

# CONTROLE ADAPTATIVO COM OTIMIZAÇÃO EVOLUTIVA APLICADO À AUTOMAÇÃO DE ENSAIOS EM CABOS CONDUTORES: PROJETO E ESTUDO DE CASO PRÁTICO

MARCOS JOSÉ MANNALA

LACTEC, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Centro Politécnico da UFPR  
Caixa Postal 19067, CEP 81531-980 Curitiba, PR  
E-mails: mannala@lactec.org.br

LEANDRO DOS SANTOS COELHO

Laboratório de Automação e Sistemas, Grupo Produtônica  
Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, PUCPR / PPGEPS  
Imaculada Conceição, 1155, CEP 80215-901 Curitiba, PR  
E-mails: leandro.coelho@pucpr.br

**Abstract**— The PI (Proportional-Integral) control techniques are vastly applied, even though there are many innovations in the control engineering field. Some methodologies can improve the tuning of this controller, optimizing the systems output performance to be controlled. PI controllers stability can decrease with passing of the time, decaying the quality of the controlled systems, even with a well made right initial tuning. In this context, the utilization of adaptive PI controllers in this work is justified. For the tuning of the adaptive PI controllers, an evolutionary computation approach called differential evolution is used. The case study for the verification of the performance of control design is the heating module of an essays system of electric cables.

**Keywords**— Automation of essays, multivariable control, adaptive control, evolutionary computation, differential evolution.

**Resumo**— As técnicas de controle tipo PI (Proporcional-Integral) são vastamente aplicadas, mesmo com tantas inovações na área de engenharia de controle. Algumas metodologias podem melhorar a sintonia deste controlador, otimizando o desempenho de sistemas em malha fechada. A estabilidade dos controladores do tipo PI pode deteriorar-se com o passar do tempo, prejudicando a qualidade dos sistemas controlados, mesmo com uma sintonia inicial adequada. Neste contexto, justifica-se a aplicação de controladores PI adaptativos, neste trabalho. Para a sintonia dos controladores PI adaptativos é utilizada uma abordagem da computação evolutiva denominada evolução diferencial. O estudo de caso utilizado para a verificação do desempenho do projeto de controle é o módulo de aquecimento de uma bancada de ensaios de cabos condutores.

**Palavras-chave**— Automação de ensaios, controle multivariável, controle adaptativo, computação evolutiva, evolução diferencial.

## 1 Introdução

A automação de ensaios normalizados é necessária e tem sido eficaz quando aplicada em cabos e acessórios de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Muitos dos ensaios deste tipo são realizados manualmente, isto é, requerem o acompanhamento contínuo de um operador. As variáveis, tais como amplitude de vibração, carga mecânica e temperatura devem ser mantidas sob rigoroso controle durante os ensaios (Mannala, 2004).

O projeto da bancada de ensaios em cabos e acessórios para linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica do LACTEC teve início na década de 1990, patrocinado pela COPEL (Companhia Paranaense de Energia, Curitiba, PR). O objetivo inicial do projeto era a execução de ensaios com carga mantida em cabos condutores para linhas de transmissão de energia elétrica. Em síntese, o projeto inicialmente propunha apenas dois pontos de ancoragens para tracionar os cabos condutores. Entretanto, o projeto passou a contar com um aparato eletro-mecânico complexo. Além da parte mecânica

para o tracionamento de cabos condutores, foram introduzidos no projeto Controladores Lógico Programáveis (CLPs). Atualmente, a bancada não só serve para o tracionamento dos cabos condutores com até 200 kN, como também tornou possível a realização de ensaios com aquecimento através de resistências e corrente elétrica para a análise de deformação em cabos condutores (Coelho e Mannala, 2005).

O sistema de aquecimento da bancada de ensaios mencionada é o estudo de caso deste artigo. Neste caso, os ensaios de norma para ensaio em cabos de alumínio com alma de aço e sem alma são realizados em temperatura ambiente, entre 20 a 30°C. Para verificar o comportamento destes cabos com a temperatura, foi desenvolvido um sistema de aquecimento por resistências que permite temperaturas de até 200°C. O projeto dos controladores desenvolvidos para este sistema é composto de quatro controladores digitais do tipo PI (Proporcional-Integral) adaptativos (Camacho *et al.*, 1992).

Neste trabalho, o objetivo da otimização é determinar simultaneamente os parâmetros dos controladores PI adaptativos visando um desempenho satisfatório do sistema de controle em malha fechada

usando otimização através de evolução diferencial (Storn e Price, 1995), um paradigma da computação evolutiva. O estudo de caso abordado neste trabalho foi o do controle do sistema de aquecimento de uma bancada de ensaios em cabos condutores, este um processo MIMO (*Multiple Inputs Multiple Outputs*) com quatro entradas e quatro saídas.

O restante do artigo está dividido nas seguintes seções. Na seção 2 é apresentada uma breve descrição do sistema de aquecimento da bancada de ensaios desenvolvida no LACTEC. O projeto dos controladores PI adaptativos é descrito na seção 3. Os resultados obtidos no controle do processo de temperatura são mencionados na seção 4. A conclusão é apresentada na seção 5.

## 2 Descrição do Sistema de Aquecimento

A bancada de cabos condutores é composta basicamente por um sistema de tração de cabos condutores, um sistema de aquecimento por corrente elétrica e um sistema de aquecimento através de resistências blindadas, sendo este último o sistema estudado. O vão de aquecimento onde o cabo fica alojado é de 12 m de comprimento por 0,30 m de largura e 0,30 m de altura. As paredes da bancada de ensaio são constituídas de lã de vidro cobertas por alumínio para facilitar a homogeneização do gradiente de temperatura. Para efetuar o condicionamento da amostra de cabo condutor no interior da bancada de aquecimento são utilizadas doze tampas com isolamento térmico, cada uma com 1 m de comprimento.

O sistema de aquecimento é constituído por 14 resistências blindadas, sendo 7 deles para cada lado da bancada. Essas resistências são divididas em 4 setores: o setor denominado alavanca contém um par de resistências situadas no lado do sistema de tração. O setor esticador contém um par de resistências situado na extremidade oposta ao setor alavanca, o setor intermediário possui dois pares de resistências (um par de resistências após a alavanca e um par de resistências após o esticador) e o setor central possui três pares de resistências situadas no centro da bancada. Cada setor possui um controlador individual de potência e 7 termopares do tipo “E” cuidadosamente localizados para fechar o laço de controle do sistema de aquecimento por indução. Os valores de temperatura medidos pelos termopares entram em uma fórmula com média ponderada, sendo que para cada controlador de potência um determinado termopar possui uma influência diferenciada. Existe a temperatura de cada setor, que é destinada ao controle e existe a temperatura global que é calculada baseada em uma média ponderada dos quatro setores, sendo este valor o utilizado para o controle de temperatura do condutor ensaiado.

Como o objetivo é analisar o comportamento de cada controlador, cada um dos quatro setores é

considerado isoladamente. Os detalhes da disposição das resistências no interior da bancada e seus respectivos setores são ilustrados nas Figs. 1 e 2.

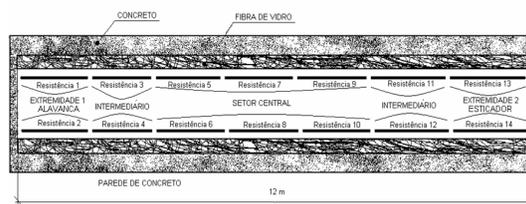


Fig. 1. Disposição das resistências no interior da bancada de ensaios.



Fig. 2. Foto da bancada de ensaios.

### 2.1. Controle do sistema de temperatura

Um computador (do tipo *desktop*) efetua o controle de temperatura por meio de algoritmos de controle digital. Um periférico é destinado à aquisição e envio de sinais de 16 bits usando 15 canais. Externamente ao computador, existe um condicionador de sinais com placas de recepção de sinais dos 7 termopares, 8 relés NA/NF, 8 canais de leitura de tensão/corrente, 6 canais de envio de tensão +/- 10V ou corrente 4 a 20 mA. Para o sistema de controle de temperatura são utilizados 7 canais de leitura de temperatura e envio de tensão para os quatro controladores de potência, sendo três monofásicos e um trifásico. A potência total demandada é de 10 kW, sendo esta distribuída em 14 resistências (10 resistências de 600 W e 4 resistências de 1000 W).

Com o *off-set* de temperatura, o controlador envia os sinais para o sistema de potência para que a temperatura da amostra atinja o valor desejado e assim se mantenha o tempo necessário até o final do ensaio ou ciclo. O tempo de amostragem adotado para cada um dos quatro controladores é de 14 s.

## 3 Projeto e Otimização do Controlador

O controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é flexível e possível de ser utilizado em várias configurações no meio industrial. O desempenho do controlador PID é determinado principalmente pela escolha de seus parâmetros e forma de estruturação.

Em processos complexos, onde os controladores PID de ganhos fixos apresentam um desempenho insatisfatório, uma abordagem possível é o uso de controladores PI (ou mesmo PID) adaptativos, os quais devem apresentar robustez para se “adaptar” diante de mudanças na dinâmica do processo ou na presença de perturbação.

A seguir é descrito o projeto de um controlador PI adaptativo indireto. Neste caso, um estimador (algoritmo dos mínimos quadrados) é utilizado para obter os parâmetros do processo a partir das medidas de entrada e saída e, a seguir, substitui-se os parâmetros pelos valores estimados, de forma recursiva. A partir dos parâmetros estimados do processo calcula-se os parâmetros do controlador.

A formulação adotada foi baseada na apresentada em Romão (1996), sendo que está foi baseada em Camacho *et al.* (1992).

Na técnica desenvolvida por Camacho *et al.* (1992), a estratégia de controle é PI e o comportamento de um processo contínuo é aproximado por uma função de transferência de primeira ordem com atraso de transporte ( $t_d$ ), isto é,

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-t_d s}}{t \cdot s + 1} \quad (1)$$

onde  $t$  é a constante de tempo,  $t_d$  é o atraso de transporte e  $K$  é o ganho. Para representar o processo, utiliza-se o modelo matemático *ARX (AutoRegressive with eXogenous input)* discreto, dado pela equação

$$G(q^{-1}) = q^{-2}(b_0 + b_1 q^{-1}) / (1 - a_1 q^{-1}) \quad (2)$$

e o controlador é projetado considerando a função de transferência discreta dada por

$$K(q^{-1}) = g_0(1 - g_2 q^{-1}) / (1 - q^{-1}) \quad (3)$$

onde  $g_0$  e  $g_2$  são os ganhos do controlador PI. Através da escolha do zero do controlador para cancelar o pólo do processo, isto é, escolhendo  $g_2 = a_1$ , o polinômio característico do sistema em malha fechada fica regido por

$$S(q^{-1}) = q^3 - q^2 + g_0 b_0 q + g_0 b_1 \quad (4)$$

Se o sistema em malha fechada apresenta um pólo dominante em  $z = A$ , então  $g_0$  é obtido por

$$g_0 = A^2(1 - A) / (b_0 A + b_1) \quad (5)$$

Assim, conhecendo-se os parâmetros  $a_1$ ,  $b_0$  e  $b_1$  do modelo discreto do processo (estimativas estas obtidas pelo algoritmo dos mínimos quadrados recursivo) obtém-se os ganhos do controlador,  $g_0$  e  $g_2$ . Estes ganhos são calculados para fornecer um comportamento dinâmico ao processo em malha fechada de acordo com o pólo dominante  $z = A$ .

Em síntese, o algoritmo para implementação dos controladores PI adaptativo (na forma desacoplada, por isto é apresentado o formalismo monovariável de projeto) é regido pelas seguintes etapas:

- (i) iniciar o contador de amostras em  $t = 1$ ;
- (ii) fornecer os parâmetros de projeto:  $\mathbf{q}(t) = [a(t) \ b_0(t) \ b_1(t)]$  (valores iniciais do estimador) e  $A$ ;
- (iii) estimar via mínimos quadrados recursivo os parâmetros da equação (2), ou seja,  $\mathbf{q}(t) = [a_1(t) \ b_0(t) \ b_1(t)]$ ;
- (iv) calcular  $g_0$  pela equação (5);
- (v) calcular e aplicar o sinal de controle obtido pela equação (3), obtendo a saída atual do processo;
- (vi) atualiza o contador de amostras  $t = t + 1$ ;
- (vii) retornar ao passo (ii) até que o número desejado de amostras coletadas do processo seja satisfeito.

### 3.2. Otimização do controlador adaptativo usando evolução diferencial

Os algoritmos evolucionários incluem algoritmos genéticos, programação evolucionária, estratégias evolutivas, programação genética, entre outras variantes. Dentre estes algoritmos evolucionários destaca-se o algoritmo de evolução diferencial. A evolução diferencial foi desenvolvida por Price e Storn (1995) visando uma busca por melhores resultados com uma abordagem um pouco diferente da utilizada nos algoritmos genéticos e em estratégias evolutivas. Algumas das potencialidades da evolução diferencial são: a rapidez de convergência, a facilidade de implementação e validação.

Basicamente, a evolução diferencial realiza mutações nos vetores pela adição ponderada de diferenças aleatórias entre eles. A escolha da evolução diferencial para problemas de otimização é baseada nas características de que:

- é um algoritmo de busca estocástica motivado pelos mecanismos de seleção natural;
- é menos susceptível a ótimos locais, pois busca a solução ótima global pela manipulação de uma população de soluções candidatas, ou seja, busca um número de diferentes áreas simultaneamente no espaço de busca;
- não requer informação de derivadas para o cálculo da função de aptidão;
- lida diretamente com números de ponto flutuante (representação fenotípica), diferente dos algoritmos genéticos canônicos (representação binária) que lidam com cadeias de bits (genótipo), o que diminui o custo computacional necessário para transformação de uma representação genotípica em uma fenotípica;
- geralmente não necessita de grandes populações para funcionar eficientemente.

## 4 Apresentação e Análise dos Resultados

O condutor submetido ao ensaio foi o CAA 636 MCM (Grosbeak). O condutor CAA 636 MCM (Grosbeak) é composto por 26 fios de alumínio (1350 – H19) com diâmetro 3,973 mm e 7 fios de aço de 3,089 mm, com seção transversal de total de 374,8 mm<sup>2</sup>, sendo 322,33 mm<sup>2</sup> de alumínio e 52,47 mm<sup>2</sup> de

aço. O valor da carga de ruptura do cabo é 110,38 kN. A capacidade de corrente do cabo é de 790 A, com uma temperatura ambiente de 25°C, temperatura do cabo de 75°C e vento de 1 m/s (com sol). O coeficiente de dilatação linear inicial deste cabo é  $18,4 \cdot 10^{-6}$  m/m°C e o coeficiente final é  $18,9 \cdot 10^{-6}$  m/m°C.

A preparação da bancada para o controle incluiu o ajuste de potência de cada um dos 4 setores de aquecimento. As faixas de operação dos controladores para as saídas da bancada, ou seja, as saídas da alavanca, esticador, intermediário e central são de 2 a 10, 2 a 5,5, 2 a 6,27 e 2 a 7,98 V respectivamente. Essas limitações foram consideradas tanto nos programas de simulação como nos programas de instrumentação.

No caso do projeto do controlador adaptativo, este foi dividido em três etapas.

- *etapa 1*: identificação do sistema de aquecimento usando modelos lineares de ordem reduzida e algoritmo dos mínimos quadrados em batelada;
- *etapa 2*: otimização dos parâmetros dos controladores adaptativos PI usando evolução diferencial e os modelos identificados na *etapa 1*;
- *etapa 3*: aplicação dos quatro controladores PI adaptativos otimizados em tempo real no sistema de aquecimento.

A seguir são mencionados os resultados da identificação da bancada de ensaios e após os resultados de simulação e experimentais no controle da bancada.

#### 4.1. Etapa 1: Identificação da bancada de ensaios

Para realizar os experimentos com os controladores otimizados por evolução diferencial, torna-se necessária a identificação das quatro saídas da bancada pelo algoritmo dos mínimos quadrados em batelada.

O modelo matemático adotado para representar o sistema foi o modelo linear ARX (*AutoRegressive with eXogenous inputs*) devido a sua simplicidade na representação matemática de processos. Neste contexto, o critério de informação de Akaike (a ser minimizado) foi adotado como critério de avaliação da qualidade do modelo obtido. Foram testados modelos de 1 a 10 ordem. Neste caso, as melhores equações a diferenças obtidas usando o critério de desempenho de Akaike para avaliar a identificação ARX através de mínimos quadrados em batelada foram os seguintes para os setores:

- alavanca:  $y(t) = 0,9964y(t-1) + 1,0646u(t-1) - 0,9870u(t-2)$
- central:  $y(t) = 0,9994y(t-1) + 0,0351u(t-1)$
- esticador:  $y(t) = 0,9978y(t-1) + 0,1153u(t-1)$
- intermediário:  $y(t) = 0,9964y(t-1) + 1,0646u(t-1) - 0,9870u(t-2)$ .

De posse das equações a diferenças, que representam a bancada de ensaios nos 4 setores da bancada de ensaios foi possível realizar as

simulações com a finalidade da determinação dos parâmetros dos 4 controladores PI adaptativos conforme mencionado na próxima seção.

#### 4.2. Etapa 2: Otimização dos controladores

Os resultados experimentais obtidos do sistema de aquecimento da bancada de ensaios do LACTEC foram para análise de comportamento servo e regulatório. Nos experimentos foram utilizadas três referências (saídas desejadas) de 80°C, 50°C e 140°C para  $y_{r1}(t)$ ,  $y_{r2}(t)$ ,  $y_{r3}(t)$ ,  $y_{r4}(t)$  na análise do comportamento servo.

Os parâmetros de configuração usados nas simulações foram de 100 gerações (critério de parada), 30 indivíduos (vetores solução), fator de mutação  $F=0,8$  e 20 experimentos para cada controlador PI otimizado.

Neste trabalho, a função *fitness* a ser maximizada usando ED é definida pelas seguintes equações:

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1) \quad (6)$$

$$fobj = \sum_{t=1}^N |e(t)| + 0,04 \cdot \sum_{t=1}^N \Delta u(t)^2 \quad (7)$$

$$fitness = \frac{100}{1 + fobj} \quad (8)$$

onde  $\Delta u(t)^2$  é a variação quadrática da saída do controlador entre a amostragem presente e a anterior. A variável *fobj* é denominada função objetivo (a ser minimizada) e é composta pelo somatório do valor absoluto erro da saída do processo e o somatório de  $\Delta u(t)$  elevado ao quadrado. Na Fig. 3 é mostrado um diagrama da otimização dos controladores PI adaptativos usando modelos matemáticos obtidos por identificação dos 4 setores da bancada de ensaios e otimização através da evolução diferencial.

Os resultados obtidos para os controladores PI adaptativos usando ED são resumidos nas Tabelas 1 e 2.

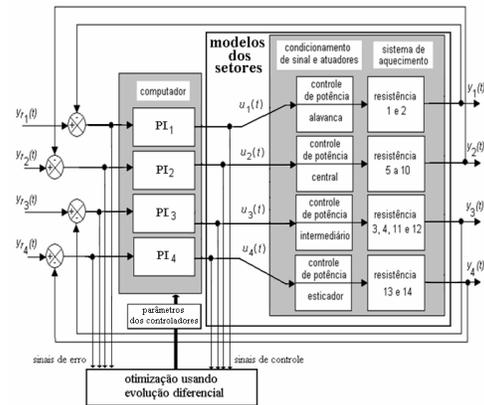


Fig. 3. Diagrama da otimização dos controladores usando modelos obtidos por identificação dos 4 setores da bancada de ensaios.

Tabela 1. Valores de *fitness* obtidos.

setor	<i>fitness</i> máximo	<i>fitness</i> médio	<i>fitness</i> mínimo
alavanca	0,5372	0,3554	0,2567
esticador	0,3863	0,3680	0,3614
intermediário	0,2248	0,2038	0,2031
central	0,1767	0,1708	0,1672

Tabela 2. Valores dos melhores parâmetros.

setor	A	$a_0(1)$	$b_0(1)$	$b_1(1)$
alavanca	0,9788	0,5357	1,0000	0,9887
esticador	0,9874	-1,0000	-0,8190	0,3248
intermediário	0,9923	1,0000	1,0000	0,4966
central	-0,0579	0,0269	1,0000	0,0903

### 4.3. Etapa 3: Validação experimental dos controladores na bancada de ensaios

Nesta etapa, os controladores otimizados são validados experimentalmente, conforme apresentado na Fig. 4.

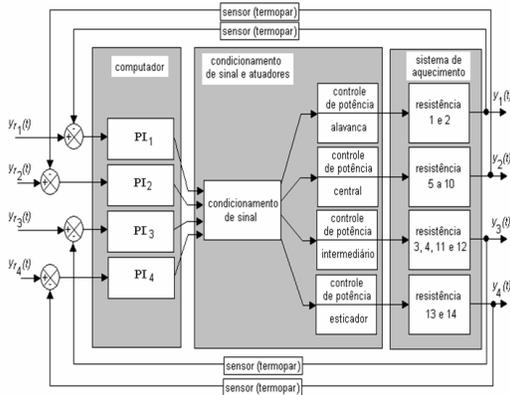


Fig. 4. Validação experimental dos controladores PI adaptativos na bancada de ensaios.

Nas Figs. 5 a 8 são apresentados os resultados de comportamento servo (seguimento de diferentes referências) para o controle PI adaptativo de temperatura da bancada de ensaios. Neste caso, os parâmetros da Tabela 2 foram utilizados.

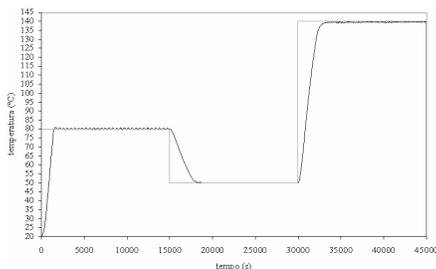


Fig. 5. Resultados de controle PI adaptativo do setor alavanca da bancada de ensaios (comportamento servo).

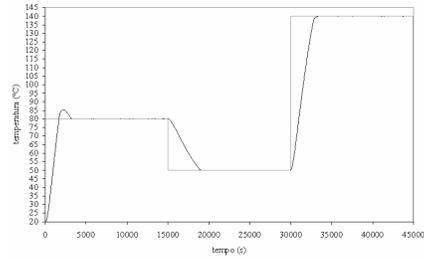


Fig. 6. Resultados de controle PI adaptativo do setor esticador da bancada de ensaios (comportamento servo).

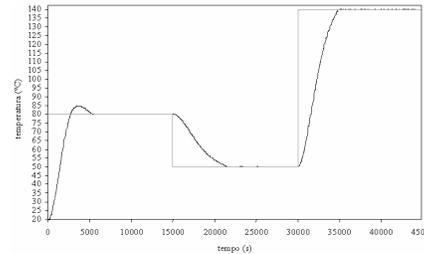


Fig. 7. Resultados de controle PI adaptativo do setor intermediário da bancada de ensaios (comportamento servo).

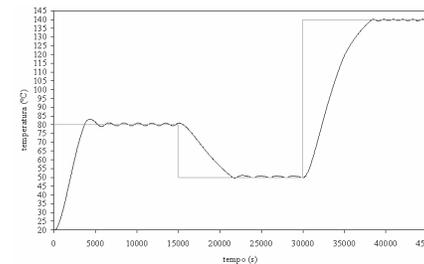


Fig. 8. Resultados de controle PI adaptativo do setor central da bancada de ensaios (comportamento servo).

Para gerar o distúrbio nos testes de validação dos controladores (comportamento regulatório), foi dado o tempo inicial de 9.000 s para o início do aquecimento do cabo condutor e estabilização da temperatura em 100 °C. O distúrbio é gerado abrindo-se as 12 tampas de isolamento térmico do cabo simultaneamente. Quando qualquer um dos setores da bancada apresentasse um temperatura próxima de 80°C, todas as tampas seriam fechadas simultaneamente. O teste de validação de controlador foi finalizado aos 15.000 s, tempo suficiente para a verificação do comportamento de cada controlador após o distúrbio. Nas Figs. 9 a 12 são mostrados os resultados para comportamento regulatório, dos projetos de controle PI adaptativo apresentados na Tabela 2.

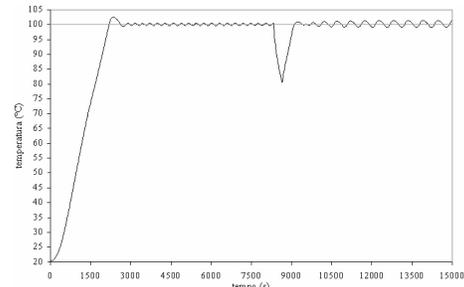


Fig. 9. Resultados de controle PI adaptativo do setor alavanca da bancada de ensaios (comportamento regulatório).

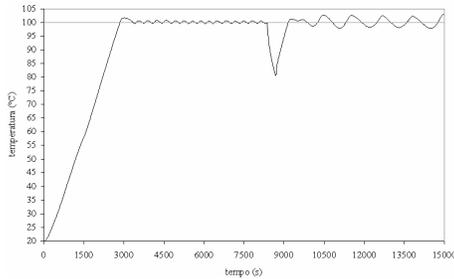


Fig. 10. Resultados de controle PI adaptativo do setor esticador da bancada de ensaios (comportamento regulatório).

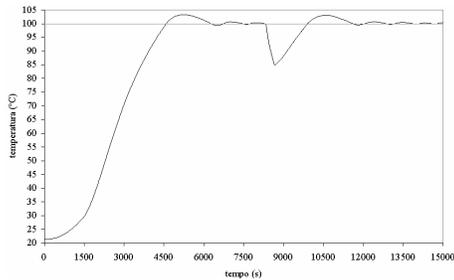


Fig. 11. Resultados de controle PI adaptativo do setor intermediário da bancada de ensaios (comportamento regulatório).

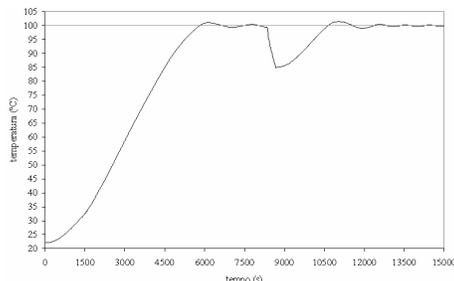


Fig. 12. Resultados de controle PI adaptativo do setor central da bancada de ensaios (comportamento regulatório).

## 5 Conclusão

Este trabalho apresentou um projeto de sistema de controle adaptativo para um sistema de aquecimento (sistema multivariável que apresenta 4 entradas e 4 saídas) desenvolvido pelo LACTEC, destinado à prestação de serviços vinculados a ensaios de cabos e acessórios de linhas de distribuição e transmissão de energia elétrica. No estudo de caso abordado, neste trabalho, as variáveis de controle (controle usando modulação em largura de pulso) e as saídas do sistema de aquecimento da bancada de ensaios foram mantidas sob rigoroso controle durante todo o ensaio, além também das variáveis de controle de amplitude de vibração e carga mecânica que não foram abordadas neste artigo.

Neste contexto foi utilizada, com sucesso, uma abordagem de controle PI adaptativo desacoplado multivariável baseado em identificação linear e otimização de parâmetros através de evolução diferencial.

Os resultados dos ensaios e experimentos práticos mostraram resultados animadores. Neste caso, os

erros, ruídos e imprecisões presentes antes da automação do sistema foram reduzidos, acrescentando qualidade e previsibilidade dos experimentos com a bancada de ensaios.

Futura pesquisa visará um estudo comparativo de abordagens de controle PID adaptativo e métodos clássicos de controle PID para a bancada de ensaios. Neste contexto, resultados da sintonia de controladores PID pelo método de Ziegler-Nichols para a bancada de ensaios são apresentados em Coelho e Mannala (2005).

## Agradecimentos

A infra-estrutura fornecida pelo LACTEC para o desenvolvimento deste projeto.

## Referências Bibliográficas

- Camacho, E. F., Rubio, F. R. e Hughes, F. M. (1992). Self-tuning control of a solar power plant with a distributed collector field, *IEEE Control Systems*, **12**(2): 72-78.
- Coelho, L. S. e Mannala, M. J. (2005). Sintonia de controladores PID baseada em evolução diferencial aplicada à automação de ensaios em cabos condutores de energia elétrica, *Learning and Nonlinear Models*, **3**(2): 71-83.
- Mannala, M. J. (2004). *Projetos de controle convencional e adaptativo aplicados ao sistema térmico de uma bancada de ensaios de cabos condutores*, Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, PUCPR, Curitiba, Paraná, 2004.
- Romão, W. (1996). *Análise e projeto de controladores PID adaptativos baseados em estimação de parâmetros: um estudo de caso*, Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Ciência da Computação, UFSC, Florianópolis, SC.
- Storn, R. e Price, K. (1995). Differential evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces, *Technical Report TR-95-012*, International Computer Science Institute, Berkeley, CA, USA.