

ELABORAÇÃO DE BANCADAS DIDÁTICAS PARA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL BASEADAS EM CLPs E FREIOS DE FOUCAULT

Alexandre Acácio de Andrade,¹ Marlon Juan de Carvalho,² Jorge Tomioka,³ Douglas Alves Cassiano⁴

RESUMO

Com o atual crescimento da procura por vagas nas diversas áreas da engenharia, principalmente elétrica, automação e mecatrônica, que, entre os anos de 2000-2014, segundo o INEP, tiveram crescimento de 472%, faz-se necessária a aplicação prática dos conceitos explorados durante a graduação nessas áreas e, para tanto, devem ser utilizados equipamentos que sejam versáteis e que não fiquem distantes demais dos que os estudantes encontrarão em sua vida profissional. O presente artigo explana sobre a elaboração de bancadas específicas de automação para uso em disciplinas que utilizam técnicas de controle analógico e digital, como os controladores PID ou, também, inversores de frequência, controladores lógicos programáveis, interfaces homem/máquina e as mais diversas simulações correlatas. Como experiência unificadora de conceitos, foi escolhido o controle de velocidade que demandou a elaboração de um freio de Foucault, o que dá subsídios para aulas de física e de eletromagnetismo, com diversos efeitos visualizados no seu funcionamento. Os resultados dessa prática são apresentados e discutidos, mostrando que a utilização das bancadas aqui descritas é flexível e multidisciplinar, servindo mesmo como ferramenta para elaboração de trabalhos de conclusão de curso.

Palavras-chave: Educação em Engenharia Elétrica; laboratório de controle e automação; freio de Foucault; controlador PID.

ABSTRACT

CONSTRUCTION OF DIDACTIC STANDS FOR INDUSTRIAL AUTOMATION BASED ON PLC AND FOUCAULT BRAKE

With the current growth in demand for vacancies in various areas of Engineering, particularly electrical, automation and mechatronics, which in the past between 2000-2014, according to INEP, grew by 472%, the practical application it is necessary the developed concepts and both should be used equipment that is versatile and that they are not too far from the students will encounter in their professional life. This article explains about the development of specific automation stands for use in disciplines that use analog control techniques and digital, such as PID controllers, as well as AC drives, programmable logic controllers, human machine interfaces and various related simulations. As a unifying experience of concepts, the speed control which required the development of a Foucault brake which gives grants for physics classes and electromagnetism with various effects identified in its operation was chosen. The results of this practice are presented and the results discussed thus demonstrating that the use of the benches here described is flexible and multidisciplinary even serving as tools for elaborations of completion of course work.

Keywords: Education in Electrical Engineering; control and automation laboratory; Foucault brake; PID controller.

1 Professor Doutor do Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas UFABC – Universidade Federal do ABC; aacacio@ufabc.edu.br

2 Engenheiro eletricista, mestrando na UFABC; marlonjcarvalho@yahoo.com.br

3 Professor Doutor do Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas UFABC; douglas.cassiano@ufabc.edu.br

4 Professor Doutor do Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas UFABC; jorge.tomioka@ufabc.edu.br

INTRODUÇÃO

Atualmente, o ensino das disciplinas de automação e controle tem assumido uma importância crescente, devido à grande procura tanto discente quanto pela indústria, no que tange à mão de obra com qualificações, nessa área dinâmica do conhecimento. Para um curso de automação e controle ser corretamente ministrado, é imprescindível a utilização de laboratórios (BARBOSA *et al.*, 2006), onde muitas das teorias de controle possam ser demonstradas e explicadas de maneira prática, fugindo da abordagem tradicional de controle em que apenas o fenômeno é focado, não importando muito os meios para isso.

A experiência aqui discutida visa a uma abordagem do controle como na maioria das vezes é executado nos ambientes industriais, ou seja, utilizando automação industrial baseada em controladores do tipo CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), na abordagem conhecida como SCADA (*supervisory control and data acquisition*), conforme Boyer (2009).

Sete bancadas foram montadas e testadas na Faculdade de Engenharia São Paulo (FESP), sendo utilizadas para subsidiar as aulas correlatas de controle e automação. Permitindo o uso por até seis alunos por bancada, as mesmas foram também usadas em projetos de conclusão de curso, cujos resultados foram apresentados em congressos (CARVALHO e ANDRADE, 2011; OTONI *et al.*, 2013). Tais bancadas foram divididas em dois sistemas, ou *kits*:

- a) *Kit* SCADA;
- b) *Kit* do freio de Foucault.

A elaboração desses *kits* será abordada separadamente.

O objetivo deste trabalho é apresentar um exemplo prático de elaboração de bancadas para o ensino de Engenharia de Automação e Controle, descrevendo-se o embasamento das escolhas de *hardware*, *software* e mesmo da construção (RIBEIRO *et al.*, 2014) de equipamentos necessários para a realização de experiências práticas, como o Freio de Foucault, voltadas para as disciplinas de controle e automação nas quais se destacam o uso de CLPs (VYATKIN, 2013), inversores de frequência, IHMs

(interfaces homem/máquina), *Encoders* e motores trifásicos. Com o objetivo norteador de realizar experiências de controle de velocidade, foram desenvolvidos os conteúdos práticos:

- controladores, especialmente o tipo PID (Proporcional, Integral e Derivativo);
- técnicas de sintonia de PIDs, principalmente a de Ziegler-Nichols e derivados dessa técnica, como Chien e Cohen.
- controle *Fuzzy*.

Segundo Oliveira *et al.* (2013), os cursos de controle e automação tiveram um incremento de vagas no Brasil de 1.457,4%, entre 2001 e 2011, sendo a área que teve maior aumento de vagas entre todas as modalidades de engenharia. Devido a esses fatos, a necessidade de bancadas e equipamentos em geral, capazes de fornecer subsídios para tais cursos, é crescente. O presente trabalho busca uma metodologia para a elaboração de equipamentos didáticos que se caracterizam por grande flexibilidade e multidisciplinaridade.

Durante a elaboração das bancadas, concomitantemente aos desafios de controle, vieram os problemas práticos de automação industrial para se tratar controle de velocidade. Buscou-se, então, uma solução flexível, que permitisse alcançar os objetivos propostos, mas que fosse facilmente intercambiável para outros problemas, como:

- a) treinamento em linguagens de programação de CLPs;
- b) estudo de técnicas de inversores de frequência;
- c) motor trifásico tipo gaiola de esquilo;
- d) física do eletromagnetismo e conversão eletromecânica de energia.

Totalizou-se, assim, uma experiência multidisciplinar em várias áreas da Engenharia Elétrica e Mecatrônica.

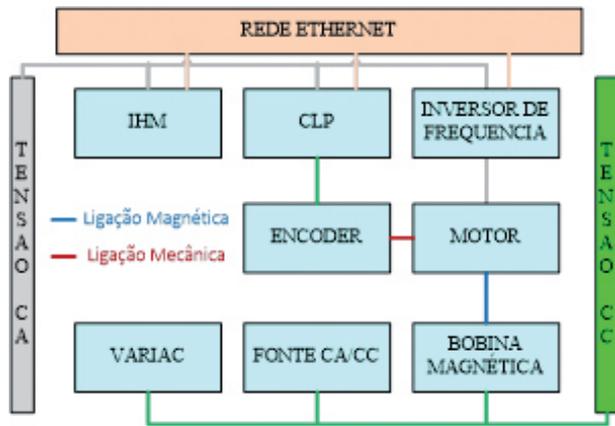
São descritas as etapas de especificação e desenvolvimento das bancadas, bem como as experiências realizadas com sua metodologia nas mesmas, e, ainda, os resultados alcançados, nos quais se realizam estudo comparativo das diversas técnicas de controle de velocidade e métodos de sintonia de controladores do tipo PID.

ESPECIFICAÇÕES DAS BANCADAS

Especificações do *hardware* das bancadas

As necessidades de *hardware* (CUSUMANO, 2013) para atender à experiência norteadora eram as seguintes, mostradas esquematicamente na Figura 1:

Figura 1: Equipamentos especificados para a elaboração da bancada e suas respectivas ligações.



- Flexibilidade dos atuadores finais, permitindo, assim, que diversas experiências fossem realizadas com velocidades e torques distintos;
- flexibilidade dos controladores que permitissem a elaboração de diversos algoritmos de controle, bem como permitindo modificações dinâmicas para adequarem eventuais mudanças;
- equipamentos que possam ser reconfigurados de acordo com necessidades específicas de novas experiências ou, ainda, buscando realçar a necessidade de alguma disciplina particular, como, por exemplo, conversão eletromecânica de energia.

A seguir, suas especificidades.

IHM – Foi especificada, tendo em vista a necessidade de flexibilidade, robustez, facilidade de comunicação e programação.

CLP – Foi especificado um controlador lógico programável CLP, sendo o mesmo utilizado para realizar as funções de controle normalmente em ambientes industriais. Ele pode ser dividido em duas seções básicas:

- UCP (Unidade Central de Processamento), que controla as atividades do CLP e realiza as atividades na programação, normalmente feita em linguagem própria, desenvolvida pelo fabricante, como, por exemplo, as da IEC 61131-3;
- cartões de entradas e saídas (IOs) – são as interfaces de entradas e saídas, realizam as ligações físicas para que haja comunicação entre o CLP e o meio externo.

No projeto, a função do CLP foi a de executar a programação lógica desenvolvida, além de tratar o sinal analógico recebido do *encoder* e o sinal via rede da interface homem/máquina, executar o algoritmo do PID (ou outros) e controlar o inversor de frequência. O CLP escolhido se caracteriza por permitir programação nas quatro linguagens da IEC-61131-3, e seus cartões de entrada e saída são eletricamente robustos, permitindo ligações elétricas simplificadas, principalmente do tipo contato seco. Além dessas características, o equipamento também possui interface de comunicação ethernet integrada, evitando custos adicionais de cartão de comunicação dedicado.

Motor trifásico – Modelo de motor consagrado pelo uso, por suas características de robustez e confiabilidade, foi especificado em 1 cv trifásico 110 V por fase. Devido à escolha desse motor, que tem rotação fixa, foi necessária a especificação de um inversor de frequência para se conseguir as velocidades variáveis necessárias. Essa escolha foi na contramão da solução tradicional de motores CC, porém, bem adequada ao panorama industrial brasileiro atual.

Inversor de frequência – O inversor de frequência é um dispositivo que utiliza a modulação por largura de pulso PWM (*Pulse Width Modulation*) para realizar o controle da frequência e da tensão em motores de indução. No projeto, sua função é receber os controles enviados, via rede ethernet, pelo CLP, e fornecer tensão e frequência trifásica para o motor.

Encoder – Para se obter a realimentação de velocidade, optou-se por um *encoder*. Os *encoders* são transdutores de movimento, capazes de converter movimentos lineares ou angulares em informações elétricas analógicas e, por meio de conversores ana-

lógico-digitais, geram tensões ou correntes padronizadas que podem ser entendidas como a velocidade de rotação do motor.

Bobina magnética, ou freio de Foucault – será mais detalhadamente explicada adiante.

Fonte CA/CC – Fonte retificada; trata-se de fonte de alimentação de baixo custo, com *ripple* relativamente alto, constituída de ponte de diodos e capacitor eletrolítico. A mesma tem por finalidade fornecer tensão para a bobina do freio Foucault.

Variac – O Variac funciona como um transformador CA/CA de saída variável. Sua função no projeto é fornecer tensão para a fonte regulada. Conforme resultados práticos, a tensão de saída ficou em torno de 48 V CA.

Especificações dos softwares das bancadas

A escolha do *hardware* induziu à subsequente escolha dos *softwares*, pois *hardware* e *software* trabalham de maneira integrada. Foram, assim, especificados os seguintes *softwares*:

- a) comunicação – RSLinx, possui diversos *drivers* para comunicação com muitas redes, incluindo-se a ethernet;
- b) programação do CLP – RSLogix 5000, muito amigável para o uso, com instruções fáceis e intuitivas;
- c) configuração do inversor de frequência – DriveTools SP *Software* – específico e otimizado para esse *hardware*;
- d) configuração e programação da IHM – RS TalkView Me. Possui diversos recursos gráficos, especialmente de animação de telas.

FREIO DE FOUCAULT

Com o objetivo de se criar um freio variável para as experiências de controle de velocidade, optou-se pela construção de um freio de Foucault, cuja elaboração é apresentada a seguir.

Correntes parasitas (ou de Foucault)

Correntes induzidas são as correntes que são produzidas por qualquer condutor maciço, em movimento, num campo magnético ou atravessado por um fluxo magnético variável. Dentro de um material

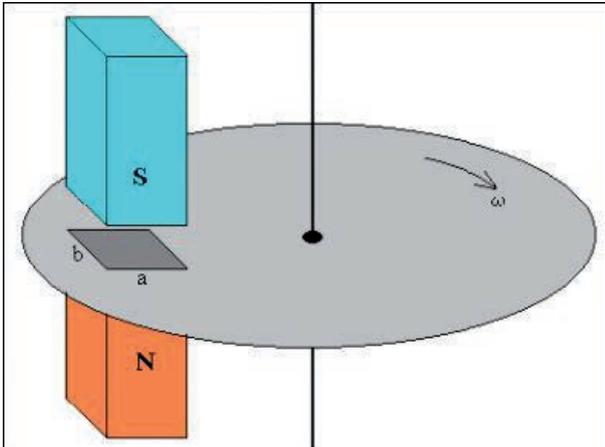
condutor, podem ser encontrados vários percursos fechados para a circulação de uma corrente. Em cada percurso fechado, o fluxo magnético varia com o tempo; portanto, tensões induzidas fazem circular correntes induzidas no interior do material condutor maciço. Essas correntes induzidas são chamadas de “correntes de Foucault”, e podem atingir valores muito elevados, provocando aquecimento do material. Se esse aquecimento for indesejado, ele constitui as chamadas “perdas Foucault”. É por essa razão que essas correntes são chamadas de “parasitas”.

Esse aquecimento pode ser utilizado nos fornos de indução, usados para fundir metais. Para reduzir o efeito das correntes parasitas, principalmente em transformadores, deve-se laminar o núcleo na direção do campo, isolando-se as chapas entre si. Isso impede – ou pelo menos reduz – que as correntes se somem, conseqüentemente, as perdas por efeito Joule serão menores. Também se pode reduzir os efeitos das correntes de Foucault por meio da adição de elementos que aumentem a resistividade do núcleo (como o carbono), sem, no entanto, comprometer suas propriedades magnéticas. Apesar de serem, na maioria dos casos, indesejáveis, as correntes de Foucault têm sua aplicação prática na confecção de medidores de energia a disco de indução, relés e freios eletromagnéticos, pois, como aplicação direta da Lei de Faraday-Lenz, $\varepsilon = -\frac{d\theta_B}{dt}$, essas correntes induzidas se opõem ao movimento que as produz.

No trabalho em questão, porém, não interessava reduzir essas correntes, mas sim produzi-las, e, para tanto, foi elaborado o projeto de um disco, conforme o arranjo mostrado na Figura 2.

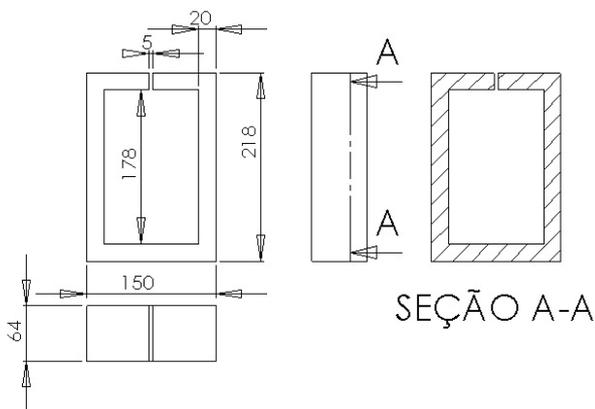
Projeto do freio de Foucault utilizado

Seja um disco metálico colocado entre os polos de um eletroímã, como mostra a Figura 2. Ao girar-se o disco, o mesmo gira quase sem dificuldade; ao se ligar o eletroímã, o disco para de girar em poucos segundos. Esse efeito é causado por correntes induzidas que se opõem ao movimento, resultando daí calor, em que é dissipada a energia do movimento. Se o fluxo magnético for variável, criado por uma corrente alternada, as correntes induzidas se opõem à variação do fluxo, fazendo o disco girar.

Figura 2: Disco de Foucault.

Fonte: <<http://www.estudopratico.com.br/corrente-de-foucault-historico-e-o-que-ocorre-nela/>>.

A partir da teoria física para os cálculos do freio de Foucault, e dos dados do motor onde o freio seria instalado, efetuou-se a construção da bobina e do disco que seria acoplado ao motor. Para a correta concentração do campo magnético, foi construído um núcleo férrico. Esse núcleo (constituído de folhas laminadas) possui as seguintes dimensões, apresentadas na Figura 3.

Figura 3: Núcleo da bobina construída (medidas em mm).

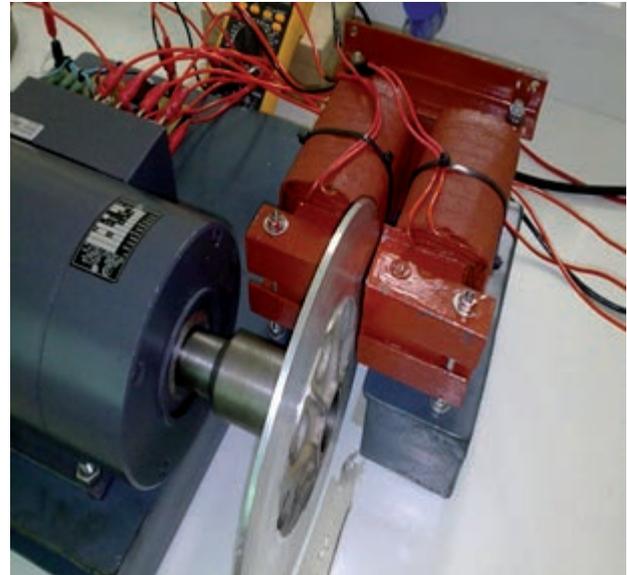
a) Bobinas

Foram construídas duas bobinas idênticas e com os mesmos polos. A medida de resistência de cada bobina ficou em torno de $8,4 \Omega$ (medidos).

b) Disco

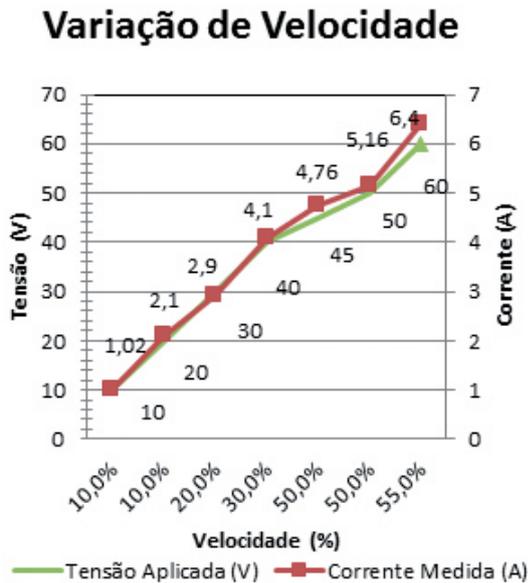
Optou-se por um modelo de disco tamanho comercial, para evitar os altos custos da fabricação

de peças únicas sob medida. O produto escolhido foi um disco padrão, utilizado em elevadores, e, para reduzir ainda mais os custos, optou-se por um disco usado, que, embora tivesse esgotado sua vida útil para uso em elevadores, atendia perfeitamente as funções de freio magnético. O mesmo foi acoplado diretamente no eixo do motor, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4: Montagem do freio no motor.

Para verificação da linearidade do processo, levantou-se a curva de tensão e corrente aplicada nas bobinas e a variação de velocidade produzida no motor, em rotação nominal. Esses resultados são mostrados na Figura 5, a seguir, sendo suas equações encontradas com o uso do Microsoft Excel, como segue: $y = 0.8614x + 0.3314; R^2 = 0.9873$ (para a corrente) e $y = 8.0357x + 4.2857; R^2 = 0.9849$ (para a tensão), em que se nota, pelo R^2 perto de 1, que os pontos se aproximam muito da curva linear.

Figura 5: Variação de velocidade do motor em relação à tensão e corrente aplicadas nas bobinas do freio de Foucault.



CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL

Optou-se pelo uso dos controladores lógicos programáveis devido, principalmente, à grande flexibilidade e ao fato de os mesmos serem extensamente utilizados na indústria como meios para implantação de algoritmos de controle, tanto controles sequenciais e de intertravamentos, função para qual os CLPs foram originalmente desenvolvidos, quanto controles analógicos, como, por exemplo, implantação de algoritmos do tipo PID (Proporcional, Integral e Derivativo).

Experiência norteadora de controle de velocidade

Existem diversas experiências didáticas sobre a teoria de controle e automação. Com o objetivo de validar as bancadas construídas, optou-se pelo controle de velocidade, já que o mesmo apresenta uma considerável complexidade e pode servir de base para teste de diversos algoritmos e de estratégias de controle.

O ponto-chave para tornar a experiência dinâmica foi à criação de um torque resistivo variável, o que foi resolvido com a utilização do freio de Fou-

cault. Uma vez estabelecidas as condições necessárias, foram implementadas duas experiências básicas: comparação de técnicas de ajuste para PIDs e controle *Fuzzy*. Os principais componentes dessas duas montagens são expostos no Quadro 1, a seguir:

Quadro 1: Componentes da montagem.

Componente	Especificação
IHM	Allen-Bradley PanelView Plus 400
CLP	Allen-Bradley CPU: L32E – Modelo I/Os: 7319
Inversor de frequência	Allen-Bradley, Série: Power Flex 40, Modelo: 22B-A012N104.
Encoder;	Absoluto de saída analógica de 4 a 20 mA, – Hohner Eletrônicos, Série: 64 Series, Modelo: 6406 4011 0012
Motor trifásico	Fabricante WEG
Variac	Convencional
Fonte AC/DC	Range de 75 V/15 A
Bobina Magnética	1200 espiras cada uma, utilizando fio de cobre 20 AWG
Disco	Em alumínio com 25 cm de diâmetro e 4 mm de espessura

Tanto o CLP quanto a IHM foram programados para executar a rotina de acionamento do motor e leitura da resposta de velocidade gerada pelo *encoder*, fazendo com que o algoritmo do PID atuasse e transmitisse a melhor resposta ao sistema, de acordo com o método de obtenção dos parâmetros desse algoritmo.

A IHM forneceu todas as condições dessa análise. Inicialmente, selecionou-se o valor de referência no qual o motor iria trabalhar, por meio da tecla de atalho [F2] do IHM.

Criou-se uma rotina para limpar eventuais falhas [F1] no inversor ou no CLP.

Feitos esses ajustes, o motor pode ser acionado por meio do inversor, pelo comando [F8], podendo-se verificar na tela do IHM, em tempo real, a velocidade do motor, em RPM, e o SP de controle do inversor, em hertz.

Por meio da tecla de atalho [F3], é possível obter o gráfico de resposta da velocidade. Para fins didáticos, foram introduzidos [F4] os controles do

algoritmo do PID do *software*, que são K_p , K_i e K_d e seu erro.

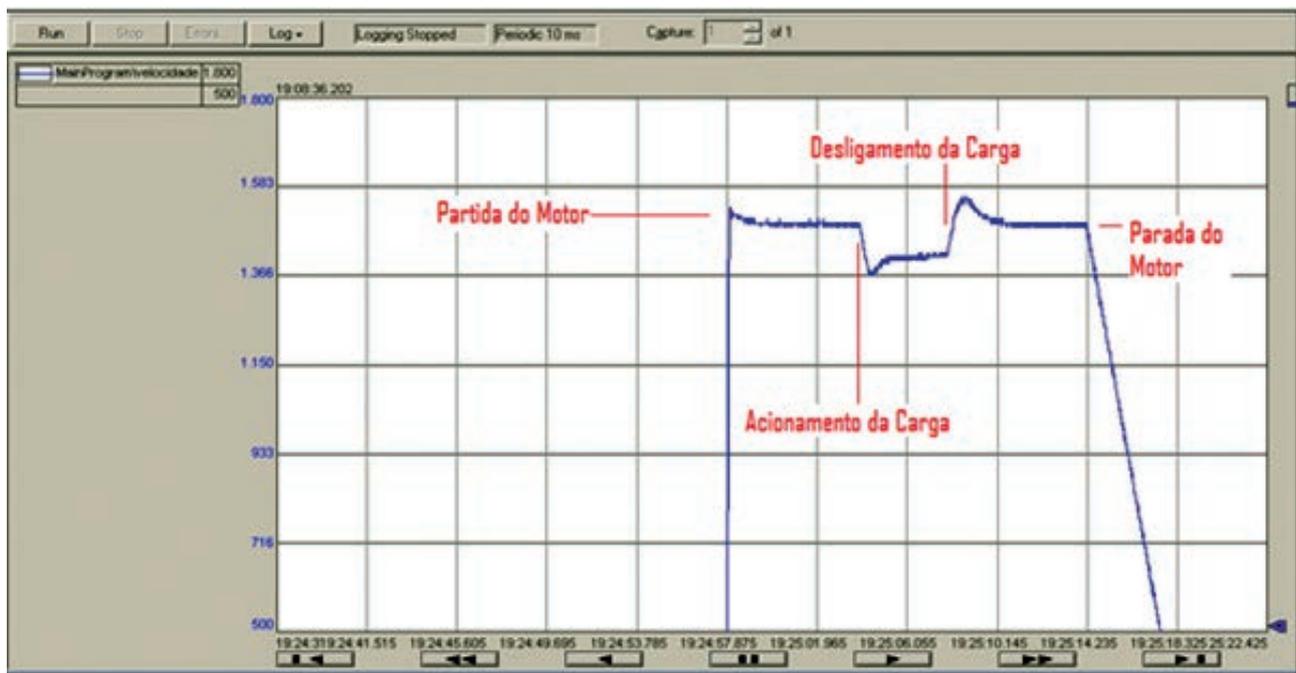
Para efeito de comparação dos métodos de sintonia, foram utilizados gráficos gerados através da interface do RSLogix5000, quando esses se mostraram mais adequados para comprovar a eficiência da sintonia.

Trabalhou-se em 80% da rotação do motor, para melhores resultados da sintonia.

Os estudos foram iniciados com o PID desabilitado, sendo possível, assim, ver o comportamento do sistema sem esse algoritmo.

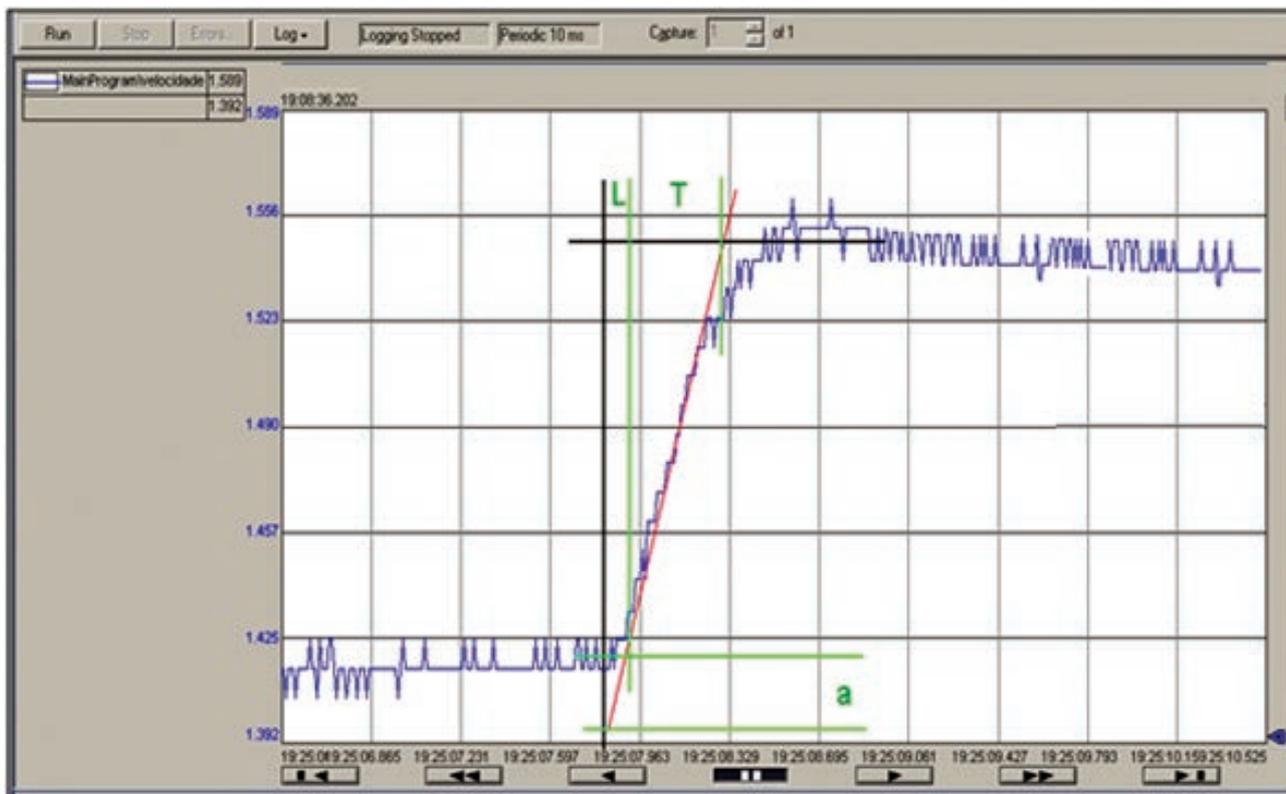
Com o PID desabilitado e com a rotação em 80%, produziu-se a perturbação do sistema com o freio Foucault, observando-se, como registrado na Figura 6, que o sistema não consegue retomar seu valor nominal; na mesma figura, nota-se a partida do motor até a rotação de 1450 Hz, aproximadamente, e o início da perturbação no ponto em que o sistema não conseguiu responder e, ainda, o *overshoot* produzido ao desligar a carga.

Figura 6: Curva experimental de resposta com PID desabilitado (RPM / S).



Ao submeter o sistema a um degrau, obteve-se uma curva aproximada do tipo S, como mostrado na Figura 7, por meio da qual se levantou os valores dos parâmetros L e T , que foram utilizados para a comparação entre métodos de sintonia baseados nos algoritmos de Ziegler e Nichols (Z-N).

Figura 7: Curva experimental de resposta tipo “S” (RPM / S).



Analisando a resposta obtida no gráfico da Figura 7, no qual se tem que obter as constantes através do traçado da tangente, foi verificado que a variação da inclinação desse traçado provocava pouca variação nos valores da tabela de qualquer método a ser analisado, sendo então definidos valores iniciais das constantes. Assim, partiu-se dos seguintes valores:

$L = 0,090$ s ou 90 ms;

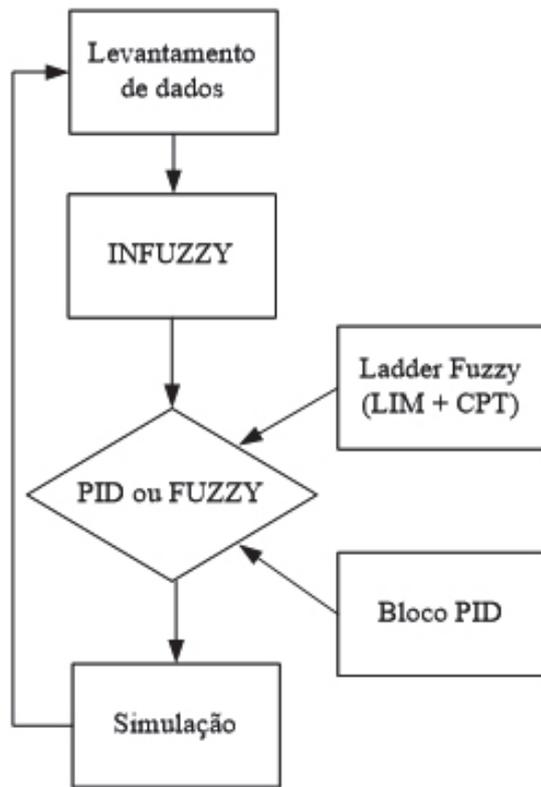
$T = 0,366$ s ou 366 ms e $a = 26$.

De posse desses valores, é possível aplicá-los à tabela de Z-N, e, como os métodos de Chien e Cohen são métodos considerados derivados do método Z-N, foram calculados os valores de sintonia para esses métodos, de acordo com a teoria exposta. Foram feitos os ensaios para cada método de sintonia e analisados por meio de gráficos semelhantes aos da Figura 7.

Controle Fuzzy

Com o objetivo de continuar o processo de validação das bancadas, foram feitas experiências utilizando técnicas de controle *Fuzzy*; a metodologia utilizada está especificada na Figura 8. Inicialmente, foi executada a aplicação de carga máxima e alívio de carga em várias faixas de frequência, para levantar o erro em regime e o *overshoot*. Com os valores obtidos de rotação em relação à aplicação da carga, foram realizadas compensações de frequência manual no inversor, para manter a rotação do motor constante. A cada liberação do freio, para posterior correção manual em diferentes pontos de operação, observou-se que houve ultrapassagem do limite do valor de referência, sendo necessário diminuir a frequência manualmente, pelo potenciômetro do inversor. Com esse procedimento, foi possível observar o Erro Mínimo, o Erro Máximo e o valor de *overshoot*, valores essenciais para a criação do controle baseado em lógica *Fuzzy*.

Figura 8: Metodologia utilizada na experiência de controle *Fuzzy*.



Para dar início ao processo de aplicação da lógica *Fuzzy*, se faz necessário a identificação das variáveis de entrada e de saída, e, no caso do controle da velocidade do motor, foram criadas duas variáveis de entrada, sendo a Entrada 1 definida como *Set Point* e a Entrada 2 definida como Erro. Utilizando o *software* gratuito INFUZZY (POSSELT *et al.*, 2011), um bloco de regras foi inserido na sequência, para tratamento das variáveis e processamento dos sinais. Na saída, foi definido um único bloco denominado Resposta Frequência, que deverá informar o inversor a necessidade de: aumento da frequência, para compensar um erro positivo ou aceleração; ou diminuição da frequência, para compensar um erro negativo (desaceleração).

Devido aos sucessivos ensaios experimentais e testes realizados, foi possível passar as características qualitativas e intuitivas do sistema para o controlador nebuloso, criando, no interior das variáveis

linguísticas de entrada e saída, os respectivos termos linguísticos, as regras para as situações que poderão ocorrer durante um processo e as respectivas respostas.

Por meio do *software* Infuzzy, foi possível simular as respostas e verificar se o sistema projetado estava de acordo com os dados obtidos nos ensaios. Foram feitos sucessivos testes, variando as formas de defuzzificação (método do centróide, altura, primeiro dos máximos, centro dos máximos, etc.), sendo verificado um comportamento mais linear, que se assemelharia à condição V/f constante, no método de defuzzificação pelo critério de altura.

Como resultado, foram finalmente levantados dados que puderam ser programados no CLP, utilizando blocos LIN (Teste de limite) e CPT (Instrução de computação), programando-se retas dinâmicas por *set points*. Comparou-se, em seguida, os resultados alcançados de erro e *overshoot* com os obtidos pela utilização dos blocos PID.

Os ensaios foram realizados de forma equivalente para os dois sistemas, *Fuzzy* e PID ($K_c=0,3$, $T_i=0,24$, $T_d=0,06$), com um *Set Point* fixo em 50 Hz e 1500 RPM, tendo o ensaio duração total de 50 segundos. Após os primeiros 20 segundos, foi inserida uma carga no sistema de intensidade de 3 A na bobina do freio. A carga foi mantida por exatos 10 segundos, com posterior liberação do freio, deixando os 20 segundos finais sem carga.

Os resultados da experiência podem ser observados no Quadro 2, para constatação das diferenças de comportamento entre os dois controladores. Nessa condição, o sistema *Fuzzy* apresentou melhor desempenho no ajuste de *Set Point* sem carga, tendo um erro menor, quando comparado ao PID. Na aplicação e liberação da carga, foi observado que os picos negativos e positivos de rotação foram maiores no controle PID, tendo maior variação de erro. Já o sistema de controle *Fuzzy* apresentou picos menores e valores de erro inferiores. O tempo de resposta e correção de erro foi mais rápido no controlador *Fuzzy* quando comparado ao PID.

Quadro 2: Resultados experimentais comparativos entre o controle *Fuzzy* e PIDs.

Set point 50 Hz Rotação 1500 RPM		Região sem carga		Momento de aplicação da carga		Carga constante		Momento de alívio de carga	
		Rotação (RPM)	Erro	Pico negativo triangular	Tempo de Resposta	Rotação (RPM)	Erro	Pico de Rotação (RPM)	Tempo de Resposta para correção
Controlador	FUZZY	1489	-11	1471	menor	1498	-2	1554	menor
	PID	1516	16	1462	maior	1498	-2	1562	maior

CONCLUSÕES

A elaboração das bancadas foi de grande auxílio para as aulas práticas de disciplinas nas áreas de controle e automação, bem como, graças ao freio de Foucault, foram também importante subsídio nas aulas de conversão eletromecânica de energia, além de eletromagnetismo. O projeto das bancadas e também a experiência principal é facilmente reproduzível, inclusive com a utilização de *hardwares* de menor custo, entre outras possibilidades, a tecnologia Arduino (JANAK, 2013) ou Raspberry Pi (PINTER, 2013). O impacto pedagógico foi importante, ao permitir que os discentes fossem além das aulas teóricas e com *softwares* simuladores anteriormente lecionados.

REFERÊNCIAS

BOYER, Stuart A. **SCADA: supervisory control and data acquisition**. International Society of Automation, 2009.

BARBOSA, Alípio Monteiro *et al.* As empresas juniores e a confecção de bancadas didáticas como atividades inovadoras no ensino de engenharia. In: XXXIV COBENGE: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, **Anais...** Passo Fundo, 12 a 15 de setembro, 2006. p. 361-370.

CARVALHO, M. J.; ALEXANDRE, A. A. Utilização de freio de Foucault para testes de metodologias de sintonia de PIDs. **Brazil Automation ISA 2011**, 30 set., 2011.

CUSUMANO, Michael A. Manufacturing innovation: lessons from the Japanese auto industry. **Sloan Management Review**, v. 29, 2013.

DE OLIVEIRA, Vanderli Fava *et al.* Um estudo sobre a expansão da formação em engenharia no Brasil. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 32, n. 3, p. 37-56, 2013.

RIBEIRO, Jean Marcos de Souza, *et al.* Construção, modelagem e controle, através de CLP, de uma planta didática do sistema pêndulo invertido, com utilização de *software* SCADA. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION, **Proceedings...** v. 13, p. 218-222, 2014.

JANAK, Jan; NAM, Hyunwoo; SCHULZRINNE, Henning G. **Connecting the Physical World with Arduino in SECE**. 2013. Disponível em: <<https://academiccommons.columbia.edu/catalog/ac%3A162665>>. Acesso: 12 set. 2016.

INEP – Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira Disponível em: <<http://portal.inep.gov.br/superior-censosuperior-sinopse>>. Acesso em: 30 maio 2016.

OTONI, T.; ANDRADE, A. A.; CASSIANO, D. A. Controle de velocidade de motor trifásico utilizando lógica *Fuzzy* – análise comparativa com PID. In: 17º CONGRESSO INTERNACIONAL E EXPOSIÇÃO DE AUTOMAÇÃO, SISTEMAS E INSTRUMENTAÇÃO, São Paulo, 2013. **Brazil Automation ISA 2013**. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/17972419-Controlle-de-velocidade-de-motor-trifasico-utilizando-logica-fuzzy-analise-comparativa-com-pid.html>>. Acesso: 12 set. 2016.

PINTER, Judit Maria; TROHÁK, Attila. System integration methods for voice-commanded PLC Controlled Systems. **Applied Mechanics and Materials**, p. 280-285, 2013.

POSSELT, E. L.; FROZZA, R.; MOLZ, R. F. **Software Infuzzy 2011**. Programa de Mestrado em Sistemas e Processos Industriais PPGSPI, UNISC, 2011. Disponível em: <<http://www.unisc.br/ppgspe>>. Acesso em: 30 maio 2016.

VYATKIN, Valeriy. Software engineering in industrial automation: state of the art review. **Transactions on Industrial Informatics**, v. 9, n. 3, p. 1.234-1.249, 2013.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. **Optimum settings for automatic controllers**. New York: Asme, 1942.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi desenvolvido nas instalações da Faculdade de Engenharia São Paulo (FESP). Os autores agradecem especialmente à colaboração do mestre Helvio Fregolente Júnior, que muito contribuiu para o desenvolvimento deste projeto. Agradecimentos especiais à UFABC, que investiu em bancadas semelhantes no *campus* de São Bernardo do Campo.

DADOS DOS AUTORES



Alexandre Acácio de Andrade possui graduação em Engenharia Elétrica – Ênfase em Energia e Automação (1997), mestrado em Engenharia Elétrica (Automação) (2001) e doutorado (2007) em Engenharia Elétrica (Automação), todos pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Professor da Faculdade de Engenharia São Paulo de 2002 a 2012. Tem 10 anos de experiência na área de projetos de Automação Industrial baseada em CLPs, atuando principalmente nos seguintes temas: inteligência artificial, mineração de dados, sistemas supervisórios, controladores lógicos programáveis, SDCDs, redes de dados, automação de baixo custo e inovação. Professor em regime de dedicação exclusiva da UFABC desde 2012. Docente do mestrado de Engenharia de Gestão da Inovação desde 2015.



Marlon Juan de Carvalho – engenheiro elétrico formado pela Faculdade de Engenharia São Paulo, em 2010. Desde 1997, exerce atividades na área de Administração e Engenharia em empresas de serviços em transporte vertical. Atualmente, engenheiro responsável pela empresa ASK Instalações Industriais Ltda. Mestrando na Universidade Federal do ABC (UFABC).



Jorge Tomioka – engenheiro eletricitista pela USP/SC (1990), mestrado pela EESC/SC (1995) e doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais pela EESC/USP e Nagoya University – Japão (1999). Na Engenharia Elétrica, atua nas seguintes temáticas: cabos para redes subterrâneas; conversão de energia (bateria de magnésio como sistema primário e/ou secundário, sistema de geração isolada de energia, baterias veiculares e conversão RF/DC e/ou DC/RF para geração de energia elétrica) e sistemas embarcados em veículos (sistema de segurança computacional).



Douglas Alves Cassiano – engenheiro químico (1993, Faculdade de Engenharia Industrial – FEI), mestre (1999) e doutor (2003) em Engenharia Química (Universidade Estadual de Campinas – Unicamp). Professor do curso de Engenharia de Gestão e do Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do ABC (UFABC).