



## MÓDULOS DIDÁTICOS DE BAIXO CUSTO PARA SIMULAÇÃO ANALÓGICA NO ENSINO DE TEORIA DE CONTROLE

**Primeiro Autor – e-mail\***

Instituição de Ensino, Faculdade ou Departamento\*

Endereço \*

CEP – Cidade – Estado\*

**Segundo Autor – e-mail\***

Instituição de Ensino, Faculdade ou Departamento\*

Endereço\*

CEP – Cidade – Estado\*

**Terceiro Autor – e-mail\***

Instituição de Ensino, Faculdade ou Departamento\*

Endereço\*

CEP – Cidade – Estado\*

\* Omitir os nomes/dados dos autores na versão de revisão. Apenas na versão final aceitas tais informações serão inseridas.

**Resumo:** Este trabalho vem no intuito de amenizar a carência de um laboratório de sistemas de controle na Fundação Universidade Federal de Rondônia. As disciplinas de controle fazem parte da grade curricular do curso de engenharia elétrica e são de grande valor para os futuros profissionais. Objetivando driblar a falta de estrutura e também auxiliar os estudantes a se apropriarem do conhecimento, foram desenvolvidos três tipos de módulos eletrônicos com os quais se pode realizar simulações analógicas utilizando os aparatos do laboratório de eletrônica da universidade. Os módulos simulam plantas de primeira, segunda e terceira ordem e permitem que os estudantes tenham um contato mais prático com a teoria de controle, avaliando o comportamento das plantas e projetando compensadores para melhorar seu desempenho.

**Palavras-chave:** Módulo Didático, Teoria de Controle, Simulação Analógica, Baixo Custo.

### 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho surge de uma parceria entre a Monitoria Acadêmica de Controle e a Monitoria Acadêmica de Eletrônica do curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Fundação Universidade Federal de Rondônia (UNIR), no intuito de viabilizar aulas práticas para os discentes das disciplinas de Controle I e Controle II.

A

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



Promoção



Associação Brasileira de Educação em Engenharia



universidade ainda não possui um laboratório didático para sistemas de controle, de modo que as disciplinas acabam sendo ministradas apenas no campo teórico com aulas expositivas e algum suporte de simulações computacionais. Para suprir a carência de atividades práticas desenvolveram-se módulos didáticos para simulação analógica de plantas de primeiro estudo de seu comportamento e o projeto de compensadores para atingir determinados critérios de desempenho.

Rosito (ROSITO, 2009) define experimento como um ensaio científico que tem por finalidade comprovar um fenômeno físico, implicando em um teste, uma comprovação daquilo que foi estudado na teoria. É sabido que as atividades práticas em laboratório tem papel fundamental no aprendizado, proporcionando um contato direto com o fenômeno estudado auxiliando o discente a se apropriar da teoria, permitindo um contraste com a abstração científica, familiarizando-o com instrumentos e técnicas e capacitando-o a um raciocínio prático concernente ao tópico estudado.

Por sua vez, a possibilidade de simular as discussões que foram feitas em sala de aula, faz aflorar um senso crítico nos acadêmicos, portanto, a capacidade de propor novas soluções para determinados problemas é estimulada. Segundo Almeida (ALMEIDA 2003) o ensino, com base num modelo de ensino-aprendizagem calçado na simples transmissão-recepção de conhecimentos, ou seja, de maneira acrítica, não satisfaz exigências das novas demandas sociais e tecnológicas do mundo moderno.

Pérez (PÉREZ, 1999) defende, ainda, a integração cada vez mais forte da prática com a teoria, no ensino, devido aos benefícios que as atividades experimentais proporcionam. Estes benefícios são desejáveis num curso de engenharia, que segundo o Dicionário Michaelis (MICHAELIS, 1998) é a arte de aplicar os saberes científicos à invenção, aperfeiçoamento ou utilização da técnica industrial em todas as suas determinações, de maneira que as atividades práticas são sempre bem vindas para proporcionar uma formação aprimorada dos futuros profissionais de engenharia.

O estudo da teoria de controle compõe uma parte do programa dos cursos de engenharia elétrica, sendo abordada com maior ou menor profundidade em diferentes ementas. Essa disciplina da engenharia estuda os sistemas, suas respostas a estímulos e, principalmente, busca métodos de escolher os estímulos adequados para que se obtenha uma resposta desejada.

A importância destas disciplinas para o engenheiro rondoniense são percebidas quando se tem em vista que a teoria de controle possui diversas aplicações nos principais campos de atuação que o profissional deve encontrar no mercado de Rondônia. No proeminente setor de sistemas elétricos de potência, seja na geração, na transmissão ou na distribuição, existem diversos problemas de rastreamento, regulação ou estabilidade a serem considerados. Além disso, o estado, tendo forte caráter agropecuário, grande produtor de laticínios, carne e grãos, tem algumas indústrias de abrangência regional que tendem a crescer. Nesse sentido, a demanda por engenheiros capacitados na área de controle deve aumentar e, enquanto ainda não há um curso de engenharia de automação e controle na região, espera-se que os graduados em engenharia elétrica supram essa demanda, de modo que é interessante um bom aproveitamento dos alunos nas disciplinas de controle, não apenas pelo próprio sucesso profissional, mas pelo desenvolvimento de Rondônia.

Este trabalho objetivou desenvolver módulos didáticos de baixo custo para o ensino de sistemas de controle, vindo suprir uma carência do bacharelado em engenharia elétrica da UNIR, o qual não tem um laboratório de sistemas de controle. Com estes

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



Promoção





módulos, aproveitando os recursos disponíveis do Laboratório de Circuitos Elétricos e Eletrônica, é possível proporcionar aos discentes uma oportunidade de visualizar na prática os tópicos de teoria abordados em sala.

Anais do COBENGE 2017 serão publicados incluindo a versão completa de todos os trabalhos apresentados no evento. É, portanto, extremamente importante que o preparo da versão digital de sua contribuição esteja de acordo com estas instruções.

Os Coordenadores de Área, designados pelo Comitê Científico do COBENGE 2017, terão à sua disposição cópias eletrônicas de cada trabalho no sistema do evento, para a sua correspondente revisão por especialistas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram desenvolvidos três módulos diferentes, um representando uma planta de primeira ordem, outro representando uma planta de segunda ordem e outro uma planta de terceira ordem realimentada e com ganho tal que ela alcançasse uma condição de instabilidade. Cada uma das plantas foi implementada analogicamente fazendo uso de amplificadores operacionais, resistores e capacitores, embora a ideia seja que o aluno, ao realizar o experimento, abstraia a composição da planta e a encare como uma planta genérica, caracterizada por uma função de transferência. Nas atividades de laboratório, o discente deve fazer uso, além do módulo didático, de uma fonte de alimentação dupla de  $\pm 12$  V, um gerador de função e um osciloscópio, além da matriz de contato na qual pode montar circuitos adicionais para implementar os compensadores desejados.

A planta de primeira ordem sem zeros, composta por um polo localizado no lado esquerdo do plano  $s$ , representada pela função de transferência:

$$G_1(s) = \frac{20}{s + 20} \quad (1)$$

Com uma constante de tempo de 0,02 s. Sendo assim, seu tempo de subida é 0,11 s e o tempo de acomodação é de 0,2s.

Figura 1: Módulo "Planta de Primeira Ordem".



O circuito foi implementado com o uso de um integrador prático, cuja função de transferência é:

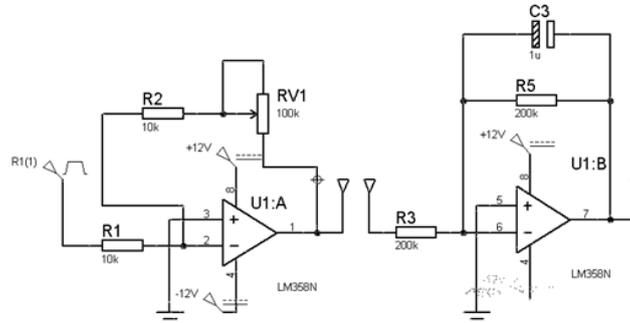
$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{-1/R_i C}{s + 1/R_f C} \quad (2)$$

Para o qual se escolhe os valores dos resistores  $R_i$  e  $R_f$  de 50 k $\Omega$  e o capacitor de 1  $\mu$ F. O módulo conta ainda com um amplificador inversor de ganho variando entre -1 e -51, que pode ser conectado em série com o integrador. O ganho ajustável é obtido



através de um potenciômetro de 500 kΩ em série com um resistor de 10 kΩ no laço da realimentação negativa do amplificador.

Figura 2: Circuito da Planta de Primeira Ordem.



A planta de segunda ordem é uma planta com dois polos no lado esquerdo do plano s, ambos sobre o eixo real, mas não coincidentes, caracterizando um sistema superamortecido. Ela é descrita pela função de transferência:

$$G_2(s) = \frac{5000}{(s + 50)(s + 100)} \quad (3)$$

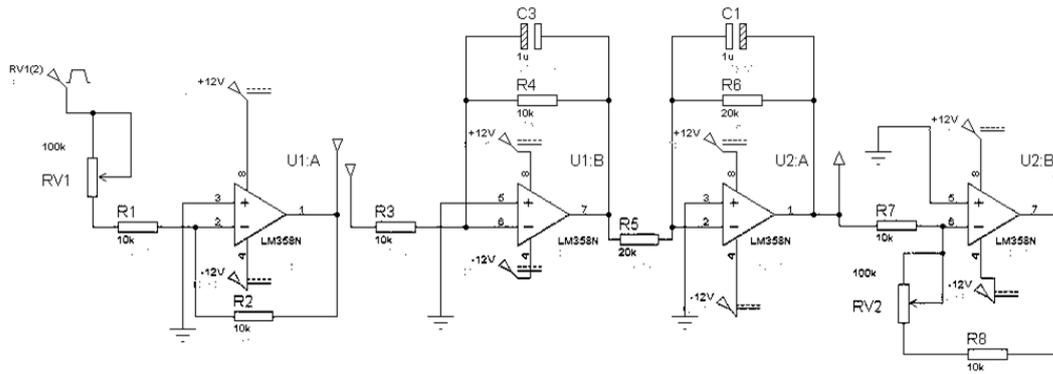
O que coloca a planta tendo uma frequência natural de 70,711 rad/s e um fator de amortecimento de 1,061. O circuito foi implementado com dois integradores práticos, um deles com dois resistores  $R_i$  e  $R_f$  de 10 kΩ e o capacitor de 1 µF e outro com  $R_i$  e  $R_f$  no valor de 20 kΩ e o capacitor de 1 µF.

Um dos objetivos deste módulo é viabilizar um experimento em que o aluno veja que ao realimentar e aumentar o ganho do sistema ele passa de superamortecido para criticamente amortecido e então para subamortecido, quando os polos deixam a reta real e ingressam na parte complexa do plano s. Com uma alimentação dupla de ±12 V supondo uma entrada de 1 V de amplitude, os amplificadores acabariam saturando para ganhos não tão grandes. Por isso inclui-se um amplificador inversor com ganho variando entre -0,1 e 1 para ser conectado logo após a referência e outro amplificador inversor com ganho indo de -1 até -10, o qual deve ficar fora da malha de realimentação. Deste modo, reduz-se a amplitude da referência e franqueia-se o emprego de ganhos mais elevados no laço de realimentação, permitindo que os polos do sistema distanciem-se ainda mais do eixo real. O ganho na saída da malha fechada compatibiliza, novamente, o nível de tensão da saída com o da entrada.

Figura 3: Módulo "Planta de Segunda Ordem".



Figura 4: Circuito da Planta de Segunda Ordem.



A planta de terceira ordem possui três polos e é realimentada e provida com um ganho na realimentação que faz com que um par de polos atravesse para o lado direito do plano  $s$ , fazendo com que o sistema fique instável. A função de transferência em malha aberta equivalente é:

$$G_3(s) = \frac{20000000}{s^3 + 565s^2 + 33500s + 20500000} \quad (4)$$

Cujas raízes da equação característica são  $-569,40$  e  $2,20 \pm 189,73j$ , comprovando a instabilidade do sistema. Essa função de transferência é obtida realimentando negativamente o circuito que é descrito por:

$$\frac{V_i(s)}{V_o(s)} = \frac{40 \cdot 25 \cdot 40 \cdot 500}{(s + 25)(s + 40)(s + 500)} \quad (5)$$

Obtido associando em cascata três integradores práticos com polos em  $-25$ ,  $-40$  e  $-500$ , além de um amplificador inversor com ganho  $-40$ . O circuito é dotado, à semelhança do de segunda ordem, de dois amplificadores inversores fora da malha de realimentação.

A elaboração dos circuitos eletrônicos que compõem as plantas para a simulação analógica foi realizada primando pela simplicidade e pelo uso de componentes que já estivessem disponíveis. Os amplificadores operacionais utilizados foram todos LM358 da Texas Instruments, os quais são amplificadores duplos internamente compensados. Os resistores são de  $0,25$  W, em filme de carbono, e nos valores de  $10$  k $\Omega$  e  $100$  k $\Omega$ , sendo valores diferentes destes obtidos através de associações. Os capacitores são predominantemente eletrolíticos de  $1$   $\mu$ F,  $63$ V, sendo valores diferentes obtidos através de associação, exceto por um de  $0,1$   $\mu$ F, empregado na planta de terceira ordem para conseguir o polo em  $-500$ . Os ajustes dos ganhos variáveis nos módulos são feito com potenciômetros lineares de  $100$  k $\Omega$  ou de  $500$  k $\Omega$ . Para facilitar a interface com matrizes de contatos ou placas de prototipagem os módulos são dotados de borneiras onde se pode ligar os conectores simplesmente apertando ou afrouxando os parafusos.

As placas de circuito impresso foram feitas pelo método de transferência térmica do desenho impresso à laser no papel fotográfico para a placa de fenolite cobreado de uma ou duas faces, conforme a planta.

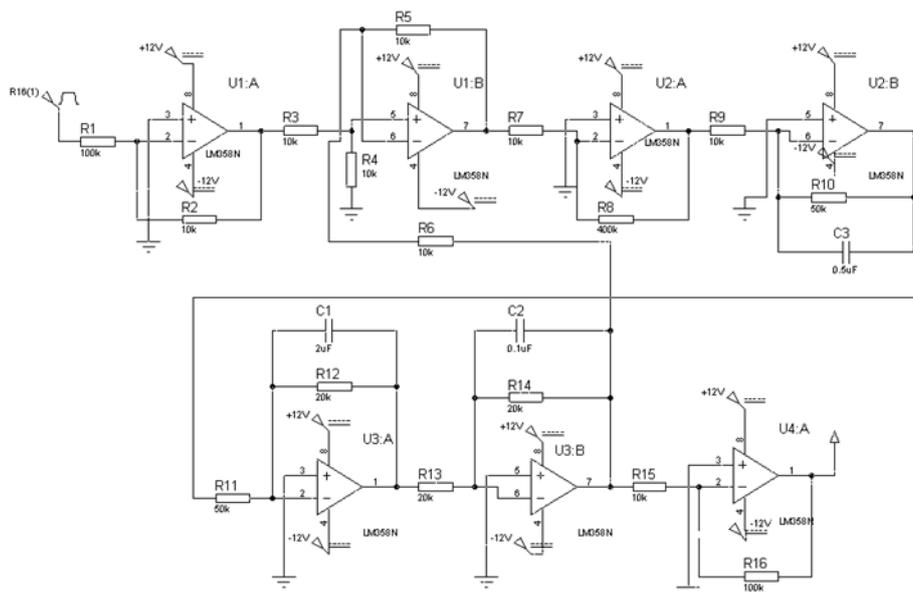
Figura 5: Circuito da Planta de Terceira Ordem.

Organização



Promoção



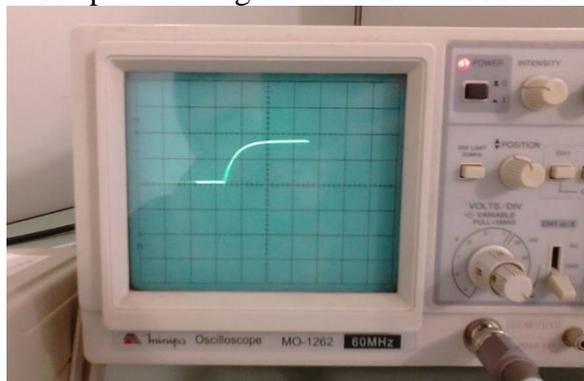


Nas bancadas do Laboratório de Circuitos Elétricos e Eletrônica estão disponíveis fontes de alimentação variáveis Instrutherm FA-3030, Osciloscópios analógicos Minipa MO-1262 e geradores de função ICEL Manaus GV-2002, os quais devem ser usados em conjunto com os módulos didáticos nas aulas práticas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A planta de primeira ordem pode ser usada para demonstrar muitos aspectos ligados com este tipo de sistema. Conectando-se o módulo ao gerador de função que gere onda quadrada é possível ver, no osciloscópio, a resposta da planta a uma entrada em degrau e então mensurar tempo de subida, tempo de acomodação, constante de tempo e comparar com o calculado. O discente pode também realimentar a planta e apreciar, por exemplo, o efeito obtido ao se aumentar gradualmente o ganho, novamente contrastando o resultado prático com aquele fornecido por cálculos e simulações. Fazendo isso, o aluno verificará, por exemplo, que um controlador P gera um erro finito em regime permanente, estimulando o discente a testar um controlador PI. Esta realimentação e os controladores adicionais devem ser feitos usando componentes eletrônicos adicionais e montando o circuito em uma matriz de contatos.

Figura 6: Resposta ao degrau da Planta de Primeira Ordem.



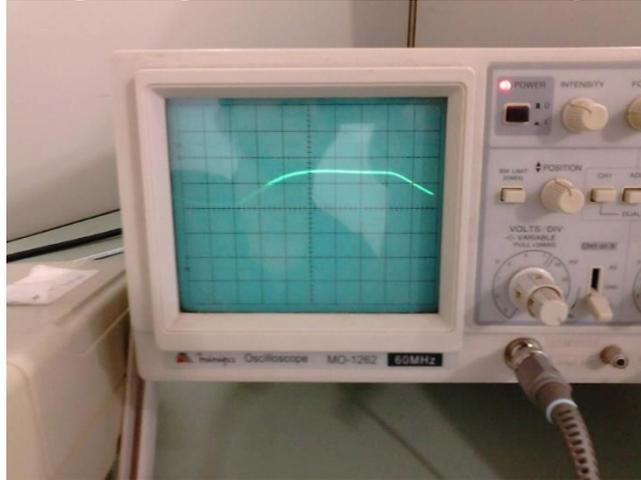
Na figura 6 vê-se a resposta ao degrau da planta de primeira ordem, obtida usando-



gerador de função para colocar uma onda quadrada de 5 Hz e 1V de amplitude na entrada.

A planta de segunda ordem, quando realimentada e em cascata com um controlador proporcional, permite observar o comportamento do sistema causado pela localização de seus polos. Conforme se aumenta o ganho o sistema passará de sobreamortecido para criticamente amortecido e então subamortecido. A figura 7 mostra a resposta do sistema em uma condição superamortecida.

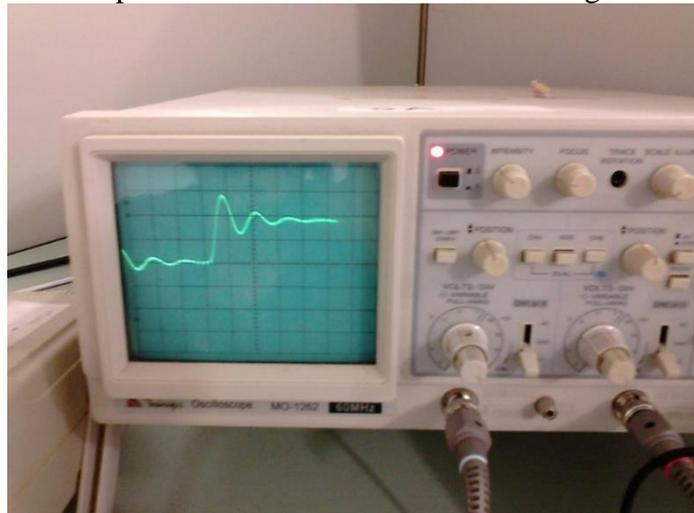
Figura 7: Resposta superamortecida da Planta de Segunda Ordem.



A condição de subamortecimento é especialmente interessante por permitir avaliar diversos parâmetros de desempenho no domínio do tempo, tais como sobressinal percentual, tempo de subida, tempo de pico, tempo de acomodação e erro em regime permanente e como é necessário, ao se aplicar um compensador do tipo P, fazer um compromisso entre esses parâmetros para obter o desempenho desejado.

Na figura 8 vê-se a planta já realimentada com um ganho de modo a garantir uma resposta mais rápida porém causando sobressinal.

Figura 8: Resposta subamortecida da Planta de Segunda Ordem.



#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Organização



Promoção





Com estes módulos proporciona-se um recurso adicional para o ensino de teoria de controle, permitindo que os discentes possam ir para a bancada e desempenhar uma atividade prática que consolide o conhecimento aprendido e permita ao estudante explorar diversas técnicas e topologias para projeto de compensadores. A atividade prática, desempenhada em grupo, ainda tem o valor de estimular o trabalho em equipe, a criatividade e a organização. As plantas de primeira e segunda ordem são úteis para a visualização dos conceitos trabalhados na disciplina, enquanto a planta de terceira ordem propõe uma atividade que estimula a capacidade de resolução de problemas. A construção dos módulos didáticos de baixo custo mostra-se como um paliativo para a falta de estrutura da universidade, fazendo uso das estruturas e recursos disponíveis e melhorando a qualidade do ensino das disciplinas de controle.

### ***Agradecimentos***

Agradecemos a todos que possibilitaram o desenvolvimento desse trabalho.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ALMEIDA, Norton de. Ensino de Engenharia sobre Bases Construtivistas: Um Estudo de Caso na Disciplina de Laboratório de Sistemas Térmicos. 2003. Doutorado em Educação – Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- COELHO, Antônio A. R.; COELHO, Leandro dos S. Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.
- FREGOSI, Alberto Eduardo; FEINSTEIN, Jaime; CALDEIRA, Laércio. Enfoque Clássico da Teoria de Controle Volume 1: Fundamentos do Enfoque e Método da Resposta em Frequência. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, Eletrobrás, EFEI, 1980. p. 294.
- \_\_\_\_\_. Enfoque Clássico da Teoria de Controle Volume 2: Método do Lugar das Raízes. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, Eletrobrás, EFEI, 1980. p. 233.
- GIL PÉREZ, D. et al. Tiene sentido seguir distinguendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz e papel y realización de prácticas de laboratorio? In: Enseñanza de las Ciencias, v. 17, n. 2, p. 311-320, 1999.
- MANCINI, Ron; PALMER, Richard. Op Amps for Everyone. Dallas: Texas Instruments, 2008.
- NISE, Norman S. Control Systems Engineering. 6ª ed. Jefferson City: John Wiley & Sons, Inc., 2011. p. 948.
- OGATA, Katsuhiko. Modern Control Engineering. 1ª ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1970. p. 836.
- PEKELMAN, Helio; MELLO Jr., Antônio G. A Importância dos Laboratórios no Ensino de Engenharia Mecânica. Anais: COBENGE 2004. Brasília, UNB, 2004.
- MICHAELIS: Moderno Dicionário da Língua Portuguesa. São Paulo: Companhia Melhoramentos, 1998. 2259p.
- ROSITO, Berenice Alvares; O Ensino das Ciências e a Experimentação in Construtivismo e Ensino das Ciências 3ª Edição. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2008.
- TEXAS INSTRUMENTS. LM158/LM258/LM358/LM2904 Low Power Dual

Organização



Promoção





Operational Amplifiers. Dallas: Texas Instruments, 2014

## **EDUCATIONAL LOW COST MODULES FOR ANALOG SIMULATION IN CONTROL THEORY TEACHING**

**Abstract:** *This work presents a project which was developed in order to mitigate the lack of a controls systems laboratory at the Federal University of Rondônia. Control is part of most electrical engineering curricula and the knowledge acquired when taking this course is valuable to the future professional. Aiming to overcome the shortage of structure and also help the students to grasp the theory, three types of electronic modules were developed. These modules can be used to simulate analogically first, second and third order plants, allowing the students to have a more practical view of the control theory, assessing the behavior of the plants and designing compensators to improve their performance.*

**Key-words:** *Educational Module, Control Theory, Analog Simulation, Low Cost.*

Organização



Promoção

