chaves. Existe ainda o botão “Ilustração Malha Aberta” onde possibilita a visualização da Figura 3, onde demonstra a operação em malha aberta na simulação.

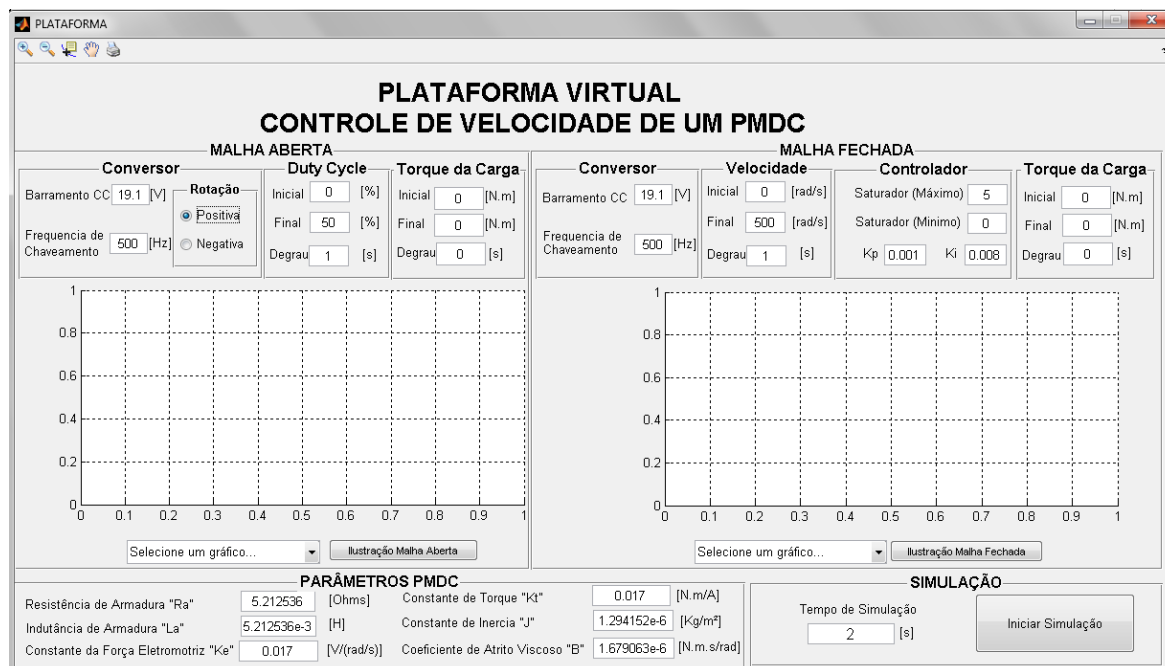


Figura 2. Interface Gráfica do programa.

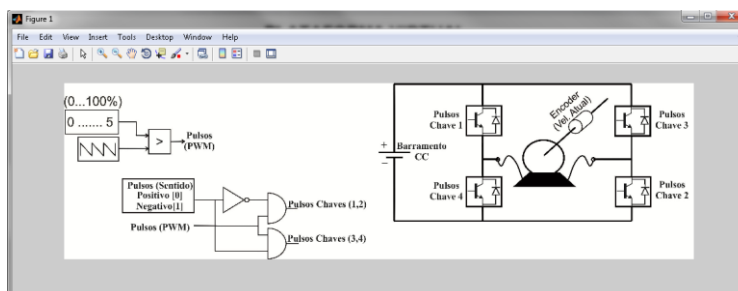


Figura 3. Ilustração malha aberta.

Por outro lado, em “MALHA FECHADA”, é necessário inserir os parâmetros referentes ao: conversor, ao controlador, ao torque na carga e ainda o *set point* de velocidade. No gráfico é possível visualizar os seguintes itens: velocidade, tensão de armadura, corrente de armadura, torque, saída do controlador PI, sinal dente de serra, pulsos das chaves 1 e 2 e pulsos das chaves 3 e 4. A Figura 4 mostra a imagem que é vista ao utilizar o botão “Ilustração Malha Fechada”, sendo uma ilustração do controle em questão.

Os parâmetros referentes ao torque mecânico podem ser inseridos nos campos relacionados ao “Torque de Carga”, com valores iniciais, finais e o instante de tempo. Tendo todos os parâmetros, basta inserir o tempo de simulação que o usuário desejar no painel “SIMULAÇÃO”.

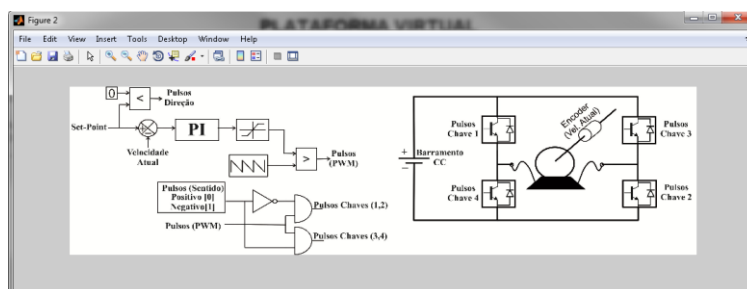


Figura 4. Ilustração malha fechada.

## 4.2 Validação

Inicialmente é realizada a aquisição das grandezas de tensão e corrente de armadura com o devido condicionamento de sinais, em seguida, são repassados ao sistema de aquisição e controle. De maneira similar, o *encoder* fixado no eixo do motor transmitirá os pulsos ao sistema de aquisição e controle.

A placa de aquisição utiliza os sinais adquiridos como sinais de realimentação e finaliza o controle transmitindo um sinal analógico ao microcontrolador. Este por sua vez, conclui o processo ao transmitir o sinal PWM ao conversor CC-CC. Após o recebimento dos pulsos, o *chopper* irá controlar a polaridade e a tensão média sobre o PMDC. Neste contexto foram utilizados: placa de aquisição de dados (MyDaq), um kit de instrumentação, conversor CC-CC, *software* LabVIEW<sup>®</sup>, microcontrolador (dspic30f2010), fonte simétrica e baterias como ilustrado na Figura 5.

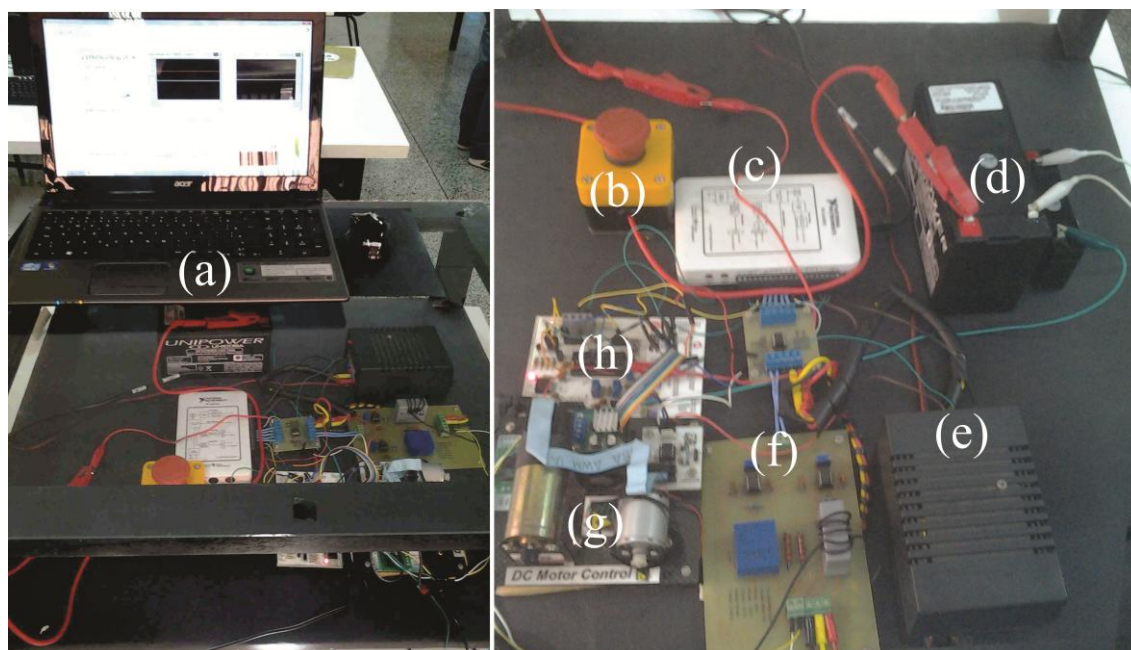


Figura 5. Plataforma real de ensaios, sendo (a) computador onde se tem o controle em tempo real com software LabVIEW<sup>®</sup>, (b) botão de emergência, (c) MyDaq, (d) baterias, (e) fonte simétrica, (f) placas para aquisição de tensão e corrente, (g) PMDC a ser controlado juntamente com o *chopper*, (h) dspic30f2010.

A utilização do programa LabVIEW<sup>®</sup> na implementação se deve ao fato deste possuir uma considerável facilidade em configurar o sistema todo, poder exportar os dados para análise em outros programas e, principalmente, por ser compatível com a MyDaq, tornando possível obter a comunicação em tempo real entre o *software* e a placa de aquisição.

A Figura 6 ilustra a interface gráfica desenvolvida no LabVIEW<sup>®</sup>, onde deve-se primeiramente regular os parâmetros do painel “CONFIGURAÇÕES”. Ao conectar a placa de aquisição no computador, automaticamente aparecem os parâmetros que podem ser configurados, como entradas e saídas, seja analógica ou digital.

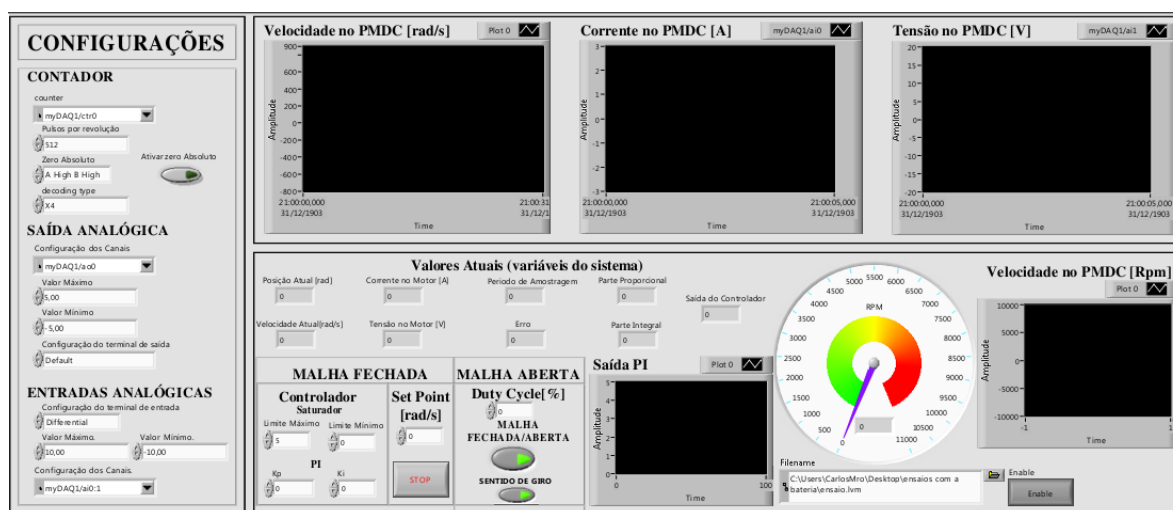


Figura 6. Interface Gráfica desenvolvida no LabVIEW<sup>®</sup>.

A seção “CONTADOR” é relacionada à configuração do contador da placa de aquisição, sendo necessário configurar o número de pulsos por revolução do encoder, zero absoluto e o tipo de decodificação.

Em “SAÍDA ANALÓGICA” e “ENTRADAS ANALÓGICAS” estão as configurações relacionadas com as portas analógicas da placa de aquisição, onde é necessário escolher quais portas serão utilizadas, valores de máximo e mínimo de tensão.

Assim como na interface gráfica de simulação no ambiente MATLAB<sup>®</sup>, a interface criada no LabVIEW<sup>®</sup> possui a opção de dois tipos de controle, em malha aberta e fechada. Para isto, basta utilizar o botão “MALHA FECHADA/ABERTA”.

No painel “MALHA FECHADA” é necessário inserir os parâmetros do controlador, como: limite máximo e mínimo do saturador, ganho proporcional e integral do PI e por fim o *set point*. Já no painel “MALHA ABERTA” deve ser inserido apenas o valor do *duty cycle* que será aplicado ao PMDC. Com todos os parâmetros estabelecidos, basta inicializar o programa.

#### 4. RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS

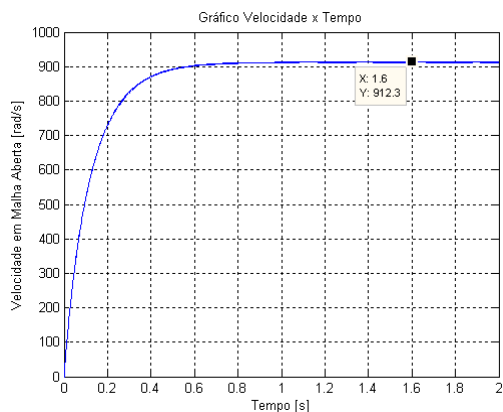
No motor CC a velocidade é proporcional à tensão inserida na armadura, entretanto quando é utilizado um conversor *chopper* para o acionamento, nem sempre o *duty cycle* do

acionamento gera a tensão requerida. Desta forma, a relação entre *duty cycle* e velocidade pode não ser proporcional. Na Figura 7 podem ser observados os resultados obtidos de duas simulações com *duty cycles* diferentes em malha aberta, para uma mesma tensão no barramento CC de 19,1 volts, além de uma frequência de chaveamento de 500 Hz para ambos os casos.

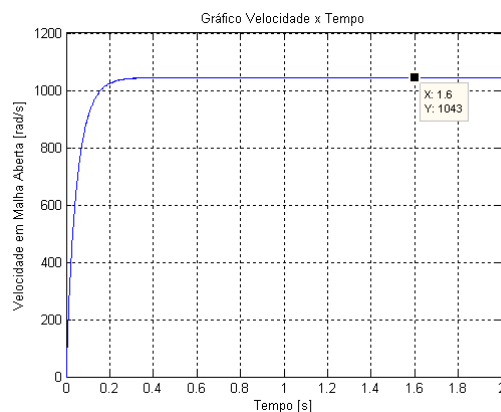
Na primeira simulação com 40%, o PMDC mostra uma velocidade próxima de 912,3 rad/s, já na segunda simulação com 80%, ou seja, o dobro de *duty cycle*, a velocidade ficou em 1043 rad/s mostrando assim que a variação da velocidade não foi proporcional.

Analisando os gráficos de tensão, nota-se um *offset* para ambas as simulações, mas sendo maior para o acionamento que possui um *duty cycle* de 80%. No gráfico da corrente, em ambas as simulações, a corrente chega ao valor zero durante o período de chaveamento, evidenciando que o PMDC utilizado neste projeto possui um indutor de valor baixo, fazendo com que o conversor opere de forma descontínua (BARBI & MARTINS, 2006).

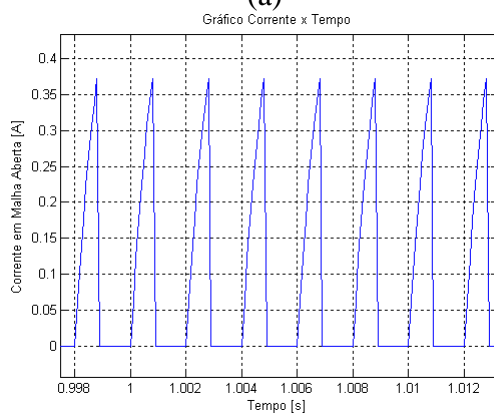
Nos gráficos dos pulsos das chaves é ilustrado a comparação do sinal de referência do *duty cycle* com a função dente de serra, gerando assim os pulsos nas chaves 1 e 2, ao contrário das chaves 3 e 4 que permanecem desligadas em ambos os casos. Desta forma, o gráfico enaltece um *duty cycle* de 40% na primeira simulação e de 80% na segunda simulação. O gráfico de torque será o mesmo da corrente, entretanto multiplicado por uma constante, dado em (1).



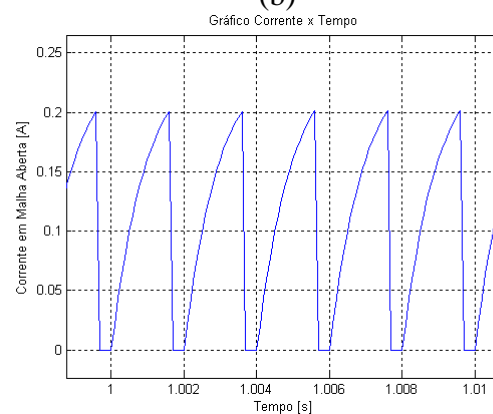
(a)



(b)



(d)



(e)



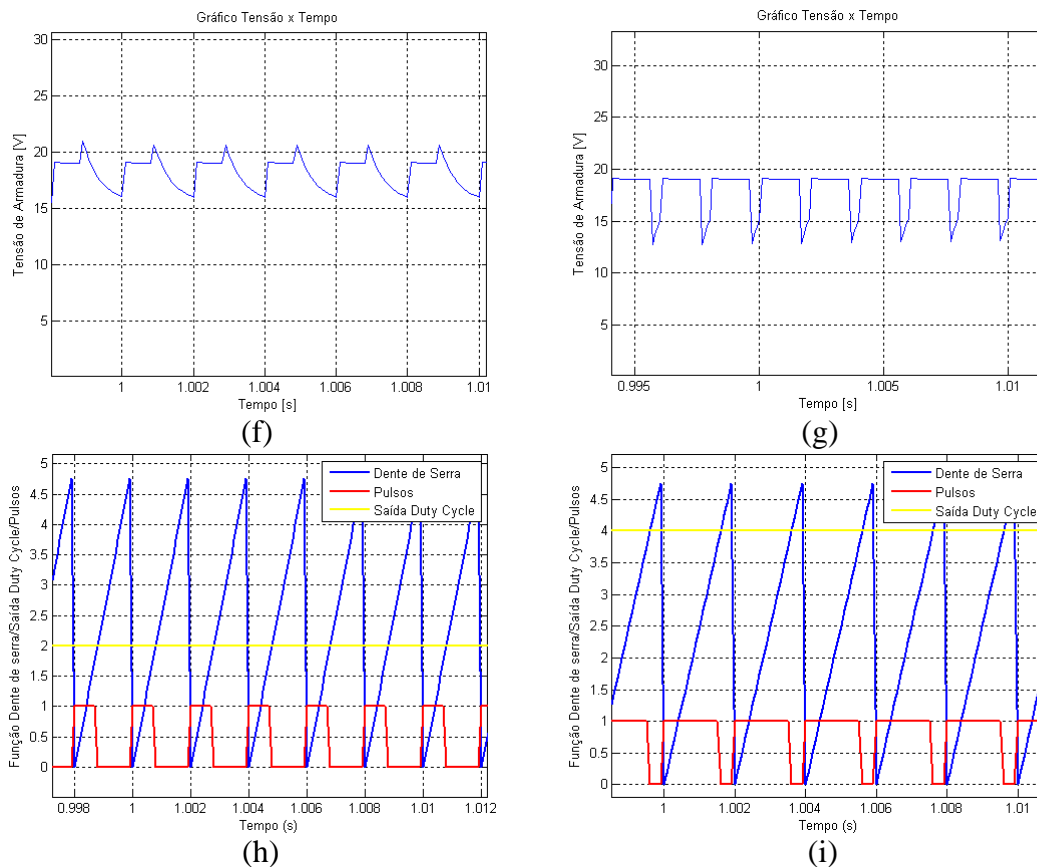


Figura 7. Resultados da simulação; (a) velocidade mecânica com *duty cycle* 40%; (b) velocidade mecânica com *duty cycle* 80%; (c) corrente com *duty cycle* 40%; (d) corrente com *duty cycle* 40%; (e) corrente com *duty cycle* 80%;(f) tensão com *duty cycle* 40%; (g) tensão com *duty cycle* 80%. (h) pulsos com *duty cycle* 40%; (i) pulsos com *duty cycle* 80%.

Ainda analisando a plataforma virtual, considera-se uma situação em que fosse necessário manter o PMDC a uma velocidade fixa de 900 rad/s. Neste contexto existem duas possibilidades para realização de tal controle, sendo a primeira evidenciada por um aumento gradativo do valor do *duty cycle* até o PMDC chegar à velocidade requisitada e a segunda pelo controle de velocidade em malha fechada. A Figura 8 mostra o resultado obtido na interface gráfica utilizando da situação citada acima. Para ambos os casos a tensão no barramento CC é de 19,1 volts e frequência de chaveamento de 500 Hz, assim como um valor degrau de carga igual a 0,008 N.m para o instante de 1 segundo. Os valores de  $K_p$  e  $K_i$  para o controle em malha fechada são de 0,003 e 0,05 respectivamente. Já o *duty cycle* em malha aberta permanece em 40%.

Nota-se que no instante de 1 segundo foi inserido um degrau de carga e no controle em malha aberta houve uma redução de velocidade considerável. Já em malha fechada, mesmo quando inserida a carga, o controle de velocidade foi efetivo.

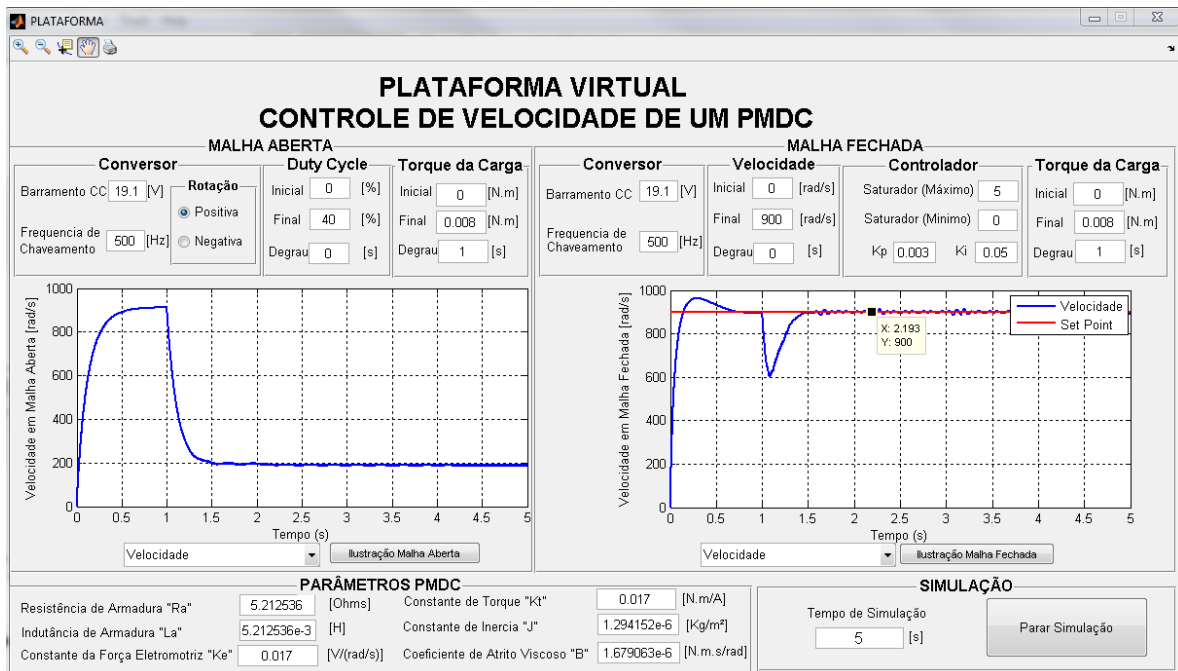


Figura 8. Simulação para comparação entre controle em malha aberta e controle em malha fechada.

Abstrai-se na Figura 9 os resultados da plataforma real no LabVIEW®, com o controle em tempo real para um *set-point* de 400 rad/s em malha fechada, tendo valores de  $K_p$  e  $K_i$  de 0,001 e 0,004 respectivamente.

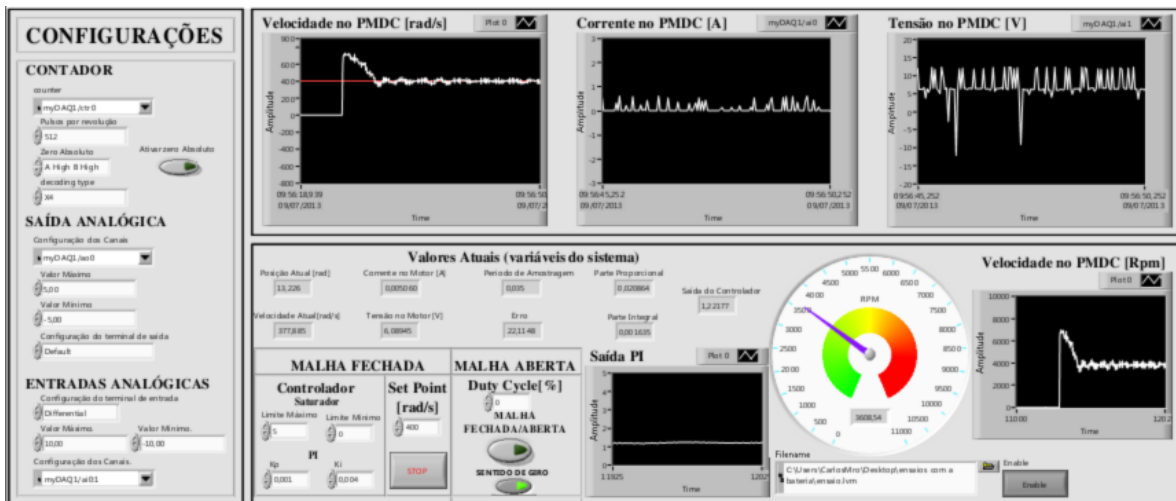


Figura 9. Forma com a qual são apresentados os resultados na interface gráfica LabVIEW®.

Para validação dos dados reais e simulados, é realizado um degrau de velocidade em malha fechada com o *set point* igual a 800 rad/s em ambos os casos, tendo  $K_p$  e  $K_i$  iguais a 0,05 e 0,02 respectivamente. A Figura 10 ilustra esta comparação.

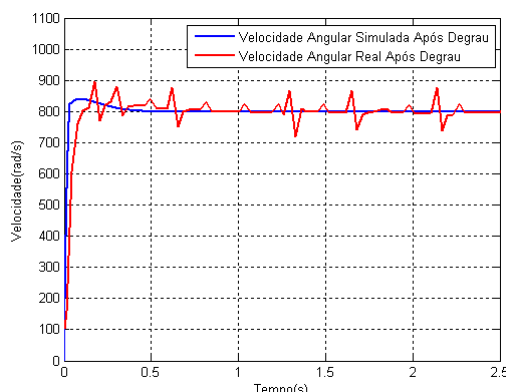


Figura 10. Comparação da velocidade simulada com a velocidade real.

O resultado da comparação sugere que em ambos os casos o controle de velocidade foi efetivo para esses ganhos do controlador, tendo ainda um tempo de resposta similar. A velocidade em regime permanente se manteve no valor estabelecido de 800 rad/s confirmando que a simulação ficou com valores próximos aos reais.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propõe uma plataforma virtual de ensaios para o controle de velocidade de um PMDC, onde se pode observar o funcionamento do motor assim como o conversor CC-CC, mostrando a importância da simulação como uma ferramenta de ensino-aprendizagem.

A utilização de uma plataforma virtual como meio de simulação e a posterior implementação da estratégia de controle adotada, se tornar uma boa opção para transformar as aulas de engenharia mais produtivas. Tais aulas seriam experimentais, nas quais os alunos têm a liberdade de realizar experiências sobre os assuntos abordados em aulas teóricas, comprovando a validade do assunto abordado.

Nesta linha, este trabalho visou uma maior interação dos alunos com a estratégia de controle de velocidade de um motor PMDC. Através da interface gráfica de simulação, a qual se apresenta de forma amigável, o estudante pode alterar os dados do motor simulado, além dos parâmetros dos controladores utilizados. Posteriormente, o aluno pode inserir os dados relativos aos controladores em um sistema real e comparar a resposta do sistema simulado com a do sistema real, avaliando a validade da simulação.

O uso de experiências simples e com gradativo grau de dificuldade possibilita um aprendizado mais dinâmico, pois, a cada nova experiência, o estudante tem a oportunidade de utilizar os conhecimentos das atividades anteriores, além de entrar em contato com novas informações (SILVA, 2000).

A aprendizagem e o desenvolvimento de novas competências são processos distintos, mas muito relacionados. É a aprendizagem que impulsiona o desenvolvimento, que novamente impulsiona uma nova aprendizagem. Portanto, oferecer aos alunos de graduação uma plataforma virtual para simular e, simultaneamente, uma plataforma real para analisar e validar os resultados do estudo implementando, ter-se-á uma contribuição significativa para melhorar o processo de ensino-aprendizagem dos alunos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. L.; OLIVEIRA, V. A.; LOCATTI, A. R.; DOMINGUES, C. Laboratórios de controle usando o ambiente tempo real do MATLAB para cursos de graduação. DINCON'10 9<sup>th</sup> Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications. 2010.

BARBI, I.; MARTINS, D. C.; Eletrônica de potência: conversores CC-CC básicos não isolados. 2. ed. Florianópolis. 2006.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. Sistemas de Controle Modernos. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2001.

FITZGERALD, A. E; JUNIOR C. K; UMANS S. D. Máquinas Elétricas: com introdução à eletrônica de potência. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

KOSOW, I. L. Máquinas elétricas e transformadores. 1. ed. Porto Alegre:Globo, 1982.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 3. ed. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: LTC, 2000.

OLIVEIRA, J. C.; PINTO, V. P.; ALBUQUERQUE, H. F.; ALMEIDA, R. N. C.; CORREIA, B. W. Desenvolvimento de práticas de laboratório de controle dinâmico utilizando o LabVIEW<sup>®</sup>. Belém, Pará: Cobenge 2012. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2000/artigos/216.PDF>> Acesso em:: 15 fev. 2013.

PATANÉ, E. J. Implementação de controle de velocidade em malha fechada para motores de corrente contínua utilizando sistema de aquisição de dados. 2008. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Engenharia de Mauá, Universidade do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2008.

SILVA, A. P. D. Kit didático para ensino de microcontroladores. Ouro Preto, Minas Gerais: Cobenge 2000. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2000/artigos/216.PDF>> Acesso em:: 15 fev. 2013.

## GRAPHICAL INTERFACE APPLIED TO THE SPEED CONTROL OF A DIRECT CURRENT MOTOR

**Abstract:** *This paper proposes the creation of a platform that will enable students of undergraduate courses in electrical engineering better understand the strategy of speed control of a permanent magnet direct current, creating a simulation interface friendly and at the same time, implementing physically drive. In this context, students will analyze and will compare the results of the simulations with the results obtained in experimental tests, optimizing the process of learning.*

**Key-words:** *PMDC. Speed Control. DC-DC Converter.*