

SINTONIA DE CONTROLADORES PID BASEADA EM EVOLUÇÃO DIFERENCIAL APLICADA À AUTOMAÇÃO DE ENSAIOS EM CABOS CONDUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA

Leandro dos Santos Coelho¹ e Marcos José Mannala²

¹Laboratório de Automação e Sistemas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)
Grupo Produtrônica, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Rua Imaculada Conceição, 1155
80215-901, Curitiba, PR, Brasil, e-mail: leandro.coelho@pucpr.br
homepage: <http://www.produtronica.pucpr.br/leandro>

²LACTEC, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Centro Politécnico da UFPR
Caixa Postal 19067, CEP 81531-980, Curitiba, PR
e-mail: mannala@lactec.org.br

Resumo - A automação dos ensaios normalizados é necessária para ensaios em cabos e acessórios de linhas de transmissão e linhas de distribuição de energia elétrica. Este artigo apresenta uma abordagem de controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo) em uma concepção desacoplada e multivariável para o controle de temperatura no ensaio de um cabo do tipo CAA 636 MCM (Grosbeak). A otimização dos ganhos dos controladores PID é fundamentada em identificação de sistemas e otimização por Evolução Diferencial (ED). A ED é um paradigma da computação evolucionária (evolutiva) e é uma abordagem promissora na solução de problemas de otimização contínua. Uma vantagem é que a ED é conceitualmente simples e de fácil implementação, com poucos parâmetros a serem ajustados para a sua aplicação. Os resultados experimentais para o controle de um sistema de temperatura mostraram a eficiência, robustez e flexibilidade da metodologia de projeto e otimização analisadas.

Palavras-chave - automação de ensaios, controle multivariável, controle PID, evolução diferencial, otimização.

1. Introd

A automação de ensaios normalizados é necessária e tem mostrado-se eficaz 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 [1].

Poucos são os laboratórios que realizam ensaios em condutores e acessórios de forma automatizada. A tração dos condutores, por exemplo, é realizada com a utilização da gravidade através de pesos e braços tensores nessas bancadas. Neste contexto, o sistema projetado pelo LACTEC (Curitiba, PR) estabelece taxas de carregamento no corpo ensaiado (kN/min), cargas cíclicas, carga-mantida, carregamento com hora marcada e degraus de trações em períodos pré-estabelecidos entre outras modalidades interessantes.

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 90, 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.

Em 1996, o equipamento recebeu equipamentos eletrônicos de controle mais modernos, amplificadores de sinais para os transdutores, sistema modular de controle da National Instruments, células de carga HBM e o *software* LabVIEWTM.

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 PID (Proporcional, Integral e Derivativo).

A maioria dos problemas de controle de processos na indústria eletro-mecânica é resolvido satisfatoriamente por estratégias convencionais de controle PID. Um motivo é que o controle PID possui estrutura simples e eficiente. O controle PID tem sido bem sucedido no controle de processos industriais desde os anos 40 e usado em cerca de 95% dos processos industriais [2]. Os segmentos da indústria beneficiados pelo controle PID incluem o setor petrolífero, de geração de energia, indústrias automotivas, alimentícias, entre outras. Quando os sistemas industriais possuem os parâmetros do processo com pequena variação no decorrer do tempo, não são necessários ajustes freqüentes dos ganhos deste tipo de controlador. Os processos que possuem um comportamento linear geralmente não exigem controladores com estrutura complexa para atender às necessidades de desempenho do projeto [3].

Neste trabalho, o objetivo da otimização é determinar os ganhos proporcional, integral e derivativo de controladores PID desacoplados visando um desempenho satisfatório do sistema de controle em malha fechada. Esses ganhos são usualmente calculados baseados em critérios de minimização do erro em regime permanente, tempo de estabilização e tempo de resposta. Além disso, a sintonia de um controlador deve prover comportamento estável no decorrer do tempo. Na prática, é difícil atingir todos os critérios mencionados de forma simultânea. Neste contexto, muitos métodos de sintonia utilizando malha-simples e ou multi-malhas para sintonia dos ganhos do controlador do tipo PID estão disponíveis na literatura, tais como técnicas de Ziegler-Nichols, Cohen e Coon, técnicas de análise e sintonia no domínio da freqüência, técnicas de sintonia baseadas no relé, entre outras técnicas de sintonia [4].

Uma alternativa a estas técnicas é a utilização de métodos de otimização para a sintonia de controladores PID. Neste contexto, o projeto de controladores do tipo PID utilizando otimização através de algoritmos evolutivos (ou evolucionários) para o controle de processos apresenta diversos trabalhos publicados na literatura. Entretanto, na maioria os controladores PID são: (i) validados usando somente simulação computacional, (ii) projetos de controladores monovariáveis, e (iii) usam algoritmos genéticos na otimização dos ganhos de um controlador PID. Neste contexto, deve-se mencionar os trabalhos recentes de Chang [5], Popov *et al.* [6], Tan *et al.* [7], Cao *et al.* [8], Kim e Cho [9], Lin *et al.* [10], Sakaguchi e Yamamoto [11], Wang *et al.* [12], Visioli [13], Ismail e Bedwani [14], Krohling e Rey [15] e Colins e Zhao [16].

A contribuição deste artigo é apresentar o projeto de controladores PID desacoplados otimizados através de um procedimento de identificação de sistemas [17] realizado *off-line* (modelo matemático do processo obtido *a priori* através do método dos mínimos quadrados em batelada) e um algoritmo evolucionário denominado evolução diferencial [18], [19]. Resumindo, para a concretização da análise e projeto dos sistemas de controle as seguintes etapas foram obedecidas: (i) identificação do processo através do método dos mínimos quadrados em batelada, (ii) obtenção dos parâmetros do controlador através da otimização por evolução diferencial usando ambiente computacional Matlab[®] (de forma *off-line*), da MathWorks, e (iii) avaliação dos controladores no processo real (de forma *on-line*) e cálculo dos índices de desempenho obtidos pelo sistema de controle em malha fechada.

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. Estas abordagens foram implementadas em ambiente computacional LabVIEW[™], da National Instruments. O LabVIEW[™] é uma poderosa ferramenta voltada á instrumentação e prototipagem, com uma interface amigável e robusta, diminuindo de forma acentuada o tempo gasto em desenvolvimento e depuração do código computacional.

O restante do artigo está dividido nas seguintes seções. Na seção 2 é apresentada a descrição do sistema de aquecimento da bancada de ensaios desenvolvida no LACTEC. O projeto dos controladores PID é descrito na seção 3. Os resultados obtidos no controle do processo de temperatura são mencionados na seção 4. A conclusão e perspectivas de pesquisa futura são discutidos 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 lâ 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 na figura 1.

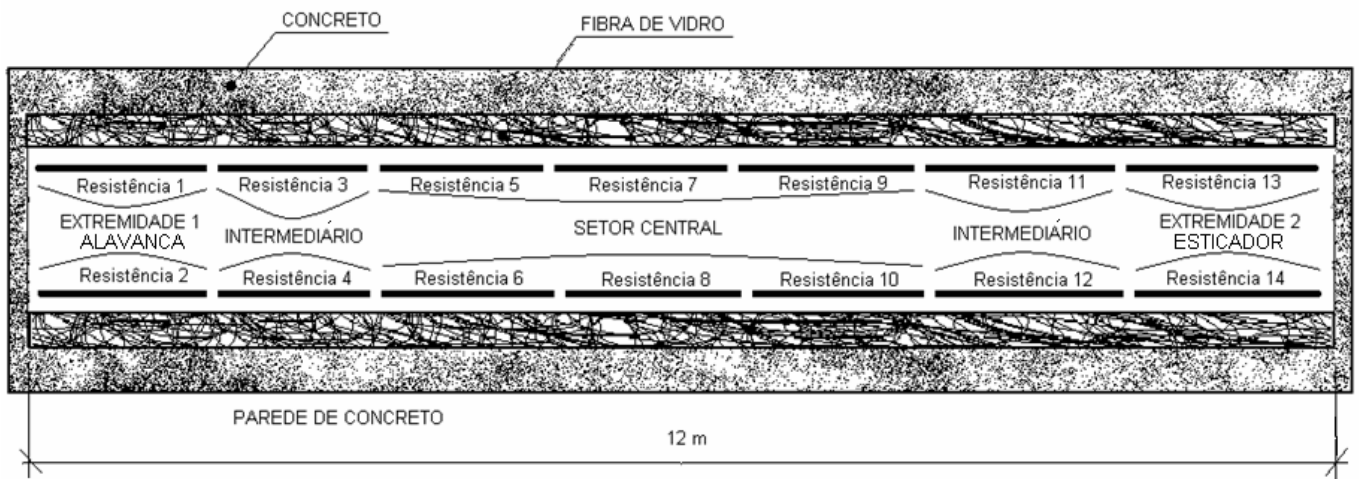


Figura 1. Disposição das resistências no interior da bancada de ensaios.

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 20mA. 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 dos controladores PID

3.1. Lei de controle PID

A sintonia dos ganhos de um PID convencional é geralmente um procedimento subjetivo e heurístico, muitas vezes confiado à experiência do operador do processo. Este tipo de ajuste pode consumir excessivo tempo, energia e material, além de não se conseguir resultados satisfatórios em todas as faixas de operação do processo, devido à limitação de desempenho do procedimento empreendido em tais ajustes.

Muitos métodos de otimização estocástica baseados nos princípios e modelos da evolução biológica natural têm recebido crescente interesse nas últimas décadas, devido, principalmente, a sua versatilidade para a resolução de problemas complexos em Engenharia. Nos últimos anos, diversas pesquisas [5]-[16] têm sido relatadas quanto ao desenvolvimento de métodos de otimização de controladores usando algoritmos evolutivos, principalmente os algoritmos genéticos. Neste artigo é abordada a otimização dos quatro controladores do tipo PID, na forma desacoplada, usando otimização por evolução diferencial [18], [19].

A lei de controle PID digital para controle multivariável desacoplado adotada, neste trabalho, é dada pela equação a diferenças:

$$u_i(t) = u_i(t-1) + q_{o,i}e_i(t) + q_{1,i}e_i(t-1) + q_{2,i}e_i(t-2), \quad (1)$$

com valores das variáveis,

$$q_{0,i} = K_{p,i} \left(1 + \frac{T_s}{2T_{i,i}} + \frac{T_{d,i}}{T_s} \right), \quad (2)$$

$$q_{1,i} = -K_{p,i} \left(1 + \frac{2T_{d,i}}{T_s} - \frac{T_s}{2T_{i,i}} \right), \quad (3)$$

$$q_{2,i} = K_{p,i} \frac{T_{d,i}}{T_s}, \quad (4)$$

onde $i=1,\dots,n$, o sinal de controle $u_i(t) \in [0; 10]$ volts, T_s é o período de amostragem (adotado 14 s), $e_i(t)$ é o erro dado pela diferença entre a saída i do sistema de aquecimento e a referência de temperatura desejada i , e a variável $y_i(t)$ é a saída i do sistema de aquecimento, $K_{p,i}$ é o ganho proporcional, $T_{i,i}$ é o tempo integral e $T_{d,i}$ é o tempo derivativo do i -ésimo controlador. A seguir são apresentados os fundamentos da evolução diferencial, esta uma abordagem emergente de algoritmo evolucionário (ou evolutivo) para sintonia dos ganhos de controladores do tipo PID.

3.2. Otimização dos ganhos do PID baseada em evolução diferencial

Os algoritmos evolucionários são ferramentas promissoras para busca, otimização, aprendizado de máquina e para resolução de problemas de projeto. Estes algoritmos utilizam a evolução simulada para busca por soluções para problemas complexos [20], [21]. Os algoritmos evolucionários são baseados em uma população de indivíduos, onde cada um representa um ponto de busca no espaço de soluções potenciais de um dado problema. Os algoritmos evolucionários possuem alguns procedimentos de seleção baseados na aptidão (*fitness*) dos indivíduos mais aptos, operadores de cruzamento (*crossover*) e mutação.

Os algoritmos evolucionários incluem algoritmos genéticos, programação evolucionária, estratégias evolutivas, programação genética, entre outras variantes [20]. Dentre estes algoritmos evolucionários destaca-se o algoritmo de evolução diferencial. A evolução diferencial foi desenvolvida por Price e Storn [18], [19] visando a 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 (ED) 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 [22], [23]:

- é um algoritmo de busca estocástica motivado pelos mecanismos de seleção natural;
- é menos susceptível a mínimos (ou máximos) 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.

Na evolução diferencial adotada para otimização dos parâmetros dos controladores PID, cada variável ou indivíduo ($K_{p,i}$; $T_{i,i}$; $T_{d,i}$ onde $i=1,\dots,4$) é representado por um valor real (ponto flutuante) e o seu procedimento de otimização é regido pelas seguintes etapas [19], [23]-[25]:

- (i) gerar uma população inicial aleatória, com distribuição uniforme, de soluções factíveis à resolução do problema em questão, onde é garantido por regras de “reparo” que os valores atribuídos às variáveis estão dentro das fronteiras delimitadas pelo projetista;
- (ii) um indivíduo é selecionado, de forma aleatória, para ser substituído e outros três diferentes indivíduos são selecionados como genitores (pais);
- (iii) um destes três indivíduos é selecionado como genitor principal;
- (iv) com alguma probabilidade, cada variável do genitor principal é modificada. Neste caso, pelo menos uma variável deve ser alterada;
- (v) a modificação é realizada adicionando ao valor atual da variável um fator de mutação, F , e é regida pela diferença entre dois valores desta variável nos outros dois genitores. Em síntese, o vetor denominado genitor principal é modificado baseado

no vetor de variáveis de dois outros genitores. Este procedimento representa o operador de cruzamento na evolução diferencial;

(vi) se o vetor resultante apresenta uma função de aptidão (*fitness*) melhor (escolhida como sendo a soma do erro médio quadrático das quatro saídas do processo em relação aos sinais de referência) que o escolhido à substituição, ele o substitui; caso contrário, o vetor escolhido para ser substituído é mantido na população.

(viii) ir para a etapa (ii) até que um critério de parada (neste trabalho foi adotado um número máximo de gerações) seja satisfeito.

4. Apresentação e análise dos resultados numéricos

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 mm², sendo 322,33 mm² de alumínio e 52,47 mm² 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 18,4·10⁻⁶ m/m°C e o coeficiente final é 18,9·10⁻⁶ 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 dos controladores PID desacoplados, 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 quatro controladores PID desacoplados usando evolução diferencial e os modelos identificados na etapa 1;
- etapa 3: validação dos quatro controladores PID otimizados quando aplicados aos modelos matemáticos identificados; e
- etapa 4: aplicação dos quatro controladores PID 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. No modelo ARX, a função de transferência do processo pode ser representada por:

$$A(q^{-1})y(t) = z^{-d} B(q^{-1})u(t), \quad (5)$$

onde d é o atraso de transporte, $y(t)$ é o sinal de saída do processo, $u(t)$ é o sinal de entrada (ação de controle). Os polinômios $A(q^{-1})$ e $B(q^{-1})$, relacionados aos pólos e zeros de malha aberta do processo, respectivamente, são da forma [26]

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad (6)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{nb} q^{-nb} \quad (7)$$

onde na e nb representam, respectivamente, as ordens dos polinômios $A(q^{-1})$ e $B(q^{-1})$ do modelo ARX. Neste modelo, a correspondente equação a diferenças do processo é

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - a_2 y(t-2) - \dots - a_{na} y(t-na) + b_0 u(t-d) + b_1 u(t-d-1) + b_2 u(t-d-2) + \dots + b_{nb} u(t-d-nb) \quad (8)$$

onde t representa n instantes de amostragem $n \cdot T_s$, onde T_s é o período de amostragem adotado.

Para obtenção dos parâmetros foi utilizada uma sintonia heurística de quatro controladores PID, para fins de aquisição dos dados de para referências de 50°C, 80°C e 140°C. Foram realizadas 2783 aquisições de dados de temperatura (alavanca, esticador, intermediário e central) juntamente com valor de tensão na entrada de cada um deles. Após a aquisição de dados, foi aplicado o algoritmo de mínimos quadrados em batelada e determinado o modelo ARX baseado na minimização de um critério de desempenho.

Neste caso, para determinar uma estimativa “ótima” é necessário definir uma função custo que minimize um índice de desempenho. Este índice é uma medida quantitativa do desempenho do estimador, medindo o desvio do valor estimado em relação ao valor real. Para avaliação dos parâmetros identificados, dois critérios de avaliação de custo, o *MSE* (*Mean Squared Error* ou média do erro quadrático) [17], [26] e o critério de Akaike (*AIC*) [27] são avaliados (tabela 1), conforme fundamentação matemática apresentada a seguir.

- *MSE*: Erro médio quadrático:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [y(t) - \hat{y}(t)]^2, \quad (9)$$

onde N é o número de amostras, $y(t)$ é o valor da saída no instante t , e $\hat{y}(t)$ o valor da saída estimada no instante t .

- *AIC*: O critério de informação é utilizado para estimar o número de termos em modelos dinâmicos. De acordo com o critério, o número ótimo de termos deve minimizar a seguinte função de custo:

$$AIC = N \cdot \log[Var(\xi)] + w \cdot n_p, \quad (10)$$

onde $Var(\xi)$ é a variância do sinal de erro, w é uma ponderação atribuída a n_p pelo projetista, e n_p é o número de parâmetros do modelo estimado.

Tabela 1: Parâmetros obtidos por identificação de sistemas para a bancada de ensaios.

Setor da bancada	Ordem (n_a, n_b) com menor função custo		Função custo	
	(n_a, n_b) <i>AIC</i>	(n_a, n_b) <i>MSE</i>	<i>MSE</i>	<i>AIC</i>
alavanca	(1, 2)	(10, 10)	0,1542	-2507,7525
central	(1, 1)	(10, 10)	0,2980	-1642,5424
intermediário	(1, 2)	(10, 10)	0,1908	-2257,1117
esticador	(1, 1)	(10, 10)	0,2416	-1940,2717

Pelo critério *MSE* foi obtida sempre a maior ordem para a representação ARX do processo. Em contrapartida, o critério de *AIC* estabelece uma penalidade em relação a modelos de ordem elevada. Na equação (10) foi atribuída uma ponderação w ao número de parâmetros estimados (n_p) igual a 8. Por este critério a maior equação a diferenças obtida para o modelo ARX foi de segunda ordem. Neste caso, as melhores equações a diferenças obtidas usando critérios de desempenho *MSE* e *AIC* para avaliar a identificação ARX através de mínimos quadrados em batelada [26] 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 ganhos dos 4 controladores do tipo PID, conforme será mencionado na próxima seção.

4.2. Etapa 2: Otimização dos ganhos dos controladores PID

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 obtidos para $K_{p,i}$, $T_{i,i}$ e $T_{d,i}$, $i=1,\dots,4$, usando evolução diferencial são resumidos na tabela 1. 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 PID otimizado.

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

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t-1) \quad (11)$$

$$fobj = \sum_{t=1}^N |e(t)| + 0,04 \cdot \sum_{t=1}^N \Delta u(t)^2 \quad (12)$$

$$fitness = \frac{k}{1 + fobj} \quad (13)$$

O valor da constante k deve possuir um valor que limite o *fitness* entre 0 e 1. A variável $\Delta u(t)^2$ é a variação quadrática da saída do controlador entre a amostragem presente e a anterior. A variável *fobj* é denominada função objetivo, composto pela somatória do valor absoluto erro da saída do processo e o somatório de $\Delta u(t)$ elevado ao quadrado. O espaço de busca adotado para os ganhos foi $0 \leq K_{p,i} \leq 15$; $0,00001 \leq T_{i,i} \leq 15$ e $0 \leq T_{d,i} \leq 15$, para $i=1,\dots,4$ setores. Na figura 2 é mostrado um diagrama da otimização dos controladores PID usando modelos matemáticos obtidos por identificação dos 4 setores da bancada de ensaios e otimização através da ED.

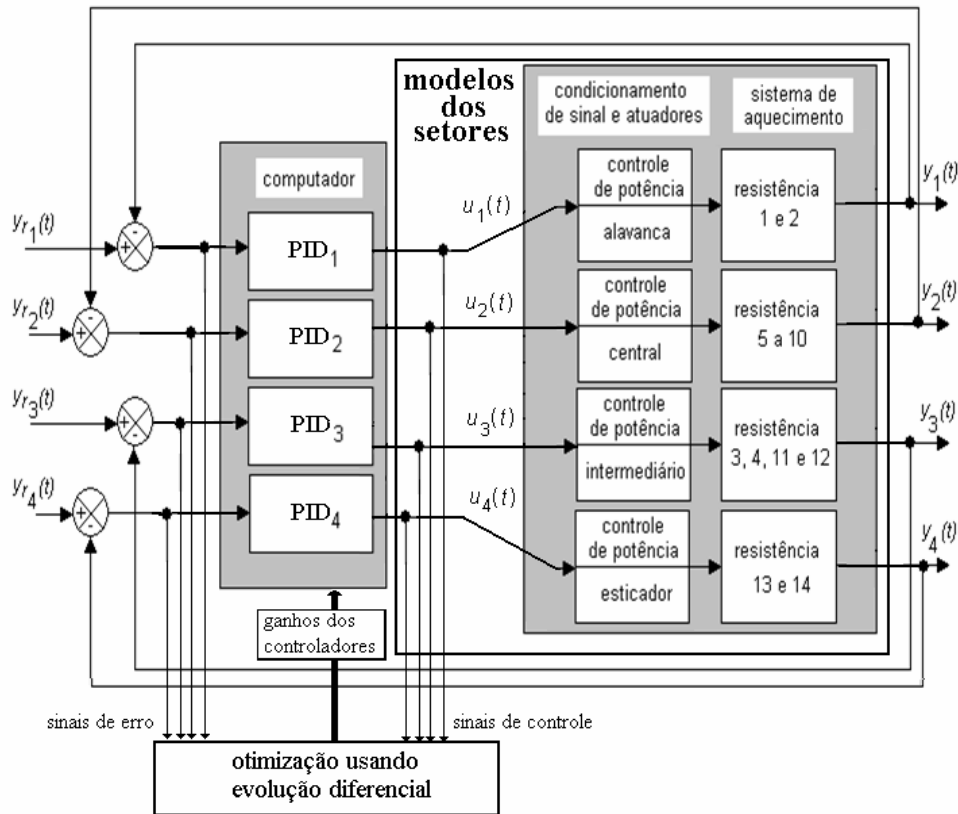


Figura 2. Diagrama da otimização dos controladores PID usando modelos matemáticos obtidos por identificação dos 4 setores da bancada de ensaios.

4.3. Etapa 3: Resultados de simulação (ganhos dos controladores PID obtidos por ED)

Os resultados obtidos após a realização de 20 experimentos estão apresentados na tabela 2. A seguir são apresentados os resultados da simulação do PID convencional com os controladores dos 4 setores, ou seja, alavanca, central, intermediário e esticador. Neste caso, os resultados de simulação do melhor projeto obtidos através de ED de acordo com os ganhos dos controladores PID (estes mostrados na tabela 2) são apresentados nas figuras 3 a 6.

Tabela 2: Resultados da otimização dos controladores PID usando ED (simulação).

Setor	Índice i	Controlador	Fitness			Melhor ganhos obtidos para os controladores PID		
			máximo	médio	mínimo	$K_{p,i}$	$T_{i,i}$	$T_{d,i}$
alavanca	1	PID ₁	0,5493	0,5493	0,5493	0,5241	6,9579	0,0000
central	2	PID ₂	0,5553	0,5547	0,5543	6,9895	10,9970	3,7170
intermediário	3	PID ₃	0,2103	0,2100	0,2097	3,0040	6,4678	6,0477
esticador	4	PID ₄	0,3905	0,3890	0,3883	9,2932	13,7726	0,1657

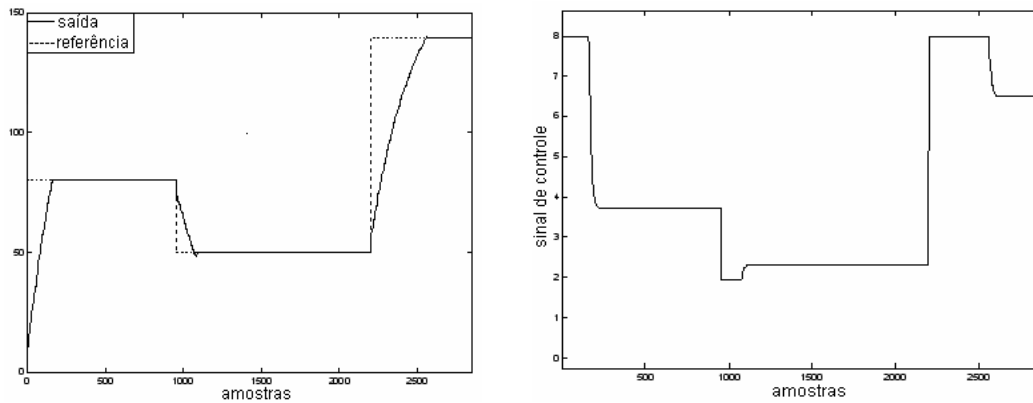


Figura 3. Simulação do setor alavanca da bancada de ensaios usando controle PID₁ com otimização via ED.

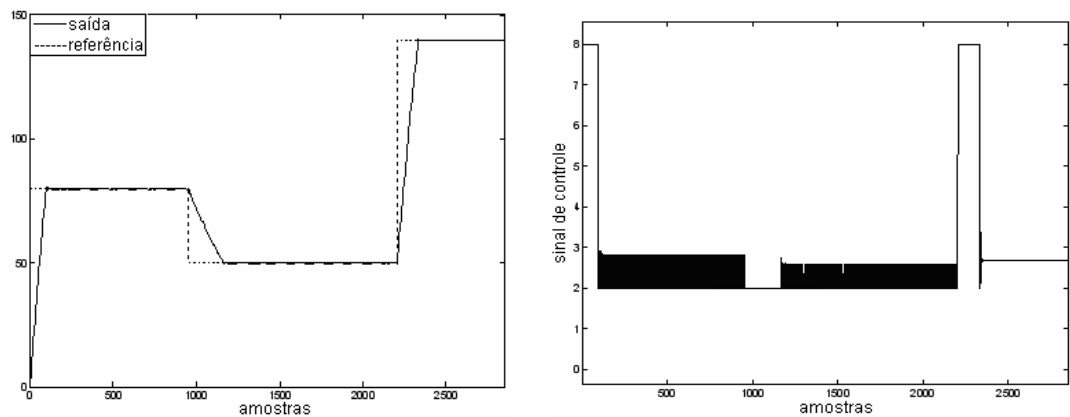


Figura 4. Simulação do setor central da bancada de ensaios usando controle PID₂ com otimização via ED.

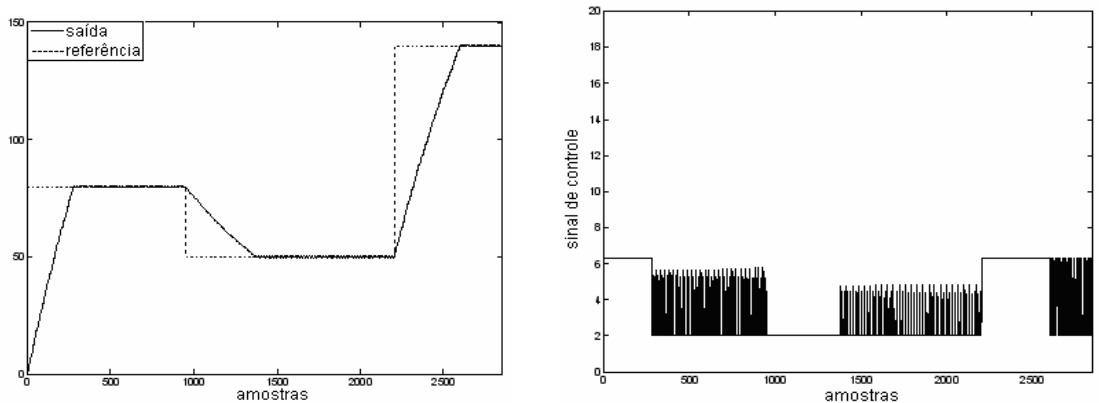


Figura 5. Simulação do setor intermediário da bancada de ensaios usando controle PID₃ com otimização via ED.

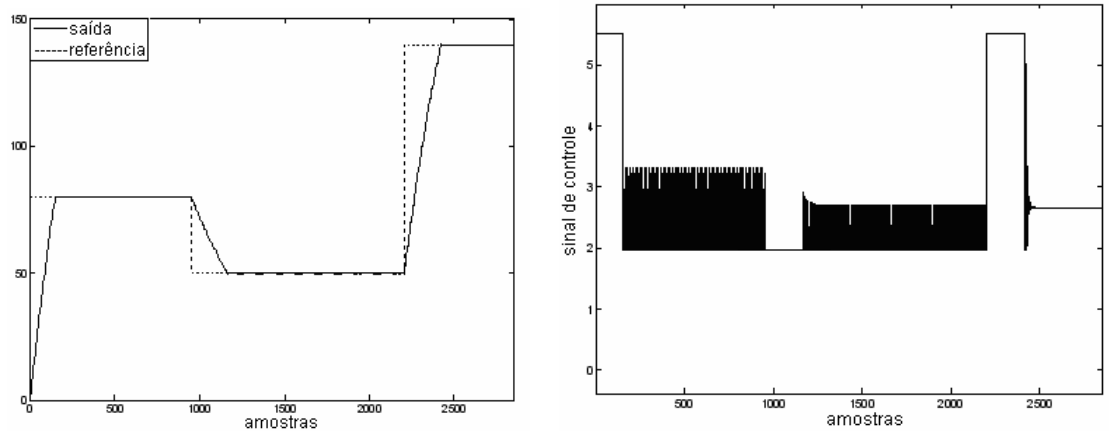


Figura 6. Simulação do setor esticador da bancada de ensaios usando controle PID₄ com otimização via ED.

4.4. Etapa 4: Validação experimental dos controladores na bancada de ensaios

Para efeito de um comparativo da abordagem de otimização usando ED em relação a uma técnica clássica de sintonia denominada de método de Ziegler-Nichols. Na tabela 3 é apresentado o resultado de sintonia dos controladores PID usando o método em malha aberta de Ziegler-Nichols [28]. 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 $K_{\text{crítico}}$ e no período crítico $P_{\text{crítico}}$. Os detalhes da aplicação deste método clássico podem ser encontrados em [29]. Neste contexto, nota-se pela tabela 3 que os ganhos obtidos pelo método de Ziegler-Nichols são diferentes aos obtidos por otimização baseada em ED (apresentados na tabela 2).

Tabela 3: Resultados da sintonia dos parâmetros dos PID's usando método de Ziegler-Nichols em malha aberta.

Setor	Índice i	Controlador	Ganhos obtidos para os controladores PID		
			$K_{p,i}$	$K_{p,i}$	$K_{p,i}$
alavanca	1	PID ₁	12,8000	12,8000	12,8000
central	2	PID ₂	10,6200	10,6200	10,6200
intermediário	3	PID ₃	10,2500	10,2500	10,2500
esticador	4	PID ₄	23,8000	23,8000	23,8000

Na figura 7 é apresentada uma representação do controle em malha fechada do sistema de aquecimento da bancada de ensaios. As figuras dos resultados do sinal gerado pelos controladores PID desacoplados e as saídas do processo quando aplicados ao sistema real de aquecimento da bancada de ensaios são apresentadas nas figuras 8 a 11. Nas figuras 8 a 11, os resultados dos PID's otimizados por ED e também os resultados obtidos pelos PID's usando o método de Ziegler-Nichols são apresentados.

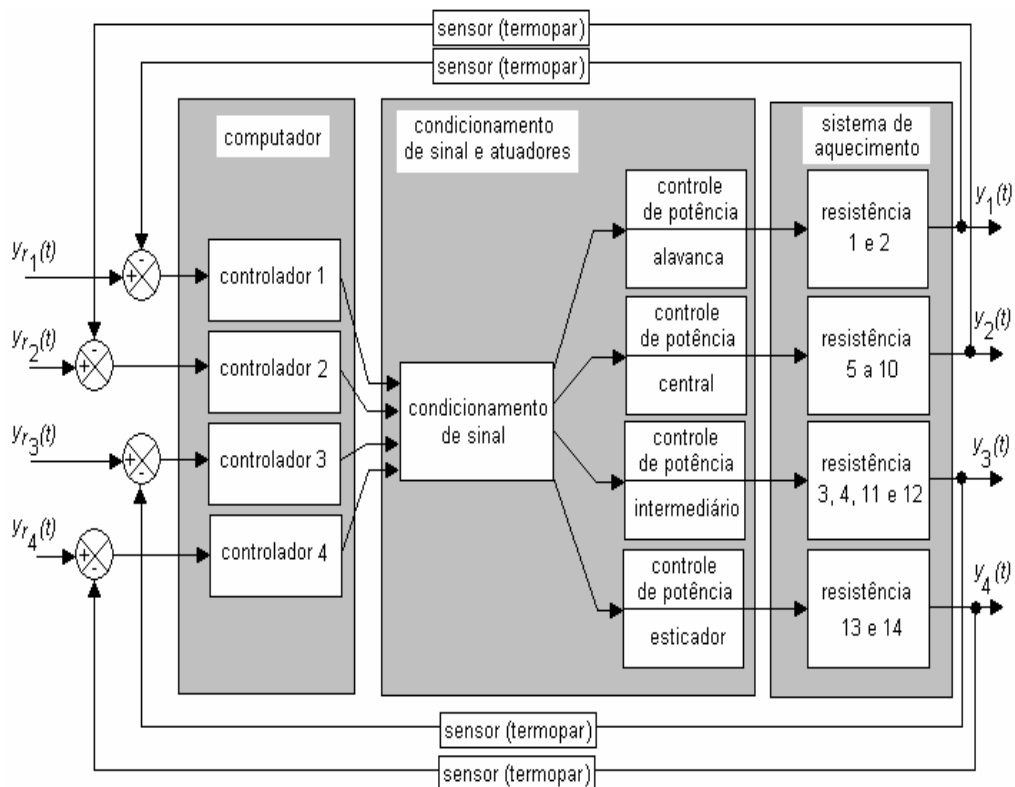


Figura 7. Diagrama do sistema de controle desacoplado multivariável para o sistema de aquecimento.

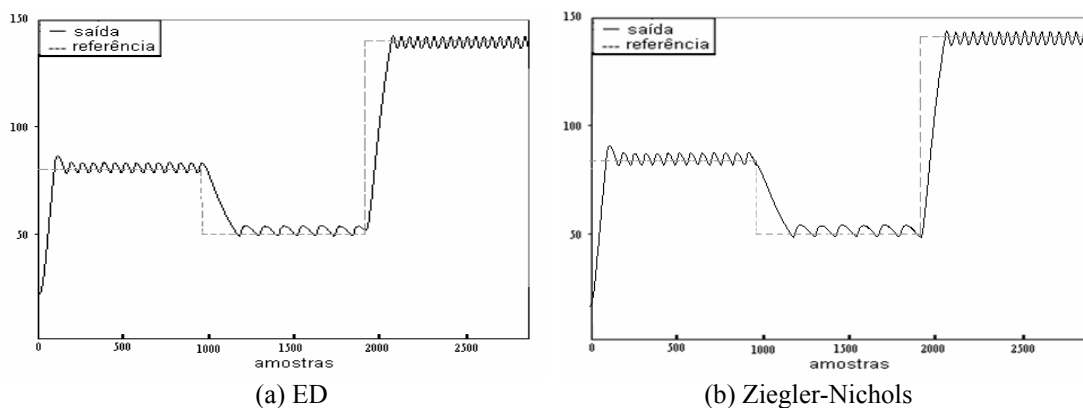


Figura 8. Resultado experimental do setor alavanca da bancada de ensaios usando controle PID₁.

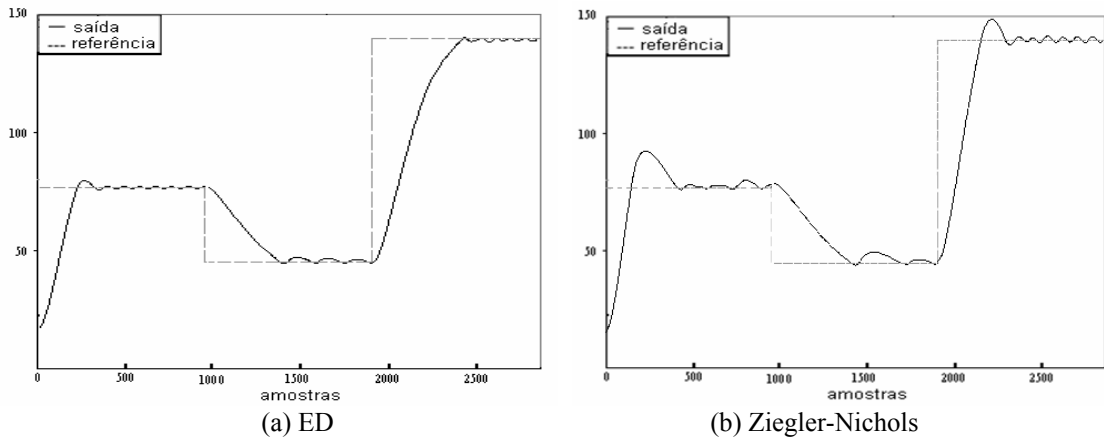


Figura 9. Resultado experimental do setor central da bancada de ensaios usando controle PID_2 .

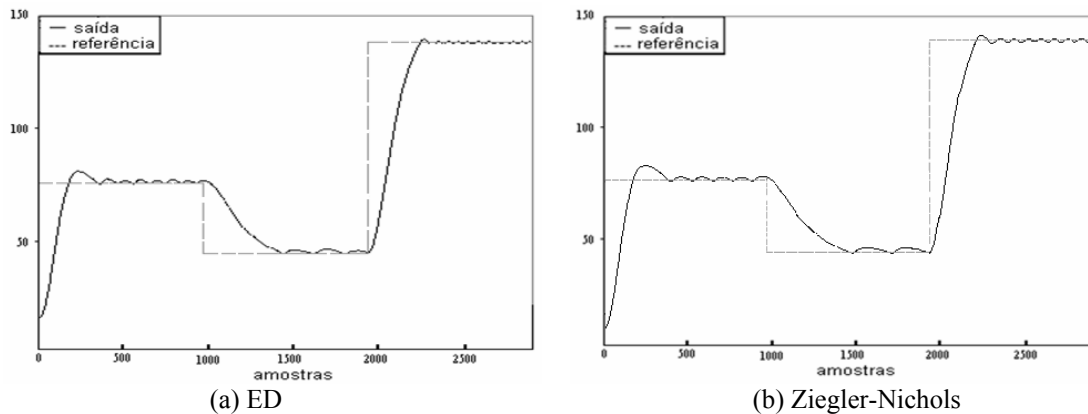


Figura 10. Resultado experimental do setor intermediário da bancada de ensaios usando controle PID_3 .

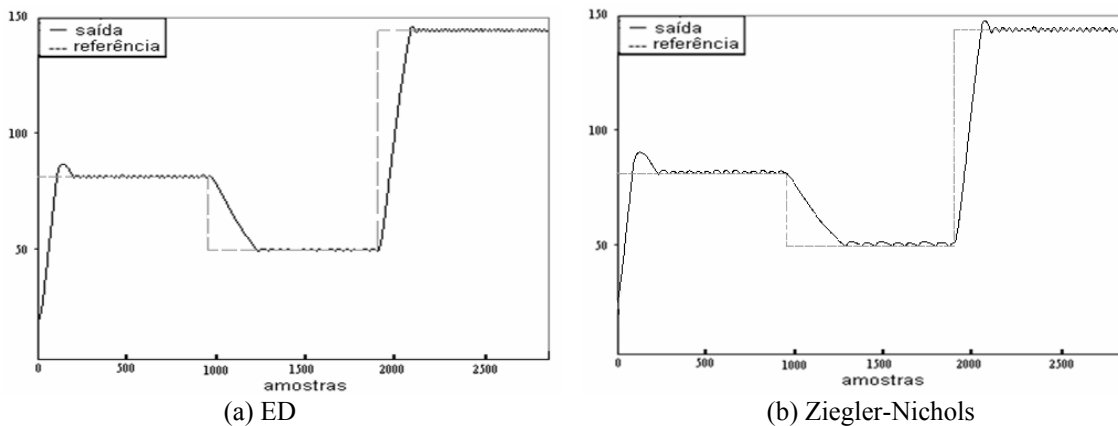


Figura 11. Resultado experimental do setor esticador da bancada de ensaios usando controle PID_4 .

Pelos resultados apresentados nas figuras 8 a 11, observa-se que o controlador PID otimizado por ED obteve desempenho superior ao PID sintonizado por Ziegler-Nichols para o setor central (controle PID_2) e o setor esticador (controle PID_4) da bancada de ensaios obtendo um comportamento menos oscilatório da saída.

O comportamento da saída dos processos reais (4 setores) real e simulados (para obtenção dos controladores PID usando ED e identificação) apresentaram diferenças. Apesar dos controladores terem funcionado, a maioria deles apresentaram um comportamento liga-desliga (*on-off*), o que não ocorreu nas simulações. Quando a temperatura na saída ultrapassa ligeiramente a saída de referência, a tensão do controlador baixa para tensão mínima (2 V). O contrário também se verificou quando a temperatura medida na saída do processo ultrapassava a referência. Apesar deste comportamento, todos os controladores mantiveram a temperatura sob controle, mesmo quando submetidos a dinâmicas não-modeladas.

5. Conclusão e pesquisa futura

Este trabalho apresentou uma forma de aprimoramento e o projeto de um sistema de controle automático 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 PWM) 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.

Os resultados dos ensaios e experimentos práticos mostraram resultados animadores, fruto do aprimoramento do sistema de controle da bancada de ensaios. 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.

Neste contexto foi utilizada, com sucesso, uma abordagem de controle PID desacoplado multivariável baseado em identificação linear e otimização de parâmetros através de evolução diferencial. Futura pesquisa visará à concepção de técnicas de controle digital com *anti-windup* e a análise de abordagens de controle PID adaptativo.

Agradecimentos

A infra-estrutura fornecida pelo LACTEC para o desenvolvimento deste projeto e ao colega Oswaldo Honorato de Souza Jr. pela revisão do artigo.

Referências

- [1] M. J. Mannala: *Projetos de controle convencional e adaptativo aplicados ao sistema térmico de uma bancada de ensaios de cabos condutores*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, Paraná, 2004.
- [2] P. Cominos and N. Munro: "PID controllers: recent tuning methods and design to specification", *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, vol. 149, no. 1, 2002, pp. 46-53.
- [3] M. A. Unar, D. J. Murray-Smith, and S. F. A. Shah: "Design and tuning of fixed structure PID controllers - a survey", *Technical Report CSC-96016*, Centre of Systems and Control, University of Glasgow, UK, 1996.
- [4] M. Lelić and Z. Gajić: "A reference guide to PID controllers in the nineties", *IFAC Digital Control: Past, Present and Future of PID Control*, Terrassa, Spain, pp. 69-78, 2000.
- [5] W. -D. Chang: "Nonlinear system identification and control using a real-coded genetic algorithm", *Applied Mathematical Modelling*, 2006 (aceito para publicação).
- [6] A. Popov, A. Farag, and H. Werner: "Tuning of a PID controller using a multi-objective optimization applied to a neutralization plant", *Proceedings of 44th IEEE Conference on Decision and Control and 2005 European Control Conference*, Seville, Spain, pp. 7139-7143, 2005.
- [7] W. W. Tan, F. Lu, and K. C. Tan: "Modeling and control a pilot pH plant using genetic algorithm", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 18, no. 4, pp. 485-494, 2005.
- [8] J. -Y. Cao, J. Liang, and B. -G. Cao: "Optimization of fractional order PID controllers based on genetic algorithms", *Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics, ICMLC 2005*, Guangzhou, China, vol. 9, pp. 5686-5689, 2005.
- [9] D. H. Kim and J. H. Cho: "Robust tuning for disturbance rejection of PID controller using evolutionary algorithm", *Proceedings of Annual Meeting of the Fuzzy Information, NAFIPS 2004*, Alberta, Canada, vol. 1, pp. 248-253, 2004.
- [10] C. -L. Lin, H. -Y. Jan, and N. -C. Shieh: "GA-based multiobjective PID control for a linear brushless DC motor", *IEEE Transactions on IEEE/ASME Mechatronics*, vol. 8, no. 1, pp. 56-65, 2003.
- [11] A. Sakaguchi and T. Yamamoto: "A design of predictive PID control systems using GA and GMDH network", *Proceedings of the International Conference on Control Applications*, Glasgow, Scotland, UK, vol. 1, pp. 266-271, 2002.
- [12] Y. P. Wang, N. R. Watson, and H. H. Chong: "Modified genetic algorithm approach to design of an optimal PID controller for AC-DC transmission systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 59-69, 2002.
- [13] A. Visioli: "Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes", *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, vol. 148, no. 2, pp. 180-184, 2001.
- [14] O. Ismail and W. Bedwani: "Compliant motion control using variable structure PID control system", *Proceedings of International Symposium on Intelligent Control*, Mexico City, Mexico, pp. 397-401, 2001.
- [15] R. A. Krohling and J. P. Rey: "Design of optimal disturbance rejection PID controllers using genetic algorithms", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 5, no. 1, pp. 78-82, 2001.
- [16] E. G. Collins and Y. Zhao: "Optimal PID controller with finite word length implementation", *Proceedings of the American Control Conference*, Arlington, VA, USA, vol. 3, pp. 2173-2178, 2001.
- [17] R. Johansson: *System modeling and identification*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- [18] R. Storn and K. Price: "Differential evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces", *Technical Report TR-95-012*, International Computer Science Institute, Berkeley, USA, 1995.
- [19] R. Storn: "Differential evolution — a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", *Journal of Global Optimization*, vol. 11, no. 4, pp. 341-359, 1997.
- [20] T. Bäck, D.B. Fogel, and Z. Michalewicz (eds.): *Handbook of evolutionary computation*, Bristol, Philadelphia: Institute of Physics Publishing, NY, USA, Oxford: Oxford University Press, 1997.
- [21] D. Whitley: "An overview of evolutionary algorithms: practical issues and common pitfalls", *Information and Software Technology*, vol. 43, pp. 817-831, 2001.

- [22] J. -P. Chiou and F. -S. Wang: "Hybrid method of evolutionary algorithms for static and dynamic optimization problems with application to a fed-batch fermentation process", *Computers and Chemical Engineering*, vol. 23, pp. 1277-1291, 1999.
- [23] A. Kyprianou and K. Worden: "Identification of hysteretic systems using the differential evolution algorithm", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 248, no. 2, pp. 289-314, 2001.
- [24] S. -L. Cheng and C. Hwang: "Optimal approximation of linear systems by a differential evolution algorithm", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics —Part A: Systems and Humans*, vol. 31, no. 6, pp. 698-707, 2001.
- [25] D. A. Wentz, D. Domanski and L. S. Coelho: "Uma abordagem de evolução diferencial aplicada à otimização de um projeto mecânico", *Anais do XI Simpósio Brasileiro de Redes Neurais*, São Luís, MA, 2004.
- [26] A. A. R. Coelho and L. S. Coelho: Identificação de sistemas dinâmicos lineares, Editora da UFSC, Florianópolis, SC, 2004.
- [27] H. Akaike: "A new look at the statistical model identification", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 19, pp. 716-723, 1974.
- [28] J. G. Ziegler and N. B. Nichols: "Optimum settings for automatic controllers", *Transactions of the ASME*, vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [29] K. Ogata: Engenharia de controle moderno, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ, 3ª. edição, 1998.