

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA VIRTUAIS APLICADOS NAS AULAS LABORATORIAIS DE CONTROLE DE SISTEMAS

Renan L. P. de Medeiros – renan_landau@hotmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica

Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá

CEP 66075-110 – Belém – Pará

Ivanês L. C. de Araújo – ivanes.araujo@yahoo.com.br

Victor S. de Freitas – victorfreitas89@yahoo.com.br

Orlando F. Silva – orfosi@ufpa.br

***Resumo:** O intuito deste trabalho é desenvolver e aplicar um método de ensino para a engenharia constituído pela modelagem de um motor corrente contínua utilizando software MATLAB, a fim de projetar uma ação de controle para alterar a posição partindo-se do deslocamento angular fornecido por um usuário. Para atingir este objetivo, foi construído um motor virtual no próprio ambiente de simulação, elaborado um plano de aula contendo um roteiro de experiências e uma aula explanatória. O método foi aplicado nas aulas Laboratoriais de Controle de Sistemas abrangeu referenciais teóricos, e atividades propostas pelo roteiro com o objetivo de auxiliar o processo de ensino-aprendizagem em engenharia. Os resultados foram tanto as simulações do motor CC quanto a coleta de dados a partir de questionários respondidos pelos estudantes, obtendo gráficos que mostraram o desempenho e a eficiência do método.*

***Palavras-chave:** Motor de corrente contínua, MATLAB, Laboratório de Controle de Sistemas*

1. INTRODUÇÃO

O motor de corrente contínua possui as mesmas funções dos outros motores que são encontrados no mercado, porém são mais aplicados em acionamentos de cargas, com a finalidade de movimentá-la através de um torque mecânico. Este motor é constituído por um rotor (parte girante) e por um estator (parte estática) que são acoplados magneticamente. O motor CC é modelado matematicamente através de sua tensão de armadura que energizará as espiras produzindo um campo magnético invariante no tempo devido sua corrente ser contínua.

A modelagem matemática desses tipos de motores é um fator de real importância considerando a busca do melhor desempenho, o tornando satisfatório para a aplicação nas dinâmicas de projetos. Além das equações dinâmicas para o controle, tem-se também uma implementação computacional desses sistemas, e com o desenvolvimento dessas ferramentas, são atribuídos a possibilidade para o estudo e aprimoramento de novas técnicas de modelagens.

A utilização de plataformas didáticas e outros recursos tecnológicos, que auxiliem o processo ensino-aprendizado, estão se tornando comuns no ensino de graduação nas áreas da engenharia. Este trabalho visa aplicar os conhecimentos em modelagem, simulação, controle e programação no ambiente *MATLAB*, para criar uma animação do movimento de rotação do eixo de um motor CC em três dimensões, controlado por tensão de armadura e, permitindo também a visualização de seu comportamento através de gráficos temporais originados da ação de controle.

2. MODELOS MATEMÁTICOS E FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Um sistema é definido como uma montagem de componentes atuando como um todo, caracterizados por parâmetros que tem por finalidade, no caso da engenharia, a aplicabilidade para a resolução de uma situação-problema. Esses parâmetros de tais componentes são definidos de acordo com suas propriedades físicas, e para representá-los são utilizadas ferramentas matemáticas, formando os modelos matemáticos.

O modelo matemático de um sistema é criado a partir de leis físicas respeitando o comportamento do sistema, que pode ser analisado a partir de uma certa excitação, chamada de sinal de entrada do sistema. Este comportamento que é originado é chamado de resposta do sistema. No domínio da frequência, a razão desta resposta pela sua entrada é denominada função de transferência do sistema.

Para a obtenção da função de transferência do motor CC é necessário a análise de seu funcionamento e do modelo matemático que descreverá seu comportamento. Os componentes significativos de um motor de corrente contínua excitado separadamente são modelados como mostra a Figura 1. A armadura é modelada como tendo uma resistência constante R_a em série com uma indutância L_a , representando a indutância do enrolamento da armadura, e uma fonte de tensão V_g representando a tensão gerada na armadura.

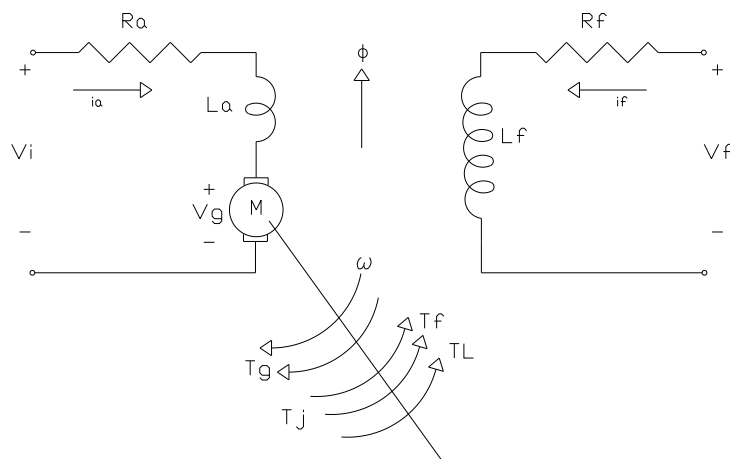


Figura 1 – Modelo de um motor de corrente contínua excitado separadamente.

Escrevendo a equação de malha de tensão de armadura, obtemos a Equação (1)

$$V_i = R_a * i_a(t) + L_a * \frac{dia(t)}{dt} + V_g(t) \quad (1)$$

Aplicando Transformada de Laplace na Equação (1), obtêm-se a Equação (2). Levando em consideração outras leis físicas que regem o sistema obtêm-se as Equações (3), (4) e (5).

$$V_i(s) - V_g(s) = (R_a + sL_a)I(s) \quad (2)$$

$$V_i(t) = K_e \Omega(s) \quad (3)$$

$$T_g(s) = K_t I_a(s) \quad (4)$$

$$T_g(s) - T_f(s)T_L(s) = (B + sj)\Omega(s) \quad (5)$$

Associando a equação obtida (2) com outras equações (3), (4) e (5) de torque e tensão gerada na armadura, obtemos a seguinte função de transferência, mostrada na Equação (6)

$$G_V(s) = \frac{K_t}{R_a B(1 + \tau_e s)(1 + \tau_m s) + K_t K_e} ; \quad \begin{aligned} \tau_e &= \frac{L_a}{R_a} = \text{constante de tempo elétrica} \\ \tau_m &= \frac{J}{B} = \text{constante de tempo mecânica.} \end{aligned} \quad (6)$$

Se a indutância de armadura é muito pequena, a constante de tempo elétrica pode ser desprezada frente a constante de tempo mecânica, obtendo a seguinte função de transferência mostrada na Equação (7):

$$G_V(s) = \frac{K_m}{\tau s + 1} \quad (7)$$

3. MATLAB COMO FERRAMENTA DE ENSINO

Reverendo os conceitos teóricos, a obtenção da função de transferência do motor CC envolve vários cálculos matemáticos e que fazem necessário o uso de ferramentas computacionais que possam auxiliar na resolução destes cálculos. O MATLAB é um ambiente computacional que é capaz de realizar cálculos a partir de linhas de comando e/ou blocos de funções, e também representações gráficas que tornam a análise da resposta de um sistema mais simples, como o descrito com o motor CC.

3.1. Análise da resposta em malha fechada utilizando um controle proporcional

A resposta do motor CC a uma determinada entrada, utilizando um controle proporcional, pode ser manipulada de forma a atender algumas exigências relacionadas ao controle do sistema. Considerando um motor CC controlado por um controle proporcional, a intenção é obter certo deslocamento angular a partir de uma tensão aplicada no motor. Porém, o sistema em malha aberta não pode fazer a identificação da taxa de erro na resposta e corrigi-la. Logo, para uma melhor resposta do sistema, é preferível que o mesmo seja em malha fechada, para que haja a identificação do erro a fim de diminuí-lo, gerando um sinal de saída mais próximo do valor do sinal de referência.

3.2. Criação de sólidos no ambiente MATLAB

Para a representação do motor CC como um sólido, deve-se levar em consideração que o mesmo é constituído por uma infinidade de pontos. No entanto, considerando-se objetos de formas praticamente regulares, é possível representar um sólido por uma quantidade pequena de pontos, desde que sejam em quantidades suficientes para definir o formato do objeto (BOSCO,1988). Portanto, para reproduzir um motor CC tomam-se pontos definidos que, ligados entre si, tenham a mesma forma que a sua.

Possuindo uma representação sólida, é preciso que a mesma possa girar, tendo em vista que o motor CC é constituído por uma parte girante (Rotor). Para que haja movimento rotacional o conjunto de pontos que constituem o sólido, deve passar por um giro de ponto a ponto a partir da multiplicação matricial destes pontos por uma matriz de rotação. Esta última é uma matriz que ao ser multiplicada por um vetor altera a sua direção, sempre em função de um ângulo θ , que determinará quantos graus este vetor rotará.

3.3. Coordenadas Homogêneas

Devido à utilização da matriz de rotação, para a facilidade de tratamento algébrico é preferível a representação dos pontos do sólido em coordenadas homogêneas. Por definição, um ponto representado no sistema de coordenadas cartesiano por (x,y,z) , pode ser representado pela matriz H , em coordenadas homogêneas, visto na Equação (8):

$$H = \begin{bmatrix} q \\ p \\ k \\ w \end{bmatrix}; \begin{matrix} x = q/w \\ y = p/w \\ z = k/w \end{matrix} \quad (8)$$

Onde w é um fator de escala real.

4. METODOLOGIA

Para a formação da modelagem de um motor de corrente contínua e simulação do sistema, foi utilizado o ambiente MATLAB. O processo de desenvolvimento da construção do programa se deu em duas etapas: uma com a construção do sólido que representa um motor,

apresentando uma animação constituída por um corpo sólido, uma haste que faz referência ao eixo do motor, e um círculo que representa uma placa engastada no eixo, e marcada com uma linha com o objetivo de auxiliar a interface do programa com o usuário com intuito de uma melhor percepção do deslocamento angular; e a outra etapa consistia na criação de um *script* descrevendo o modelo matemático que represente o motor CC, no domínio tempo, utilizando espaços de estados, e a resposta deste sistema foi dada a partir de um sinal de entrada como referência (degrau unitário).

A etapa seguinte do trabalho se procedeu em uma aula explanatória na disciplina Laboratório de Controle de Sistemas do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, e esta tinha como objetivo a simulação de um motor de corrente contínua, utilizando o ambiente MATLAB, e com auxílio da ilustração do deslocamento angular para que o discente formasse uma habilidade de percepção da transformação dos sistemas físicos em simulados computacionalmente. A classe contém um professor responsável e 21 alunos matriculados, onde todos participaram da atividade.

Além da ferramenta computacional, foi elaborado um roteiro para especificar os procedimentos da experiência, e este possui um embasamento teórico, expondo resumidamente o funcionamento do motor de corrente contínua, o modelo eletromecânico, e o controle de posição de um motor CC utilizando um controle proporcional; e no final do roteiro, possuía a parte experimental, com questões para serem realizadas no ambiente MATLAB, utilizando linhas de comando e o Simulink, para simular um motor CC, a partir de uma função de transferência de primeira e segunda ordem, e produzir as respostas do sistema em relação ao deslocamento angular do motor, tanto em malha aberta quanto em fechada, e também para questões de análise qualitativa das respostas obtidas.

Como ferramenta para a coleta de dados foi utilizado o questionário, aplicado no final das atividades da aula, com perguntas para respostas de itens sim-não e livres, onde os alunos poderiam colocar suas opiniões sobre o conteúdo ministrado. Os dados foram submetidos a uma análise qualitativa e quantitativa, e colocados em formas de gráficos para uma melhor visualização dos mesmos.

5. RESULTADOS

5.1. Resultados da simulação em ambiente MATLAB

A construção do motor CC virtual, dada em ambiente *MATLAB* por linhas de comando, foi feita a partir da criação de um sólido no intuito representativo, como é mostrado da Figura 2, podendo modificar o ângulo de visualização como queira o usuário, onde se observa o corpo sólido (preenchido com diversas cores), o eixo (na cor marrom), e a placa (circunferência sem preenchimento), onde nesta última, apresenta uma linha que é ligada de um ponto ao seu centro para a identificação da rotação do motor.

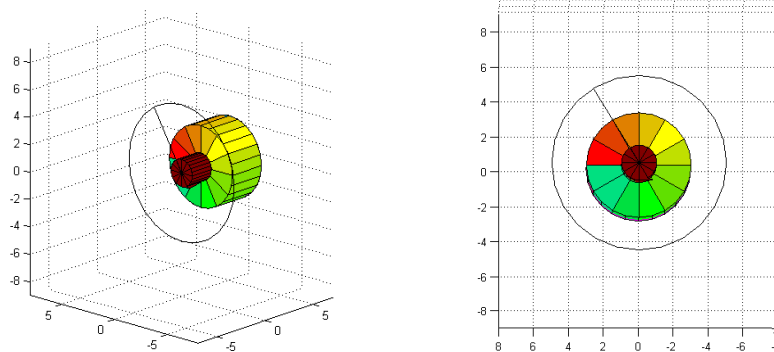


Figura 2 – Representação virtual do motor CC com visualização de dois ângulos diferentes.

Para a produção do giro e controle do motor, foi produzido um script para a construção de um controlador, em espaços de estados, utilizando a realimentação de estado, resultando no comportamento do motor CC, dado o degrau unitário como sinal de referência. O script produz uma interatividade com o usuário através de uma interface amigável, utilizando como base, o programa MATLAB, e na mesma é requerido o ângulo desejado para o deslocamento do motor CC. Na simulação, além do motor virtual, visualiza-se um plano contendo duas respostas, que são descritas na Figura 3, onde a ação de controle gera um erro que é minimizado com a correção da velocidade do motor tendo a finalidade de atingir o deslocamento requerido, analisando o gráfico percebemos que o erro de regime permanente da posição angular é igual a zero, enquanto que a velocidade tende a zero quando a posição angular é atingida.

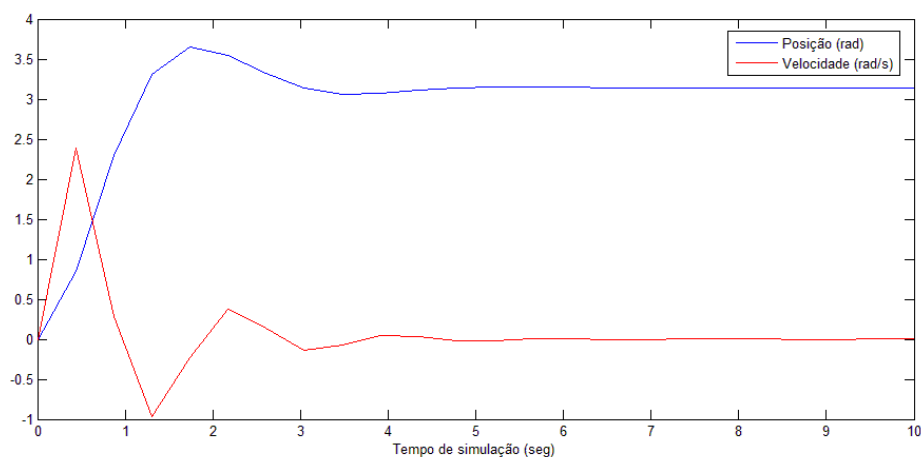


Figura 3 – Comportamento do sistema: Posição e velocidade do motor

5.2. Aplicação didática e atividades propostas

A metodologia foi aplicada em uma turma de Engenharia Elétrica como atividade da disciplina Laboratório de Controle de Sistemas. Na aula explanatória foi destacada a importância da produção do modelo matemático a partir de um sistema físico e da simulação de um sistema de tal forma que se possa tomar conhecimento do comportamento do mesmo em várias situações possíveis, e que se objetiva o melhor método para se obter o desempenho necessário e, conseqüentemente, garantir a diminuição de erros (COSTA, 2002).

O roteiro do experimento complementou a metodologia aplicada, contendo atividades propostas, que foram baseadas na aula explanatória, para a simulação da função de transferência de um motor CC para averiguar a resposta do sistema para um sinal de controle que deslocasse o motor em uma determinada angulação, e podendo ser visualizada na representação virtual do mesmo. Nestas atividades, foi requisitado que os alunos processassem simulações ampliando o grau de dificuldade, utilizando linhas de comando para malha aberta e o diagrama de blocos do Simulink para malha fechada. Primeiramente, foi simulada uma planta de primeira ordem, Equação (7), na qual se despreza as constantes de tempo elétrica resultando em uma aproximação da planta de segunda ordem, Equação (6). E após, foi simulada a planta de segunda ordem, agora com a presença das constantes de tempo elétrica e mecânica, que simulam a resistência e o atrito viscoso do motor CC. Nesta atividade houve um bom índice de acertos por partes dos alunos, que mostraram bom desempenho nas simulações realizadas.

5.3. Análise dos questionários

Nos questionários propostos, os dados foram coletados e expostos em gráficos. As perguntas tinham o objetivo de verificar as opiniões dos alunos sobre as habilidades adquiridas nas disciplinas de Controle de Sistemas, assim como a compreensão dos mesmos no que condizem com as simulações realizadas nas atividades propostas da aula explanatória.

A primeira pergunta, sobre a afinidade com a disciplina de Laboratório de Sistemas e Controle, mostrou que 82,82%, dos alunos possuem afinidade com a disciplina, Figura 4(a), pois nesta são apresentados tópicos de simulações utilizando o MATLAB que podem ser empregadas em várias vertentes da Engenharia Elétrica, e não somente para aquelas que tratam sobre controle e automação, onde 72,72% dos alunos disseram que as simulações facilitam a compreensão dos assuntos ou acham as mesmas interessante, como mostra a Figura 4 (b).

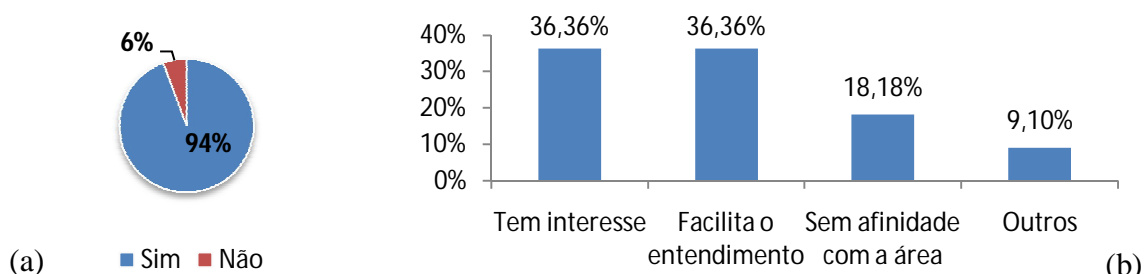


Figura 4 – (a) Afinidade dos alunos com a disciplina e (b) justificativa dos mesmos

A segunda pergunta fez referência sobre a operação do script criado, buscando obter opiniões sobre a simulação do motor CC, e observou-se que 95,45% dos alunos não apresentaram nenhum tipo de dificuldade para operar o programa, e que 77,27% dos mesmos alegaram facilidade no uso devido ao conhecimento da teoria de controle, das ferramentas do MATLAB e/ou da interface representativa do motor CC, e esta distribuição das respostas pode ser visualizada na Figura 5.

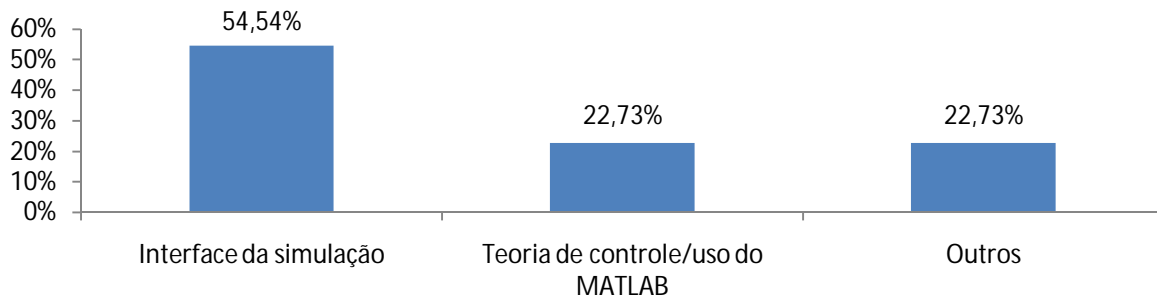


Figura 5 – Facilidades da operação da Simulação do motor CC

Sobre as dificuldades de relacionar o embasamento teórico do motor CC com o sistema simulado verificou-se que 68,18% dos alunos não apresentaram dificuldades de realizar esta relação, Figura 6, devido às explicações colocadas com clareza.

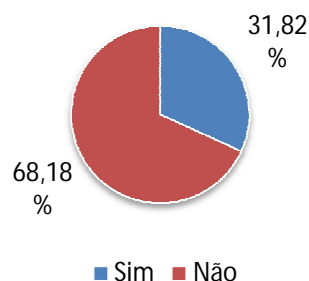


Figura 6 – Resultado do questionamento teórico-prático

Sobre a metodologia aplicada, envolvendo as ferramentas empregadas, todos os alunos acharam que as explicações, simulações do motor CC e as atividades propostas atingiram os objetivos do plano de aula, assim como acharam que estas ações ajudaram a complementar os conceitos teóricos e práticos da disciplina, e que suas opiniões e a quantificação percentual de cada uma podem ser visualizadas na Figura 7.

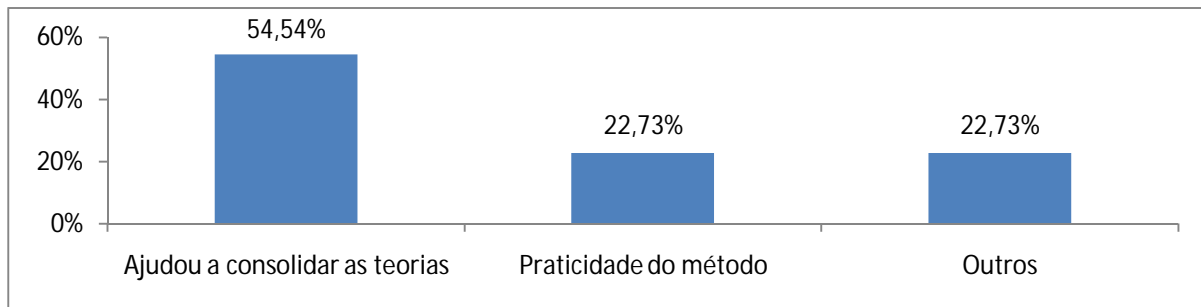


Figura 7 – Opinião dos alunos sobre a aplicação da metodologia

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos das simulações através dos gráficos temporais e da ajuda da interface visual que a animação proporciona, pode tornar os estudos de análise de sistemas de controle mais acessível. Utilizando tal auxílio visual, e dos resultados obtidos na aplicação da metodologia de ensino, constatou-se uma fácil compreensão os artifícios de simulação de sistemas, e da influência da disposição em malha aberta e fechada como ação de controle sobre uma planta. Desta forma concluí-se que tais resultados são satisfatórios quando executados para fins didáticos e tantos os passos para a simulação quanto os métodos do plano de aula podem ser aplicados em outros estudos como no caso dos sistemas não-lineares Ball-Beam e na construção de um robô com três graus de liberdade.

REFERÊNCIAS / CITAÇÕES

ALVES, João Bosco M.. Controle de Robô. In: Transformação Homogênea, Campinas. Ed:Cartgraf, 1988. p.9-23

BAZANELLA, A.; SILVA JR., J. **Sistemas de Controle, Princípios e Métodos de Projeto, dos autores**. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

CAD, Marcelo Machado. UNIVERSIDADE DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS. Departamento de engenharia elétrica. Estratégias de modelagem dinâmica e simulação computacional do motor de indução trifásico, 2000. 171p, II. Dissertação (Mestrado).

COSTA, Miguel A. Bueno da. Introdução à simulação. Disponível em: <http://www.simucad.dep.ufscar.br/dn_sim_doc01.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2011.

GOEDEL, Alessandro, *et al.* Uma abordagem neural para estimativa de conjugado em motores de indução. **Revista Controle & Automação**, São Paulo, v.17, n.3, p. 364-380, 2006.

OGATA, K. Engenharia de controle moderno. In: Modelagem matemática de sistemas dinâmicos, São Paulo: Ed: Pearson Prentice Hall, 2003. P. 45 – 123.

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF VIRTUAL DC MOTORS APPLIED IN LESSONS OF LABORATORY OF CONTROL AND SYSTEMS

Abstract: *This paper is developed and implemented a teaching method for engineering consists in modeling a DC motor using MATLAB software with the aim of projecting a control action to change the position starting from the angular displacement provided by a user. For viewing, a virtual engine was built in the same simulation environment. The method was applied in class of Laboratory of Control and Systems, using a lesson plan containing theoretical, using the DC motor and virtual simulation systems in order to assist the process of teaching and learning in engineering. The results were both simulations the DC motor in collecting data from questionnaires answered by students, obtaining graphs that show the performance and efficiency of the method.*

Key-words: *DC motor, MATLAB, Control Systems Laboratory*