

Controle Aplicado em Tempo Real a uma Planta de Temperatura: Resultados Experimentais

Anny Verly, Rodrigo Augusto Ricco, Fábio Gomes dos Santos, Humberto Mendes Mazzini
Departamento de Engenharia Elétrica, UFSJ - Universidade Federal de São João del-Rei
annyverly@yahoo.com.br, rodrigo.ricco@yahoo.com.br, fabiogseng@yahoo.com.br, humazzini@ufsj.edu.br

Abstract- Most industrial processes are controlled by proportional-integral-derivative (PID) controllers. The popularity of PID controllers is due to their simplicity both from design and parameter tuning points of view. This work implements a system for the temperature control in a didactic system. Initially a PID controller was investigated, adjusted according to classic methodologies. After, a genetic algorithm method was applied in the system. These instructions give you basic guidelines for preparing camera-ready papers for conference proceedings. Real-time experimental results demonstrated the effectiveness and usefulness for tuning PID parameters via this evolution process.

I. INTRODUÇÃO

No setor industrial são poucos os processos que não apresentam alguma forma de automação ou monitoração de operação. A forte concorrência do mercado faz surgir a necessidade de uma linha de produção veloz, capaz de obter resultados ótimos sem desperdício de recursos. Por este motivo, processos monitorados e automatizados se fazem tão importantes para indústrias de alta produtividade [1].

Em processos industriais no qual a temperatura é uma variável fortemente envolvida no sistema, sua medição e controle são vitais para a qualidade do produto e a segurança não só das máquinas como também do operador. Independentemente do tipo de processo, ela pode promover mudanças no ritmo da produção, qualidade do produto, segurança do equipamento e/ou pessoal, consumo de energia e por consequência o custo de produção [2].

Nesse sentido, esta pesquisa teve como objetivo realizar trabalhos experimentais em uma planta didática de controle de temperatura, de modo a promover uma conexão entre o ensino da teoria e da prática de sistemas de controle e assim fazer uma análise comparativa dos métodos de controle aplicados a uma planta de temperatura.

Este trabalho baseou-se na utilização do módulo didático de temperatura 2302, produzido pela “Datapool Eletrônica”. O objetivo da planta é demonstrar didaticamente a operação dos diversos processos que envolvem o segmento da indústria no que se refere à medição da variável temperatura [3].

Inicialmente, propôs-se um estudo da dinâmica do processo envolvido. Foram feitas simulações computacionais do modelo aproximado para o sistema térmico associado a uma lâmpada de aquecimento. Logo após foram aplicados métodos de sintonia de controladores PID convencionais da teoria de controle e baseados em Algoritmos Genéticos. Por

fim, os resultados teóricos e experimentais foram comparados e analisados. Vale destacar que o controle foi realizado em tempo real e pôde ser monitorado por meio da construção de um sistema supervisorio.

O principal objetivo deste artigo está na contextualização da teoria com a prática e na comparação dos resultados práticos obtidos pelo controle aplicado.

Uma explicação mais detalhada de métodos de sintonia de controladores PID pode ser vista em [1; 5; 6; 7; 8; 13].

II. METODOLOGIA E RESULTADOS

A. Módulo de Temperatura e o Sistema de Controle

A Figura 1 ilustra um sistema de aquecimento típico [3]. Dispositivos como resistências de aquecimento, queimadores e outros, produzem a partir de um valor de potência (V_p), um fluxo de calor (q_i) para caldeiras, fornos e estufas, necessário para aquecer este sistema. A grandeza típica controlada é a temperatura (T) e geralmente depende também do fluxo de energia (q_o) que escapa para o meio externo, da temperatura ambiente (T_a), da capacidade (C) e da resistência (R) do sistema. Informações de temperatura são fornecidas através de transdutores específicos. Instrumentações associadas aos transdutores fornecem sinais elétricos (em tensões ou correntes) proporcionais às grandezas medidas (neste exemplo, o sinal V_T).

Sistemas de aquecimento com resistências elétricas frequentemente utilizam elementos de chaveamento para variar a potência elétrica. Muitos destes elementos usam técnicas de modulação para modificar, de maneira contínua, os níveis de tensão ou corrente elétrica na resistência de aquecimento (um sinal de comando, V_u , varia de forma contínua o valor da tensão, V_p , na resistência de aquecimento).

O módulo de temperatura é constituído por circuito transdutor, *driver* de acionamento, conector de acesso, *proto-board* e fontes de alimentação.

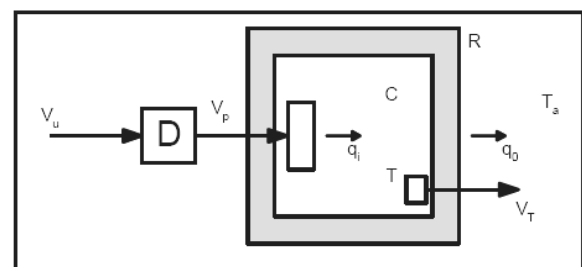


Fig. 1. Sistema de Aquecimento.

B. O Modelo Matemático

Uma maneira de se obter modelos de sistemas dinâmicos é empregar técnicas de identificação de sistemas. Essas técnicas utilizam medidas experimentais das entradas e saídas para se obter um modelo aproximado. Na verdade, o que se pretende é descrever modelos que representem as relações de causa e efeito entre essas variáveis. Uma das características dessas técnicas é que pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema é necessário e assim tais métodos são também referidos como modelagem (ou identificação) caixa preta ou modelagem empírica [4].

Foram realizados ensaios pela empresa Datapool para o sistema de controle de temperatura associado à lâmpada de aquecimento. Os ensaios consistiam em aplicar um sinal na entrada de comando, V_u , do *driver* de aquecimento e medir os dados resultantes, V_T , da informação de temperatura. Estes ensaios foram realizados em malha aberta. Dessa forma, pela característica da resposta obtida, o modelo proposto foi de primeira ordem e é representado pela função de transferência:

$$G_p(s) = \frac{1}{150s + 1} \quad (1)$$

C. O sistema de controle

A Figura 2 indica o sistema térmico a ser controlado. Sabe-se que:

- $R(s)$ é o valor de entrada;
- $Z(s)$ é a perturbação;
- $Y(s)$ é a saída;
- $E(s)$ é o erro;
- $U(s)$ é a saída do controlador;
- $G_c(s)$ e $G_p(s)$ são as funções de transferência do controlador e do processo, respectivamente.

Devem-se considerar duas possíveis condições de operação do sistema de controle:

- Servomecanismo ($Z(s) = 0$):

$$y(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} r(s) \quad (2)$$

- Regulador ($R(s) = 0$):

$$y(s) = \frac{G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} z(s) \quad (3)$$

Em se tratando do controle de temperatura o sistema especificado opera como servomecanismo. As finalidades dos controladores, compensadores ou reguladores em malhas de controle são de estabilizar sistemas instáveis, alterar características de respostas dinâmicas e atenuar eventuais

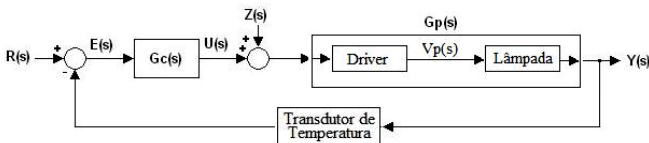


Fig. 2. Malha de controle.

distúrbios ou alterações de parâmetros que um processo possa apresentar. O controlador mais utilizado é o PID [1]. A função de transferência do controlador PID do tipo ideal é dada por:

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_C \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (4)$$

Os métodos de sintonia de controladores PID consistem em determinar os ganhos K_C (proporcional), T_I (integral) e T_D (derivativo) de maneira a estabelecer um desempenho aceitável do sistema de acordo com alguns critérios previamente estabelecidos.

Abordagens de métodos determinísticos como de Ziegler-Nichols, compensação pelo lugar das raízes, pela resposta em frequência e sintonia de Lambda assim como a utilização de algoritmos genéticos (AG - método estocástico) para a sintonia dos ganhos de um controlador PI podem ser encontradas em [5;6; 7; 8; 9; 12; 13; 14].

D. Características do sistema

A Figura 3 indica a resposta ao degrau do sistema térmico não compensado, representado pela lâmpada que aquece o ar ao redor de seu bulbo. Nesta resposta fica claro que o sistema apresenta erro em regime permanente de 50%, uma vez que o sistema deveria se acomodar em 40° C. O sistema apresenta também um elevado tempo de acomodação, 293 segundos, e tempo de subida de 173 segundos.

Analisando a Figura 4, observa-se que o sistema não compensado possui um pólo de malha fechada em -0,013 e um pólo de malha aberta em - 0,0067. Ainda na Figura 5, pode-se perceber que o sistema apresenta uma margem de fase de -180°, margem de ganho infinita e frequência de cruzamento de ganho de 0 (zero) rad/seg. Assim, com as características iniciais do sistema não compensado o passo seguinte foi calcular os parâmetros do controlador PI.

E. Cálculo dos parâmetros do controlador PI

De posse do modelo do sistema e de suas características foram calculados os parâmetros de sintonia K_C e T_i para os métodos de sintonia de Ziegler Nichols (ZN), Resposta em Frequência, Lugar das Raízes (LR), Lambda e por Algoritmo Genético. São apresentados nas Tabelas I e II os valores dos parâmetros para os respectivos métodos.

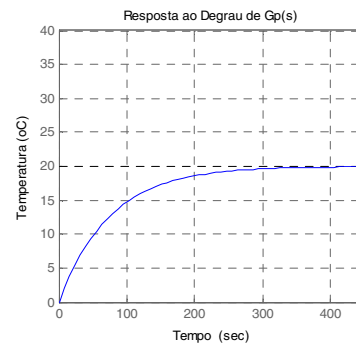


Fig. 3. Resposta ao degrau.

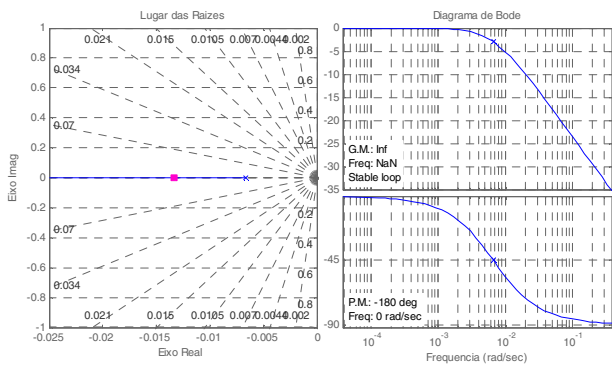


Fig. 4. Lugar das raízes (esquerda) e Diagrama de Bode (direita) para o sistema não compensado. O símbolo □ representa o pólo de malha fechada e o x o pólo de malha aberta

TABELA I
PARÂMETROS DE CONTROLE PI (MÉTODOS DETERMINÍSTICOS)

Métodos	K_C	T_i
Ziegler-Nichols malha aberta	1,200	85,000
¹ Controle pela Resposta em Frequência	2,390	23,900
² Controle pela Resposta em Frequência	6,200	62,000
³ Controle pela Resposta em Frequência	23,967	23,967
Controle pelo Método do Lugar das Raízes	5,112	150,348
^(a) Sintonia de Lambda	30,000	150,000
^(b) Sintonia de Lambda	10,000	150,000

TABELA II
PARÂMETROS DE CONTROLE PI (MÉTODOS ESTOCÁSTICOS)

Função Objetivo do AG	K_C	T_i
Sobressinal	7,000	350
Tempo de Subida	5,477	27,36
Tempo de acomodação	40	200

Para o cálculo dos parâmetros do controlador PI pelo método de sintonia de ZN [6; 7], utilizou-se o aplicativo *sisotool* do MATLAB. Sabe-se que o modelo da planta utilizada não apresenta atraso puro de tempo e que o *sisotool* faz uma pequena aproximação do atraso de tempo para o cálculo dos parâmetros do controlador PI. A proposta de utilização do método de sintonia de ZN foi apenas para fins comparativos.

Para projetar o controlador PI pela resposta em frequência procurou-se atender uma margem de fase (MF) de 90° e deslocar o sistema para uma frequência de cruzamento de ganho (Wcg) em torno de 0,4 rad/s. Essas especificações possuem relações no domínio do tempo. Geralmente quanto maior a margem de fase, menor o máximo sobressinal da resposta temporal do sistema, e quanto maior a frequência de cruzamento de ganho, menor o tempo de acomodação da malha de controle [7; 8].

De acordo com a Tabela I, os métodos de controle 1, 2 e 3 foram calculados para diferentes valores de ganho (K_C) do controlador, seguindo as mesmas especificações de MF e Wcg. Como os parâmetros foram calculados para um PI

Paralelo fez-se a conversão para um PI Ideal, pois foi esta topologia de controle utilizada no trabalho.

Já nos cálculos dos parâmetros do controlador pelo método do Lugar das Raízes, adicionou-se um integrador, devido ao fato do controle ser PI, e um zero em -0,0068. A adição deste zero desloca o LR para a esquerda deixando o sistema com mais estabilidade e com uma resposta mais rápida. Com isso, o pólo dominante de malha fechada do sistema passa a ser em -0,0341, conferindo um ganho ao sistema de 5,118.

Na sintonia de Lambda, as funções de transferência desejadas são descritas em (5) e (6) para os parâmetros referentes à (a) e (b), respectivamente, de acordo com a Tabela I. Estas funções foram escolhidas com a finalidade de diminuir o tempo de resposta do sistema, pois possuem baixas constantes de tempo [8].

$$G_{SP} = \frac{1}{5s + 1} \quad (5)$$

$$G_{SP} = \frac{1}{15s + 1} \quad (6)$$

O primeiro passo para a implementação do AG na sintonia de um controlador, é definir a função objetivo que se deseja minimizar [9; 10; 11]. Neste caso, os índices escolhidos para minimização foram: máximo sobressinal, tempo de acomodação e tempo de subida da resposta dinâmica.

O algoritmo genético desenvolvido foi o de codificação real, com uma população de cinquenta indivíduos, uma probabilidade de cruzamento de 90%, probabilidade de mutação de 1,5% e um número máximo de 50 iterações. Observou-se que como foram realizadas 50 iterações (um número alto de gerações) os resultados obtidos pelas funções objetivo (Tabela II) variavam pouco de realização para realização. Sendo assim optou-se por tomar a média de dez realizações diferentes como solução dos AGs.

Na fase de seleção de indivíduos realizou-se uma amostragem estocástica, para isto foi utilizado o método de seleção conhecido como Universal ou "Por roleta". O tipo de cruzamento utilizado dentro da codificação real foi o cruzamento aritmético, onde são escolhidos aleatoriamente dois indivíduos de uma geração (roleta) e estes geram os dois novos cromossomos.

F. Aquisição dos dados

Para realizar o controle de temperatura do sistema térmico e realizar a aquisição dos resultados obtidos experimentalmente foi necessário implementar o controle em tempo real por uma placa de aquisição via LabVIEW®. O LabVIEW possui funções que realizam comunicação com as entradas e saídas (I/O) da placa de aquisição utilizada para o controle, além de ser um software que possui facilidade na construção de interfaces virtuais (VIs). A placa de aquisição utilizada foi a Compact-RIO da NATIONAL INSTRUMENTS.

A interface construída é exibida na Figura 5. É importante mencionar que a escolha da taxa de amostragem foi 6 vezes menor que a constante de tempo do sensor do módulo.

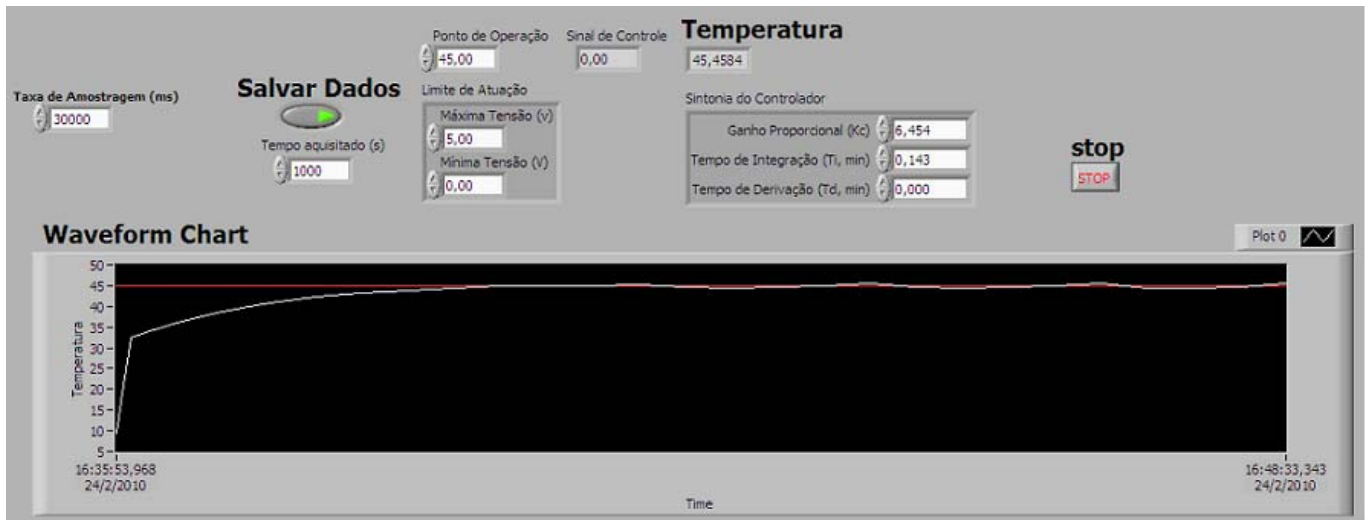


Fig. 5. Interface Virtual criada para o controle de temperatura do sistema térmico.

O circuito transdutor possui o sensor de temperatura, LM 35, que é responsável pela obtenção das informações de temperatura da realimentação da malha de controle. Como os ajustes dos ganhos do PI foram feitos no tempo contínuo, ou seja, pelos métodos de sintonia para controladores analógicos, a relação da taxa de amostragem deve ser de no mínimo 6 a 10 vezes menor que a constante de tempo do circuito transdutor. Caso contrário, seria necessário que se realizassem técnicas de controle que utilizassem a Transformada Z. Assim escolheu-se uma taxa de amostragem de 1/30, ou seja, uma amostra a cada 30 segundos, sabendo que a constante de tempo do LM 35 é de 180 segundos.

Para realizar o controle virtual, foi necessário levantar uma curva de calibração de temperatura para o módulo de acordo com a tensão aplicada (V_U) e a tensão obtida pelo circuito transdutor (V_T) (ver Figura 2). Assim foram realizadas medidas experimentais com o auxílio de um multímetro que possui um termopar acoplado para realizar medições de temperatura. A escala de temperatura possui resolução de $0,1^\circ\text{C}$, sendo a medida de incerteza de temperatura na primeira casa decimal.

III. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 6 contém uma comparação entre os resultados obtidos experimentalmente, pelo controle da placa de aquisição (—) e os resultados obtidos por simulação em ambiente MATLAB (---). A linha em negrito representa o degrau de temperatura aplicado.

A Tabela 3 indica em valores quantitativos o desempenho dos métodos aplicados ao controle de temperatura do sistema de aquecimento representado pela lâmpada.

Analisando a Figura 6 bem como a Tabela III, pode ser observado que os AGs minimizaram com eficácia o que lhes foi proposto pela função objetivo. O AG que minimiza o tempo de subida apresentou menor tempo de subida em comparação com os métodos de sintonia aplicados. Também o AG cuja função objetivo é o tempo de acomodação apresentou o menor tempo de acomodação em relação a

maioria dos métodos aplicados. Os resultados obtidos pela resposta em frequência foram eficientes, atendendo ao que lhes foi especificado. O controle apresentou uma melhora na rapidez resposta e um baixo sobressinal.

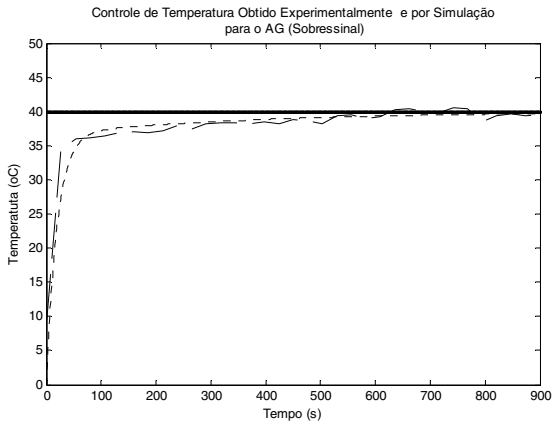
A sintonia de Lambda que apresentou melhor desempenho foi a de maior constante de tempo (15 segundos, sintonia b). Isso ocorreu devido ao fato do ganho ser menor ($K_c=10$).

O método de sintonia pelo lugar das raízes apresentou a resposta mais lenta, como previsto. A alocação do novo pólo de malha fechada foi próxima ao eixo $j\omega$, o que caracteriza um sistema lento.

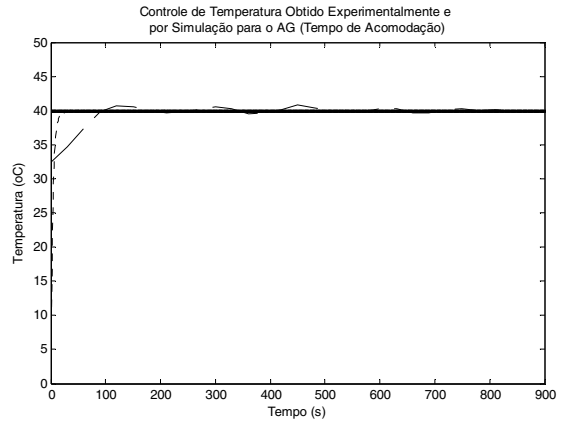
O método de sintonia do PI de Ziegler-Nichols apresentou o maior sobressinal experimental, mas mesmo assim insignificante. Neste caso, este método foi eficaz.

TABELA III
DESEMPENHO DOS MÉTODOS

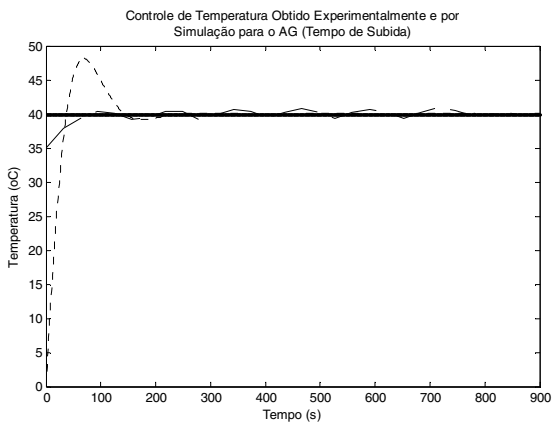
MÉTODOS	T_s	T_A	MS (%)	μ_{VF}
ZIEGLER-NICHOLS MALHA ABERTA	150,00	156,00	2,97	39,93
¹ CONTROLE PELA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA	87,00	90,00	1,97	40,05
² CONTROLE PELA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA	180,00	185,28	1,35	39,77
³ CONTROLE PELA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA	90,00	96,00	2,00	40,01
CONTROLE PELO MÉTODO DO LUGAR DAS RAÍZES	264,72	397,20	0,8	39,75
^(A) SINTONIA DE LAMBDA	216,00	270,00	2,85	40,11
^(B) SINTONIA DE LAMBDA	90,00	99,00	2,40	39,94
AG (SOBRESSINAL)	158,82	513,00	1,22	39,66
AG (TEMPO DE SUBIDA)	60,00	62,07	2,27	40,03
AG (TEMPO DE ACOMODAÇÃO)	75,00	84,00	1,97	40,05



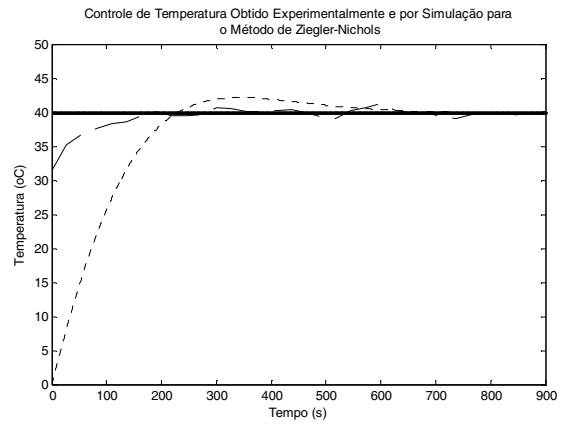
(a)



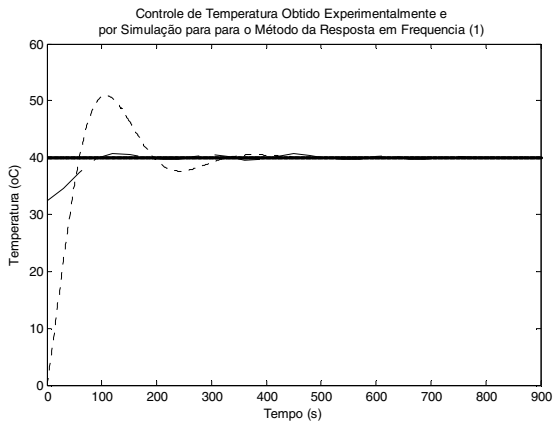
(b)



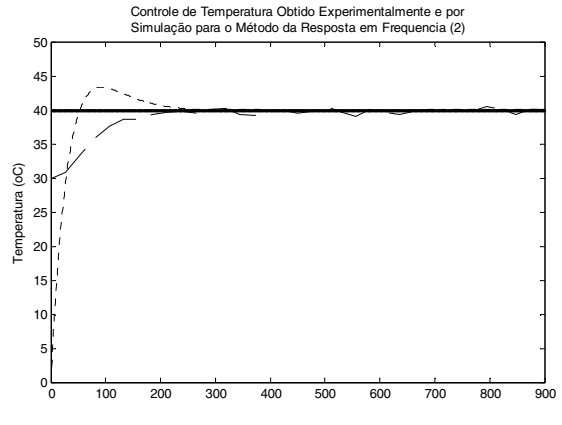
(c)



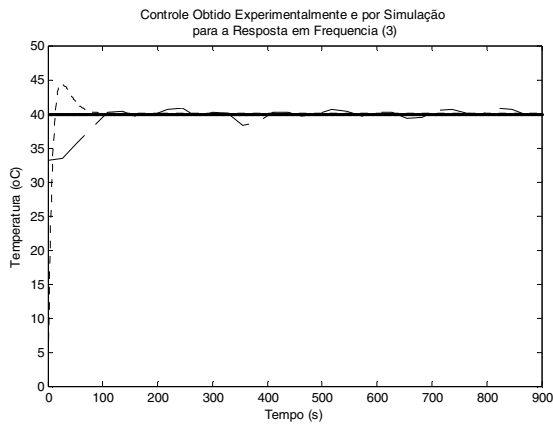
(d)



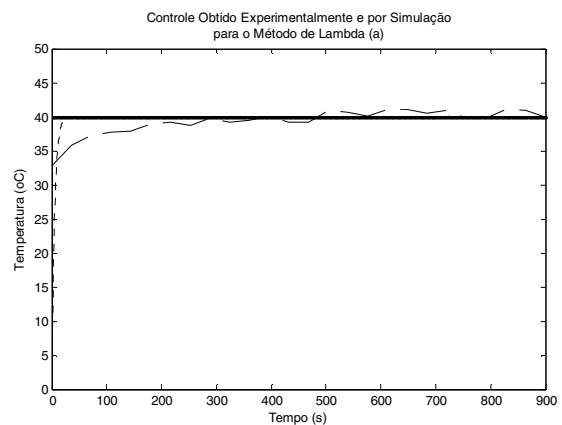
(e)



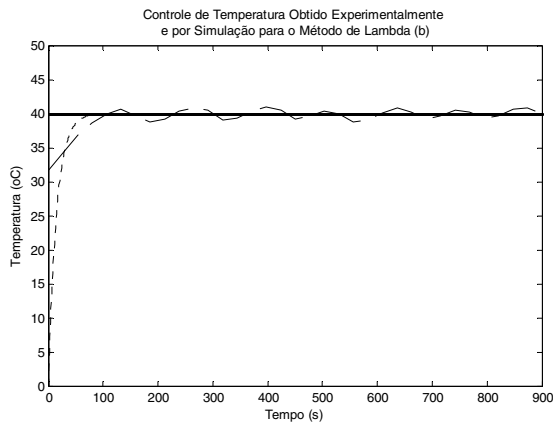
(f)



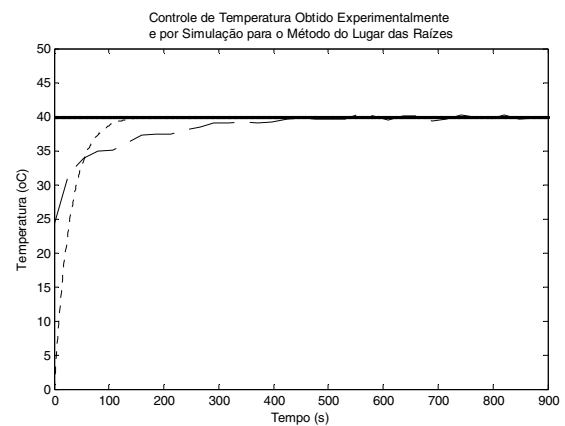
(g)



(h)



(i)



(j)

Fig. 6. Respostas ao degrau para o sistema $G_p(s)$ compensado para os diversos métodos de sintonia. As linhas cheias em negrito representam o degrau de referência aplicado. As curvas $(- -)$ representam o controle simulado, e as curvas $(- \cdot -)$ representam os resultados obtidos experimentalmente.

Com o instrumento em que se realizou a calibração de temperatura possui incerteza na primeira casa decimal, pode-se dizer que na média os controladores utilizados acertaram a temperatura estabelecida para o controle (40°C).

Algumas divergências entre os controles realizados experimentalmente e os simulados podem ser explicadas pelas diferentes condições iniciais de controle. Como a variável a ser controlada era o ar ao redor do bulbo da lâmpada, esta ficava exposta a flutuações da temperatura ambiente.

IV. CONCLUSÕES

O uso de módulos didáticos em laboratório permite simular em escala reduzida um processo industrial real. Utiliza equipamentos relativamente simples, com uma ampla abrangência na realização de experimentos, além de incentivar alunos a se engajarem em atividades de pesquisas.

O estudo de técnicas de sintonia é de grande importância para o controle de processos automáticos. Através de análise comparativa é possível selecionar o método mais adequado ao sistema, baseando a escolha nos índices de desempenhos pré-estabelecidos.

Este trabalho teve como objetivo a aplicação dessas técnicas em uma planta de temperatura.

Após a análise detalhada das respostas, pôde-se concluir que os AGs utilizados apresentaram um bom desempenho, tendo em vista a resposta ao degrau do sistema não compensado. Em alguns aspectos eles foram superiores aos métodos determinísticos aplicados. Em situações em que se deseja a otimização de algum parâmetro específico, os AGs se mostraram altamente eficientes.

Entende-se que para obter um desempenho superior da resposta dinâmica, o AG pode ser melhorado já que se trata de um método estocástico, possibilitando diferentes arranjos. Como por exemplo, alterar a sua função objetivo, impondo restrições que possam ser atingidas entre dois objetivos considerados muito importantes ao desempenho da resposta dinâmica do sistema. Também é possível alterar o número de

gerações ou probabilidades de mutações de maneira a se obter melhores resultados.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro das agências FAPEMIG, CNPq e CAPES.

REFERÊNCIAS

- [1] Astrom, K. J., Hagglund, T., *Advanced PID Control*, SA-instrumentation, System, and Automation Society, 2006.
- [2] Dantas, M. A., Lira, A. S., Souza, M. O., *Projeto de Planta Didática para Medição de Pressão, Nível, Vazão e Temperatura*, I Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, Natal-RN, (2006).
- [3] Datapool - Apostila de experiências, Manual de Manutenção e Calibração, Módulo de Temperatura 2302, 2008.
- [4] Aguirre, L. A., *Introdução à Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*, 3ª Edição, Editora UFMG, 2007.
- [5] Alfaro, V. M., *Métodos de sintonização de controladores PID que operam como Servomecanismos*, Revista Ingeniería, San Jose, Costa Rica, vol. 13, (2003).
- [6] Ziegler, J. G., Nichols, N. B. *Optimum settings for automatic controllers*. Transactions of the ASME, 759-768, (1942).
- [7] Ogata, K., *Engenharia de controle moderno*, São Paulo, 4ª Edição, Pearson Prentice Hall, (2003).
- [8] Phillips, C. L., Harbor, R. D., *Sistemas de Controle Realimentados*, Editora Makkron Books do Brasil, 1997 (tradução da versão de 1996 da Prentice Hall).
- [9] Holland, J.H., *Adaptation in natural and Artificial systems*, 1975.
- [10] Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag-1994.
- [11] Goldberg, D., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [12] Santos, F. G., Verly, A., Ricco, R. A., Mazzini, H. M.. *Utilização de um módulo didático de nível para ensino de técnicas de controle em engenharia elétrica*. XXXVII Congresso Brasileiro de Ensino em Engenharia - COBENGE, RECIFE/PE, 2009.
- [13] Verly, A., Ricco, R. A., Mazzini, H. M.. *Estudo de Caso: Métodos de Sintonia de Controladores PID*. 8th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications - DINCON, BAURU/SP, 2009.
- [14] Verly, A., Ricco, R. A., Mazzini, H. M.. *Otimização Aplicada ao Controle de Temperatura*. 9º Smpósio de Mecânica Computacional – SIMMEC, São João del-Rei/MG, 2010.