



## DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO LABORATORIAL PARA EDUCAÇÃO EM CONTROLE DE PROCESSOS MIMO BASEADA EM FOSS

**Francisco J. Gomes** – chico.gomes@ufjf.edu.br

Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Engenharia Elétrica.

Rua José Lourenço Kelmer, s/n – Campus Universitário.

36036-900 – Juiz de Fora, Minas Gerais.

**Lais A. Vitoi** – lais.vitoi@engenharia.ufjf.br

**Igor L. de Paula** – igor.lima@engenharia.ufjf.br

***Resumo:** A contínua melhoria nos processos de produção torna cada vez mais exigente a tarefa de projetar e sintonizar os controladores automáticos. Atualmente, a maioria destes controladores é construída com base em métodos que relevam a existência de múltiplas entradas e múltiplas saídas nos sistemas. O controle multimalhas, necessário à maioria dos sistemas, é tratado neste trabalho, cujo objetivo é disseminar conhecimento acerca deste tema didaticamente e imersivamente. O que é feito através de um módulo laboratorial em conjunto com um software em que o aprendiz tem acesso ao conteúdo teórico ao mesmo tempo em que o coloca em prática de maneira guiada ou livremente. Tanto o software quanto o módulo são de baixo custo, sendo o primeiro desenvolvido em Free and Open Source Software (FOSS).*

***Palavras-chave:** Controle MIMO, educação em engenharia, Plataforma Educacional, Free and Open Software (FOSS)*

### 1. INTRODUÇÃO

Os processos industriais têm sofrido diversas mudanças de mercado nas últimas décadas, principalmente devido à busca por qualidade e eficiência em seus processos produtivos. (CASILLO 2009). No atual panorama de mercado, competitivo e baseado em inovações, as empresas se diferenciam na sua produtividade, eficiência na produção e qualidade dos produtos. E estes fatores estão diretamente relacionados com o controle dos processos industriais. Uma malha industrial controlada adequadamente ocasiona melhorias fundamentais, como aumentos da estabilidade e margem de ganho, redução do consumo energético, resposta e estabilização mais rápidas, maximização das taxas de produção e minimização de impactos ambientais.

Realização:



Organização:





Atualmente a grande maioria dos processos industriais é controlada por PID's (BOLTON,1995). Estes são conhecidos como sistemas SISO (*single input, single output*), ou seja, tem apenas uma variável controlada e uma variável manipulada. Porém, na prática a maioria dos processos possuem inúmeras variáveis a serem controladas e inúmeras variáveis que podem ser manipuladas, este tipo de sistema é conhecido como MIMO (*multiple input, multiple output*).

Tendo em vista o acima descrito, existe a necessidade de qualificar os estudantes a lidarem com os processos MIMO, tendo capacidade de controlá-los adequadamente. Aliando-se ao fato da engenharia ser uma profissão prática, "hands on", onde anteriormente à ênfase na componente científica, a maior parte da formação do engenheiro ocorre nos laboratórios (FEISEL & ROSA, 2005). Desenvolveu-se um módulo laboratorial de baixo custo, incluindo um ambiente computacional interativo e bastante didático no qual o aluno pode estar em contato com conteúdo teórico, ao mesmo tempo em que observam o desempenho de uma planta real sob diversas ações de controle. O ambiente foi desenvolvido totalmente em FOSS, particularmente em linguagem Java. Os softwares de código aberto surgiram como uma solução viável, tanto para o meio acadêmico quanto industrial, mediante a necessidade de um equilíbrio entre recursos econômicos e necessidades aplicacionais. Entre suas vantagens pode-se destacar: (LAKHAN, S.E & JHUNJHUNWALA, K., 2008 )

- A ausência de uma taxa de licença, implicando em grande economia para as universidades e empresas;
- Flexibilidade, novos recursos e ferramentas podem ser importados da comunidade Open Source;
- Melhorias contínuas, programadores de diferentes instituições e organizações, juntamente com voluntários, contribuem livremente para os projetos.
- Benefícios fiscais, governos de diversos países têm implementado políticas de isenção fiscal para impulsionar projetos de código aberto.

Optou-se pela linguagem Java devido à possibilidade de um mesmo software ser executado em diversos sistemas operacionais sob uma mesma compilação, não sendo necessário reescrever ou recompilá-lo para que este esteja disponível em outras plataformas, o que é de grande valia para universidades e empresas.

O artigo está estruturado como segue: a seção 2 apresenta o modelo matemático implementado no projeto, a seção 3 trata do desenvolvimento do ambiente e hardware utilizados; os resultados e conclusões, na seção 4, encerram o trabalho.

## **2. MODELAGEM MATEMÁTICA**

Nos processos que envolvem múltiplas variáveis de entrada e saída o controle não é tão trivial, já que a mudança em uma variável influencia nas outras. Em casos como este, pode-se utilizar o controle multimalha, em que cada malha do sistema é controlada



independentemente por um controlador de entrada única e saída única (TORRES. ET AL.). A determinação da matriz Matriz de Ganhos Relativos (RGA – RelativeGainArray) é o primeiro passo para definirmos a estratégia de controle a ser adotada em um sistema multimalha (SHINSKEY, 1996). Com ela definimos o grau de dependência entre as variáveis de entrada e saída e assim estabelecer o melhor emparelhamento de variáveis.

A matriz de ganhos, geralmente representada por  $\Lambda$ , tem o seguinte formato:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} & \dots & \Lambda_{1n} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} & \dots & \Lambda_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Lambda_{n1} & \Lambda_{n2} & \dots & \Lambda_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde cada termo  $\lambda_{ij}$  é calculado da seguinte forma:

$$\Lambda_{ij} = K_{ij} * H_{ij} \quad (2)$$

Sendo  $K_{ij}$  o ganho em regime permanente entre  $C_i$ , a variável de controle,  $M_j$ , a variável manipulada, e  $H_{ij}$  o elemento  $(i, j)$  de  $H = (K^{-1})^T$ . Os elementos  $\lambda_{ij}$  são dados pelo produto, termo a termo, das matrizes  $K$  e  $H$ .

O ganho  $K_{ij}$  é dado por:

$$K_{ij} = \frac{\Delta C_i}{t_j * \Delta M_j} \quad (3)$$

Onde  $t_j$  é o tempo em que vamos provocar uma pequena alteração na variável manipulada  $M_j$ .

Com o emparelhamento entre as variáveis manipuladas e controladas é possível realizar o controle das malhas. Se os requisitos de desempenho do sistema não forem extremos, o uso de controladores PID pode garantir bons resultados, uma vez que estes são robustos e de fácil implementação (TORRES ET AL.). Entre os motivos da utilização de estratégias convencionais de controle pode-se mencionar: a simplicidade, a robustez, o número reduzido de parâmetros a serem configurados, os conhecimentos intuitivos sobre o desempenho destas estratégias de controle e um requerimento mínimo de conhecimento matemático e técnico (COELHO, 2001).

Foi adotado o método clássico de Ziegler-Nichols para obtenção dos parâmetros de PID. O método de Ziegler-Nichols é baseado na resposta do processo a uma excitação em degrau (1º método de Ziegler-Nichols) e regra de sintonia baseada no ganho crítico  $K_{crítico}$  e no período crítico  $P_{crítico}$  (ZIEGLER & NICHOLS, 1942).



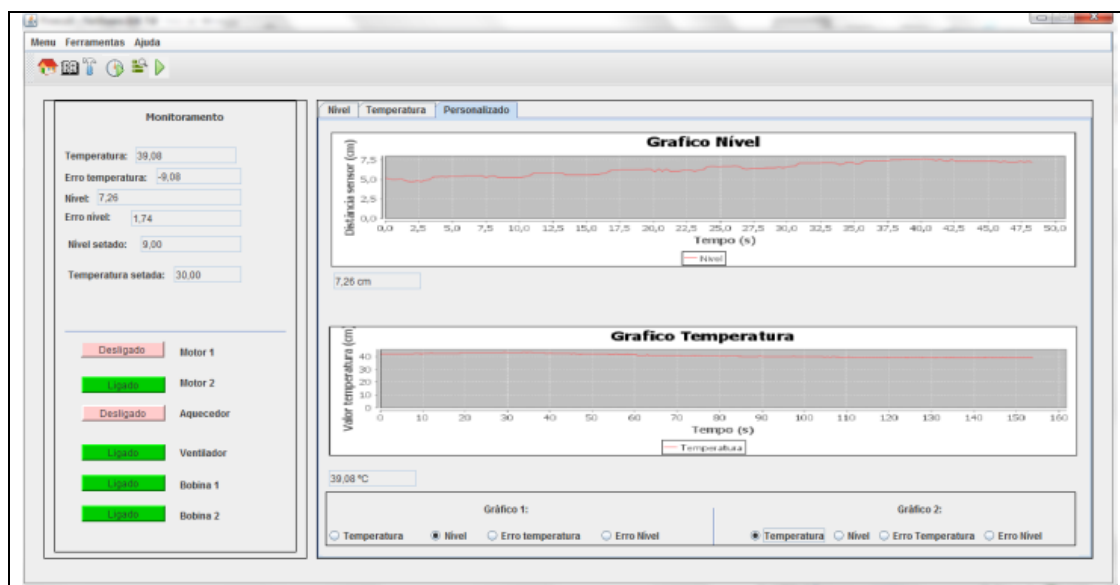
### 3. DESENVOLVIMENTO

#### 3.1. Ambiente digital

Buscou-se criar uma ferramenta de aprendizagem completa que instrísse o estudante durante todo o processo, desde o conteúdo técnico sobre como realizar o cálculo da interação entre as malhas (matriz RGA), seguindo de sua realização prática, análise de PID e monitoramento do sistema. O conteúdo foi dividido em páginas e que podem ser acessadas pela página principal ou pela barra superior de acesso rápido.

Na aba de “Entendendo o controle multimalhas” o usuário encontra uma explicação detalhada sobre o que é o processo multimalhas e do cálculo da matriz RGA. E após essa introdução o software encaminha o usuário para a aba onde ele irá determinar a matriz RGA para o seu sistema.

Nesta parte buscou-se realizar uma maior interação com o usuário, onde o programa o acompanha passo a passo, especificando os gráficos que devem ser realizados, quais informações retirar deles e chegando finalmente ao grau de emparelhamento e quais variáveis devem ser emparelhadas.



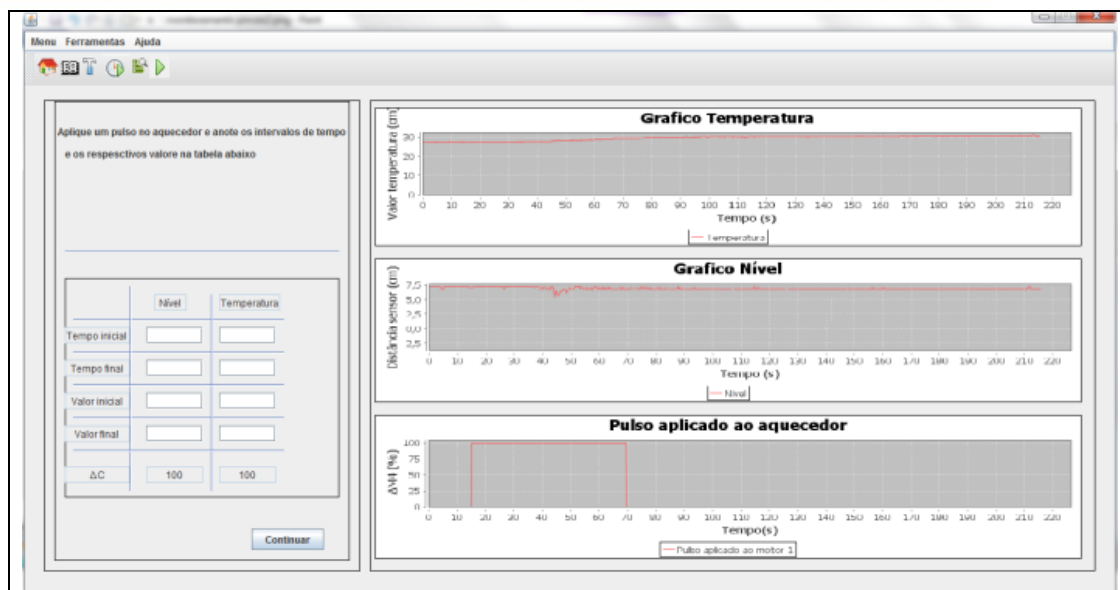


Figura 1: Interface de monitoramento do sistema (acima) e interface de determinação da RGA (abaixo)

Com o emparelhamento estabelecido, na aba “Controle PID” o usuário deve alterar os valores das constantes de PID para malha. Optou-se pelo método clássico de Ziegler-Nichols no controle de PID. E finalmente o programa disponibiliza uma área de monitoramento do sistema, onde são mostrados todos os gráficos (valores das variáveis de controle e seus respectivos erros), quais foram os valores referência determinados e como os atuadores estão funcionando.

### 3.2. Módulo físico

Como esquematizado na figura 2, o processo controla o nível e a temperatura da água no tanque 1. Onde, o líquido nunca para de ser admitido – vindo do tanque 2 devido a bomba 2 - mesmo depois de alcançado o nível de referência. Assim, o controle de nível é realizado pelo escoamento do tanque 1, isto é, atuando-se na vazão da bomba 1. Com isso, a renovação do fluido no tanque 1 está sempre presente, sendo que a vazão da bomba 2 pode ser variada como se queira, simulando situações em que o escoamento do processo anterior ocorre a taxas incertas. A água fluindo para fora do tanque 1 perde calor para o meio pelo efeito da sua própria movimentação, mas principalmente pela passagem em um radiador. Agora, o aquecedor deve sempre atuar no sentido de manter a temperatura constante no tanque 1 independentemente do estado que o fluido vindo do processo anterior esteja.

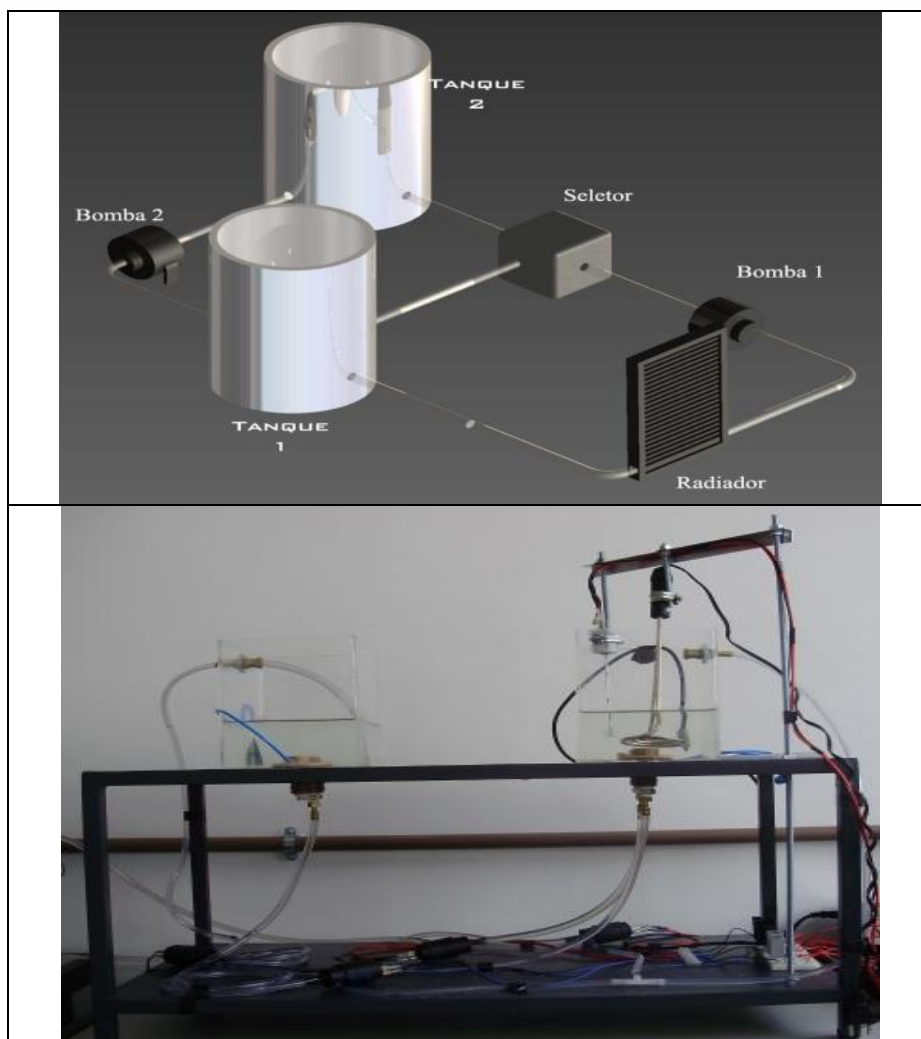


Figura 2: Esquema de funcionamento (acima) e foto do módulo (abaixo)

Para realizar o controle do sistema foi necessário efetuar o desenvolvimento de uma placa de comunicação que desempenhasse o papel de driver entre o ambiente computacional e o módulo físico montado. O núcleo do hardware envolvido é o microcontrolador Atmega 16 produzido pela Atmel. Este recebe e envia informações através de comunicação UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) sem fio, valendo-se de transceptores Bluetooth, além de controlar a potência de entrada nos atuadores e fazer a leitura dos sensores e respectiva armazenagem em uma memória flash.

Aparte da preocupação a melhoria da educação dos estudante, o projeto tem um enfoque em inovação tecnológica de baixo custo. Visando agregar mais confiabilidade na operação, a memória flash, mencionada acima, armazena os dados das operações identificados pela data e horário que ocorreram. Assim, mesmo na ocasião de perda de comunicação com o computador, estas informações podem ser recuperadas.



Fechando a malha dois sensores foram utilizados: um sensor de distância ultra-sônico modelo HC-SR04 e um sensor de temperatura.

### **3.2.1. Sensores**

O nível é medido através do sensor de distância por ondas ultrassônicas, HC-SR04 fabricado pela empresa nacional Tato. Ele é capaz de realizar medições a cada 50ms - tempo necessário para garantir que as ondas emitidas na medição anterior não interfiram na atual – e sua precisão é de cerca de 3 mm. Um sensor diferencial de pressão também vem sendo testado, entretanto apenas para meros fins de comparação de resultados, já que a precisão do método corrente é deveras satisfatória. Anteriormente, trabalhou-se com um sensor de distância por infravermelho, mas ele foi descartado devido ao inconveniente de seus feixes atravessarem a água produzindo saídas equivocadas.

A temperatura é medida por um sensor baseado em semicondutor, o LM35. O qual apresenta boa precisão e baixa constante de tempo. Ele foi introduzido dentro do tanque envolvido por uma mangueira vedada com silicone na extremidade de forma que a parte superior de seu encapsulamento foi mantida em contato direto com o líquido.

### **3.2.2. Atuadores**

Para fazer variar o nível foram utilizadas duas bombas 12v automotivas, originalmente destinadas a injetar gasolina no motor ou shampoo no para-brisa dos veículos. O controle do fluxo das bombas é realizado por meio de uma estratégia PWM (Pulse Width Modulation), sendo que elas são alimentadas por uma fonte independente da fonte do microcontrolador e estão desacopladas eletricamente.

Os atuadores de temperatura são um ebulidor e um radiador. O microcontrolador envia um sinal de PWM, que então é convertido em sinal analógico através de um filtro RC simples. Isto, porque o sinal de controle recebido pelo relé é uma corrente de 4 a 20 mA; de fato, no interior deste componente, esta corrente segue para a entrada de um optoacoplador. E então, o relé de estado sólido realiza o acionamento do ebulidor por ângulo de fase, conforme ilustrado na forma de onda presente no lado direito da figura 4. Este ebulidor, garante que temperatura varie até cerca de 10°C por minuto.

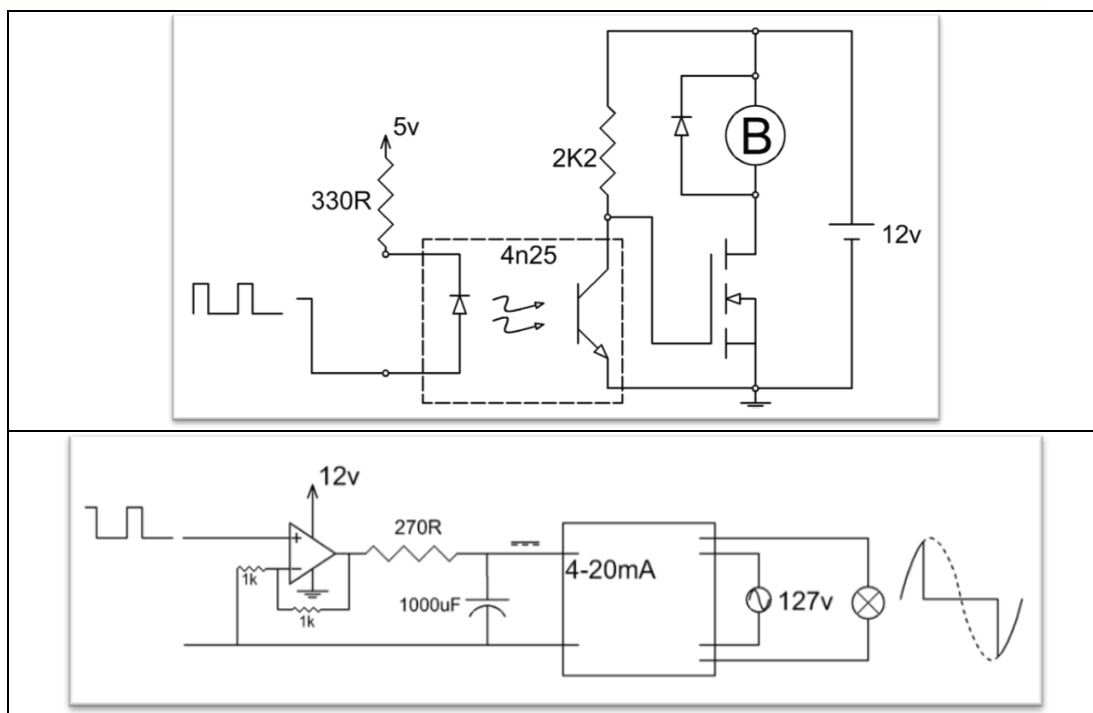


Figura 3 - Circuito Responsável Pelo Acionamento das Bombas (acima)

Acionamento do Ebulidor (abaixo)

#### 4. RESULTADOS E CONCLUSÃO

Registrou-se os resultados obtidos em um teste padrão, onde o controle simultâneo das duas variáveis, temperatura e nível, interativas, é apresentado no ambiente digital, como mostrado na figura 4.





Figura 4 – Resultados obtidos em um teste padrão

O módulo desenvolvido foi planejado para a utilização na área de educação em engenharia, mais especificamente na área de controle de processos industriais, como um instrumento didático para a melhoria das condições de ensino laboratorial. Assim, espera-se que os alunos possam enfrentar características importantes na área de controle de processos industriais, especialmente as dinâmicas das malhas associadas com o controle das variáveis, como nível e temperatura (CAMPOS & TEIXEIRA,2007). Sendo uma poderosa ferramenta aprendizado dos estudantes no controle de processos MIMO, onde devido à interferência entre malhas faz-se necessário o uso de técnicas para o emparelhamento das variáveis. Diante dos resultados obtidos o ambiente se mostrou eficiente sendo expressivamente amigável e didático com o usuário. Aliando-se a isto o fato de ser desenvolvido integralmente em FOSS o software se mostrou uma poderosa ferramenta de educação e treinamento em empresas, sendo eficiente e de baixo custo.

### *Agradecimentos*

Agradecemos ao Programa de Educação Tutorial do SESu – MEC pelo suporte oferecido ao desenvolvimento deste trabalho.

## **5. REFERÊNCIAS / CITAÇÕES**

BOLTON, W., Engenharia de controle, Makron Books, p.340,1995.



CAMPOS, M. C. M.M; TEIXEIRA, H. C. G. “Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais”, Editora Edgar Blücher, São Paulo, 2007.

CASILLO, D. S. S. Controle Preditivo Não Linear baseado no Modelo de Hammerstein com Prova de Estabilidade. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Computação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009

COELHO, L. S., “Metodologias da inteligência artificial aplicadas ao projeto de sistemas de controle”, In: ISA SHOW BRASIL 2001, São Paulo, SP, 2001

FEISEL, L. D. & ROSA A. J., The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education, Journal of Engineering Education, January, p. 121-130, 2005

LAKHAN, S.E & JHUNJHUNWALA, K. (2008). Open Source Software in Education. EDUCAUSE Quarterly, vol. 31, no. 2 (April–June 2008). Disponível em: <<http://www.educause.edu/EDUCAUSE+Quarterly/EDUCAUSEQuarterlyMagazineVolum/OpenSourceSoftwareinEducation/162873>> Acesso em 03 jun. 2012

SHINSKEY, F. G., “Process control systems: application, design and tuning”, McGraw-Hill, 1996.

TORRES, Bernardo Soares et al. Otimização de estratégias de controle em sistemas multivariáveis. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE AUTOMACAO, SISTEMAS E INSTRUMENTACAO – ISA SHOWBRASIL, 2001, Sao Paulo.

J. G. ZIEGLER AND N. B. NICHOLS, Optimum settings for automatic controllers, Transactions of the ASME, vol. 64, pp. 759-768, 1942.

## **DEVELOPMENT OF A FOSS BASED LABORATORIAL MODULO FOR EDUCATION ON MIMO PROCESS CONTROL**

**Abstract:** *The continuous production process improvements make it each time more demanding the task of projecting and tuning automatic controllers. Nowadays, the majority of these controllers are built based in methods which do not consider the existence of multiple input and multiple output on the systems. The multiple-loop control, necessary to many systems, is treated on this work with the porpoise of disseminating knowledge on this theme in a didactic and immersive way. This is accomplished by making use of a laboratorial module along with computer software in which the learner is able to access the theoretical content at the same time it is put into practice guided or freely. Both the module and software are low cost. The software has its development based on Free and Open Source Software (FOSS).*



**COBENGE**  
XL CONGRESSO BRASILEIRO  
DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA.  
03 a 06 de Setembro **2012**  
Belém - PA

***Key-words:** MIMO control, Education in Engineering, Education Platform, Free and Open Software(FOSS)*