

PROJETO DE SIMULAÇÃO DE UM CONTROLADOR DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Sandra B. MARTINS; Tarcísio O. M. JÚNIOR; Samuel A. da SILVA; Valnir V. LIRA

Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba – CEFET-PB

Unidade de Ensino Descentralizada de Cajazeiras – UnED-CZ,

Rua José Antônio da Silva, 300, Jardim Oásis, Cajazeiras – PB, tel.: (83) 3531-4560, fax: (83) 3531-4560 R-214

e-mail: sandrabm@hotmail.com, tarcisiocz@gmail.com, samuel@cefetpb.edu.br, valnir@cefetpb.edu.br

RESUMO

A simulação computacional é uma poderosa ferramenta que possibilita, de forma rápida e econômica, obter resultados muito próximos da resposta de um sistema real. Este trabalho consiste na simulação de um controlador de uma planta térmica através do ambiente de programação MATLAB. O sistema real (plataforma experimental) consiste de uma câmara de vidro que possui uma entrada de alimentação para água fria e uma saída para a água quente. No interior da câmara existe uma resistência elétrica que, ao ser percorrido por uma corrente elétrica, aquece a água em seu interior (por efeito joule). A leitura da temperatura em tempo real é feita por termostatos que indicam o valor da temperatura da água dentro da câmara. O sistema sofre uma perturbação que dificulta o controle da temperatura. Esta perturbação é feita por uma válvula que desvia uma parte do fluxo de água fria que entra na câmara. Escolhendo-se um valor como temperatura desejada (*set point*), um controlador PID pode realizar o controle da corrente elétrica que alimenta a resistência com a finalidade de manter a água dentro da câmara na temperatura desejada com a mínima variação possível. Portanto, as simulações no ambiente MATLAB devem apresentar a possibilidade de se obter resultados que se aproximem do comportamento apresentado por sistemas reais de controle de temperatura.

Palavras-chave: Simulação computacional, controlador PID, *set-point*, sistema real.

1. INTRODUÇÃO

Como controlar, por exemplo, a velocidade de um motor para que em regime de operação tenha sempre uma determinada rotação, independentemente da carga a ele acoplado? Ou, como podemos garantir que em um processo a temperatura de um material esteja independente de fatores externos? Como resposta a estes questionamentos utiliza-se em todas as áreas, onde se necessita um controle realmente preciso de uma determinada grandeza física, o controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Com base neste tipo de controle, o simulador CRT (Regulador de Controle de Temperatura) foi desenvolvido para o estudo das técnicas de controle de temperatura em malha aberta e fechada (DIDACTA, 2002). Assim, o CRT é um equipamento educacional, utilizado no Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial da Uned-Cajazeiras, que possibilita a simulação em tempo real de diversas ações de controle.

2. ALGORITMOS DE CONTROLE

Dentre as várias técnicas de controle clássico existentes, iremos considerar para o CRT apenas o controle On-Off e o controle PID, descritos na sequência.

2.1. Controle On-Off

O controle On-Off é uma das técnicas mais simples de serem implementadas. Nesta técnica é assumido que o sinal de controle $u(t)$ situa-se apenas em dois patamares: ligado ou desligado (em outras palavras, 0 ou 100%). Assim, quando o sinal de saída da planta, (no nosso caso a temperatura) estiver abaixo do valor de referência, o atuador deve ser ligado na potência máxima. Por outro lado, quando o sinal de saída estiver acima do valor de referência, o atuador deve ser desligado. Matematicamente podemos expressar o sinal de controle On-Off da seguinte maneira:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & \text{se } y \geq y_{ref} \\ 100, & \text{se } y < y_{ref} \end{cases} \quad [\text{Eq. 01}]$$

Este tipo de controle é ideal em aplicações onde a variável a ser controlada possui um tempo de resposta lento (MATIAS, 2002).

2.2. Controle PID

O controle PID está em uso em mais da metade dos controladores industriais utilizados atualmente. A utilidade dos controles PID está na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle. Em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido e, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, controles PID se mostram os mais úteis (OGATA, 2003).

O controle PID é obtido através da combinação de três tipos de controladores:

- **Controlador Proporcional (P):**

Em processos que requerem um controle de temperatura mais preciso no sistema, pode ser empregado o controle proporcional. No simulador CRT o sinal de controle (intensidade da corrente) é calculado com base no erro observado. Esse erro é a diferença entre o valor desejado (*set-point*) e o valor medido da variável controlada (temperatura), isto é:

$$e(t) = y_{ref} - y(t) \quad [\text{Eq. 02}]$$

A ação é proporcional ao erro entre o *set-point* e o valor medido, isto é, gera um sinal de controle proporcional ao erro para tentar corrigi-lo, estabilizando a temperatura. Assim, matematicamente teremos:

$$u(t) = K_p e(t) \quad [\text{Eq. 03}]$$

onde K_p é chamado de ganho proporcional.

Outra forma de se expressar o ganho proporcional é através da Banda Proporcional (BP), expressa em uma porcentagem de K_p :

$$BP = \frac{K_p}{100} \quad [\text{Eq. 04}]$$

A Banda Proporcional é o intervalo de erro dentro do qual o sinal de controle assume um valor intermediário entre 0 e 100%, e fora do qual é, respectivamente, 0 e 100%, isto é, dentro desta banda o sinal de controle é proporcional ao erro (DIDACTA, 2002).

Um problema do controle proporcional é que não é possível obter erro de regime permanente nulo, além de que, para altos valores de K_p o sistema pode tornar-se instável.

- **Controlador Integral (I):**

Este controle utiliza um integrador como controlador. O integrador é um circuito que executa a operação matemática da integração, que pode ser descrita como o somatório dos produtos dos valores instantâneos da grandeza de entrada por pequenos intervalos de tempo, desde o instante inicial até o final (período de integração). Isto corresponde à área entre a curva da grandeza e o eixo do tempo, num gráfico. Matematicamente temos:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(x)dx \quad [\text{Eq. 05}]$$

onde K_i é chamado de ganho integral.

O uso do integrador como controlador faz com que o sistema fique mais lento, pois a resposta dependerá da acumulação do sinal de erro na entrada, mas leva a um erro de regime nulo, pois não é necessário um sinal de entrada para haver saída do controlador, e acionamento do atuador após o período transitório. Assim, o controle é muito preciso, embora mais lento.

- **Controlador Derivativo (D):**

O controle derivativo baseia-se no diferenciador, um circuito que executa a operação matemática da derivada. Esta pode ser entendida como o cálculo da taxa (ou velocidade) de variação da grandeza de entrada, em relação ao tempo. Isto se assemelha à média entre os valores da grandeza entre dois instantes, se estes instantes forem sucessivos (intervalo muito pequeno), esta média será a derivada da grandeza no instante inicial. Assim, a derivada indica a tendência de variação da grandeza. Matematicamente temos:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad [\text{Eq. 06}]$$

onde K_d é chamado de ganho derivativo.

A vantagem deste controle é a velocidade de resposta, que se deve à imediata reação do diferenciador: inicialmente, o erro é grande, e o diferenciador fornece um sinal forte ao atuador, que provoca rápida variação na grandeza controlada, à medida que o erro vai diminuindo, o diferenciador apresenta uma saída menor (de acordo com a velocidade de variação na grandeza), reduzindo a ação do atuador, o que evita que se passe (ou passe demais) do valor desejado (entrada).

A desvantagem é que o diferenciador é um circuito muito susceptível a ruídos de alta frequência, pois é um filtro passa-altas, o que pode levar a distúrbios durante o processo de controle.

Assim, para obter o controlador PID, utiliza-se os três controladores, dados pelas Equações [Eq. 03], [Eq. 05] e [Eq. 06], respectivamente:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(x)dx + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad [\text{Eq. 07}]$$

3. DESCRIÇÃO DO CRT

O simulador de processo CRT (Regulador de Controle de Temperatura) foi desenvolvido para o estudo das técnicas de controle em malha aberta e fechada. Além disso, considerando que o sistema é feito de componentes que normalmente são usados em aplicações industriais, sua utilização pode conduzir a um conhecimento sólido de problemas reais. Na Figura 1 é apresentada a estrutura física do CRT.



Figura 1 – Regulador de Controle de Temperatura – CRT.

A ação de controle no CRT pode ser executada de três modos:

- Por meio de um controlador interno On-Off (que serve como dispositivo de segurança operado por termostato);
- Através de um controle eletrônico (por exemplo, o controlador eletrônico opcional);
- Através do software CRS (Software de Regulagem de Controle) executado em um PC.

Nos primeiros dois casos, o software que é executado no computador torna possível observar o comportamento do sistema enquanto está sendo controlado. No terceiro caso, o CRS simula o comportamento do controlador, permitindo ao operador do sistema fixar os parâmetros de controle, e como nos casos anteriores, habilita-os a examinar o comportamento das diferentes variáveis envolvidas.

O CRT simula um processo de controle de estabilidade da temperatura da água em um tanque. Do ponto de vista funcional, a unidade pode ser ilustrada de forma esquemática como segue:

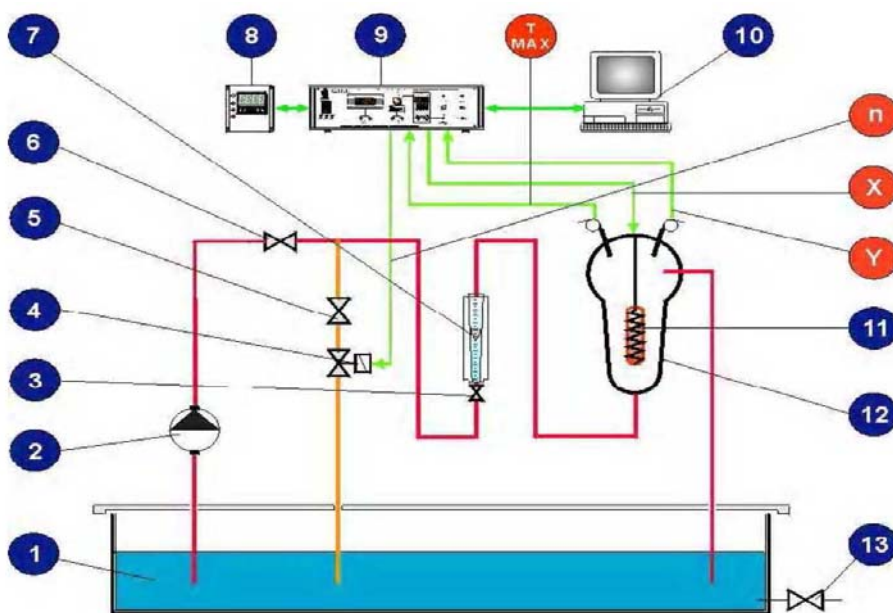


Figura 2 – Visão sinóptica do CRT.

Através de uma mangueira, o tanque coletor de água (1), de capacidade de 25 litros, é alimentado até o nível especificado. Caso o nível ultrapasse o requerido a válvula de descarga (13) é acionada manualmente para fazer o controle. A água contida no tanque principal é enviada para fluir na câmara de pirex (12) através de uma bomba centrífuga (2), controlada por uma válvula de ajuste manual (3) regulada por um medidor de fluxo (7), com variação de vazão de 0 a 50 l/h (litros por hora).

É possível trabalhar no fluxo, de modo a introduzir uma interferência (ruído) por meio da válvula solenóide (4), depois de abrir as duas válvulas manuais (5) e (6). Essa válvula acarreta um desvio parcial do fluxo a sua trajetória normal, permitindo um envio de um sinal de ruído (n) para o equipamento elétrico (9).

O líquido contido na câmara de pirex é aquecido pelo resistor de aquecimento elétrico (11) com potência de 1000 W, onde a temperatura alcançada é medida através de duas sondas PT100. Uma delas, à esquerda na figura, é usada como dispositivo protetor: quando um ajuste de temperatura máxima é alcançado, o aquecedor é imediatamente desligado pelo termostato de segurança (T Max) incluído no equipamento elétrico. A segunda sonda, à direita na figura, torna possível ler o valor da variável controlada, de modo a alcançar a ação de controle.

O sinal de controle (intensidade de corrente, X) vindo do controlador eletrônico (8) é transmitido ao aquecedor, enquanto a temperatura medida (variável controlada, Y) é transmitida ao controlador.

Devido à circulação forçada da água, a temperatura alcançada tenderá a diminuir, porque a água aquecida que deixa a câmara de pirex é substituída continuamente com água fresca do tanque principal coletor. Uma vez aquecida, a água volta ao tanque principal por intermédio de uma mangueira que interliga os dois tanques reiniciando o processo. No final a temperatura da água no tanque principal tenderá a aumentar e com o decorrer do tempo alcançar o equilíbrio.

Todo esse processo é acompanhado por um computador que está conectado ao simulador através da placa SeADDA por uma porta serial RS232. O equipamento elétrico do CRT executa as seguintes funções:

- Fornecimento de energia a todos os componentes elétricos da unidade;
- Condicionamento dos sinais elétricos para/da placa de conversão AD/DA para adaptar as entradas/saídas da placa para as entradas/saídas dos transdutores e acionadores da unidade;
- Provisão de vários interruptores, seletores e pontos de teste para verificar os sinais elétricos mais importantes por meio de um osciloscópio;
- Provisão de um display digital indicador de temperatura.
- Inclui um termostato eletrônico de segurança que age como um regulador interno On-Off.

Os ajustes dos parâmetros dos controladores, do ruído e a visualização dos dados medidos são feitos através do software CRS (DIDACTA, 2002) apresentado na Figura 3. Após o término da simulação os dados podem ser salvos em um arquivo texto para serem analisados posteriormente.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos com as simulações do CRT. Os dados foram obtidos *online* e salvos em arquivos no formato texto para serem analisados posteriormente. Foram desenvolvidos *scripts* no Matlab (HANSELMAN & LITTLEFIELD, 2003) para ler os dados obtidos, analisar as suas características e apresentar os resultados na forma gráfica.

Antes do início de cada simulação, o tanque coletor do CRT foi reabastecido com água fresca, já que a temperatura da água tendia a aumentar, devido ao aquecimento da mesma durante a simulação anterior. Em todas as simulações o fluxo água foi ajustado para 50 l/h

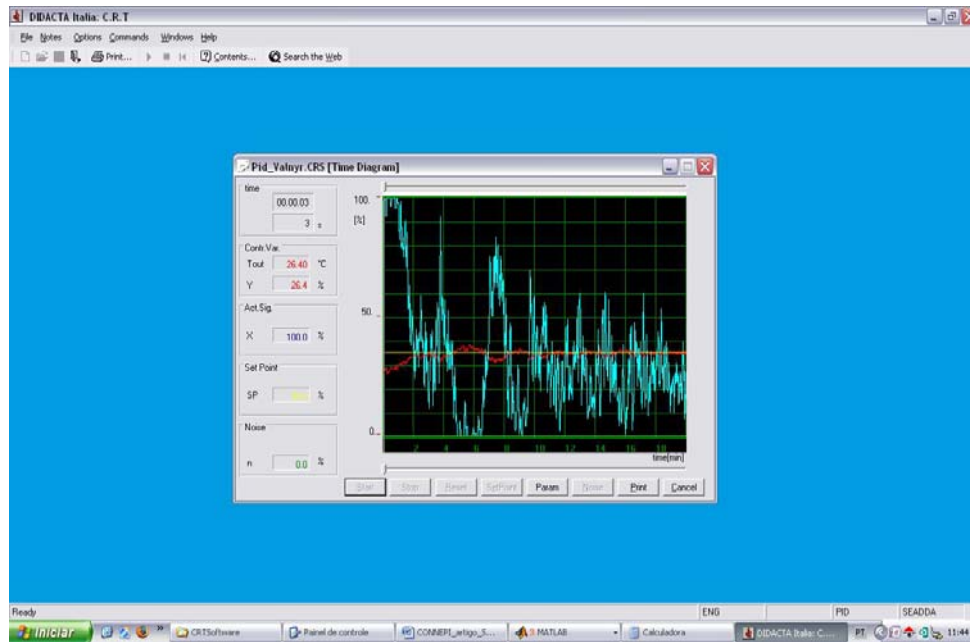


Figura 3 – Software de aquisição de dados do CRT.

4.1. Controlador On-Off

Podem ser realizados dois tipos de simulações de controle On-Off com o CRT. No primeiro tipo utiliza-se o termostato de segurança do CRT para controlar o estado do resistor de aquecimento em ligado ou desligado. Neste caso, o software de aquisição de dados apenas faz a leitura dos sinais e os salva no computador. Para esta simulação foi feito o ajuste do *set-point* para 60 °C. Na Figura 4 são apresentados os resultados obtidos para esta simulação: o sinal de referência *sp*, o sinal de saída *y* (temperatura da água na câmara de pirex) e o sinal de controle *u*. Pode-se notar nos resultados da Figura 3 que a temperatura de saída não consegue tornar-se fixa, apresentando uma oscilação em torno do valor de referência. Tal oscilação já era esperada devido ao chaveamento do sinal de controle entre 0 e 100% da potência aplicada ao resistor de aquecimento. Um fato interessante é que o sistema apresenta um tempo de resposta de aquecimento (resistor de aquecimento ligado) maior do que o de esfriamento (resistor de aquecimento desligado). Assim, os tempos médios dos ciclos de aquecimento e resfriamento são de 2,6 min e 1 min, respectivamente. Nota-se também que os valores máximos e mínimos da oscilação, após o sistema atingir o regime permanente, são de aproximadamente 64 °C e 54 °C (6,6% acima e 10% abaixo), respectivamente.

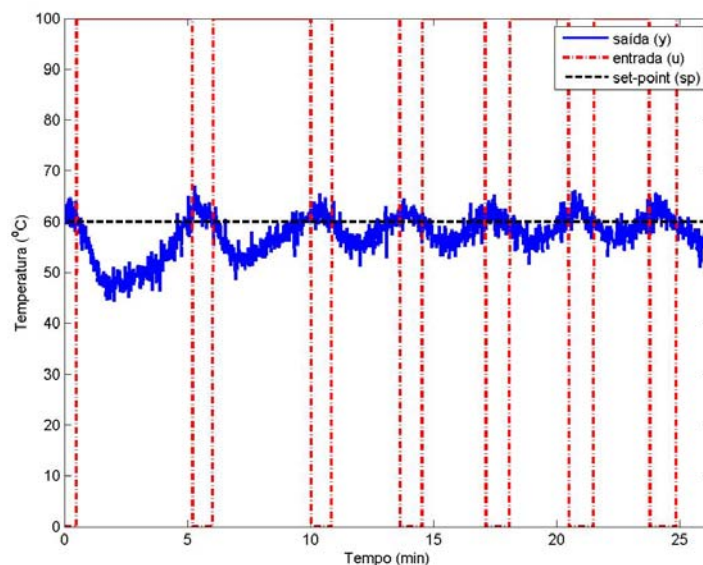


Figura 4 – Simulação do controlador On-Off – Tipo 1.

No segundo tipo de simulação On-Off utiliza-se o software de aquisição de dados do CRT para configurar os parâmetros do controlador. Para este segundo tipo de simulação foi feito o ajuste do *set-point* para 50 °C. Neste caso também é necessário configurar os seguintes parâmetros:

- **Histerese:** é a largura do intervalo compreendido entre a temperatura desejada (*set-point*) e os limites de temperatura superior e inferior. Foi escolhido para esta simulação um valor de 2%. Como a temperatura de referência foi de 50 °C, o valor de histerese corresponde a 1 °C. Na prática, para sistemas térmicos não é necessário o uso da histerese, tendo em vista a baixa constante de tempo destes sistemas. Porém, devido ao alto nível de ruído optou-se por habilitar a histerese, de forma a evitar chaveamentos errados.
- **Tempo Aberto:** parâmetro que permite simular o efeito de válvulas motorizadas que levam algum tempo para abrir e fechar: quanto maior o tempo, mais lenta é a reação do sistema ao ruído ou mudanças no *set-point*. Considerou-se aqui o valor deste parâmetro como sendo nulo.
- **Ganho:** torna possível discutir o problema encontrado quando, na presença de ruído e baixo ganho, o sistema não pode alcançar o *set-point* por causa de uma ação de aquecimento insuficiente. Foi considerado neste caso o ganho unitário.

Os resultados obtidos para esta simulação são apresentados na Figura 5. Devido ao ruído, ocorreu um chaveamento excessivo no sinal de controle, como era esperado. Assim como no caso anterior, nesta simulação também é possível verificar a oscilação da temperatura em torno do valor de *set-point*. Porém, verifica-se que os valores máximos e mínimos no regime permanente são de aproximadamente 52 °C e 46 °C (4% acima e 8% abaixo), respectivamente, ou seja, mais baixos que no caso anterior.

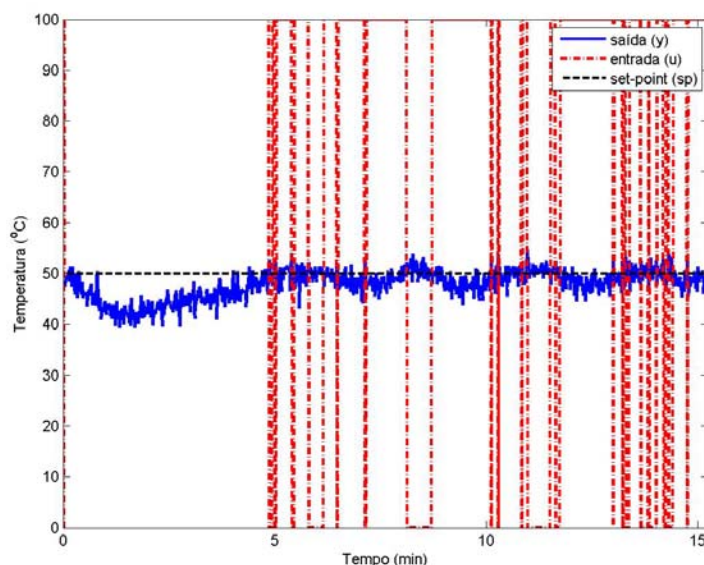


Figura 5 – Simulação do controlador On-Off – Tipo 2.

4.2. Controlador PID

Para a simulação do controle PID, os parâmetros do controlador devem ser ajustados no software de aquisição de dados do CRT. Para esta simulação foi feito o ajuste do *set-point* para 35 °C. Não foi considerada a inclusão de distúrbio nesta simulação. Os demais parâmetros do controlador foram ajustados com os seguintes valores:

- **Banda Proporcional (BP):** 10%.
- **Tempo Integrativo (TI):** 15 min.
- **Tempo Derivativo (TD):** 24 min.

Na Figura 6 são apresentados os resultados obtidos para a simulação do controlador PID. Note que nesta simulação o sinal de controle é bastante diferente do caso do controlador On-Off, apresentando neste caso

vários valores entre 0 e 100%. Para facilitar a visualização dos dados, no gráfico superior da Figura 6 foram colocados os sinais de saída e de *set-point*, enquanto que no gráfico inferior é apresentado o sinal de controle.

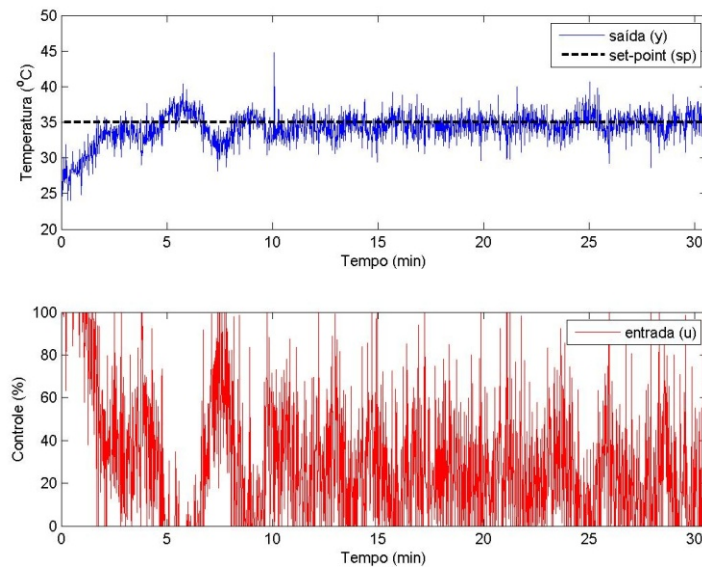


Figura 6 – Simulação do controlador PID – sem distúrbio.

Observando o sinal de saída, verifica-se que, apesar de apresentar uma característica ruidosa, o mesmo seguiu o sinal de referência, sem apresentar as oscilações que ocorrem no controlador On-Off.

Uma segunda simulação foi realizada, com a mesma configuração dos parâmetros do controlador, mas com a inclusão do distúrbio no fluxo de água que passa pelo pirex. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7. O distúrbio consistiu na abertura da válvula solenóide (4), acarretando um desvio parcial do fluxo de água, aproximadamente a partir dos 16 min de simulação decorridos.

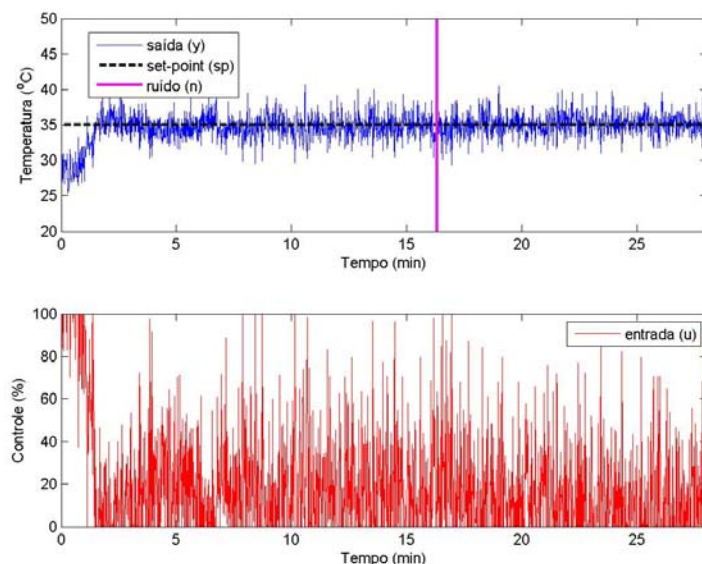


Figura 7 – Simulação do controlador PID – com distúrbio.

Observando os dados da Figura 7, nota-se que o distúrbio no fluxo foi contornado pela ação do controlador, não resultando numa variação significativa da temperatura de saída. Ou seja, o controlador foi capaz de compensar o efeito inesperado do distúrbio, mantendo a temperatura de saída na faixa do *set-point*.

5. CONCLUSÕES

A teoria de controle é uma ferramenta poderosa e extremamente necessária na sociedade atual, tendo em vista a sua larga aplicação nos diversos processos industriais existentes. Sendo assim, o seu estudo é de grande importância para que os alunos dos cursos da área de indústria, futuros profissionais que irão atuar nas indústrias, possam realizar suas atividades com conhecimento e segurança. Uma das formas de ganhar conhecimento prático nesta área é através do uso de simuladores de plantas reais, as chamadas plantas piloto, que servem como modelos práticos, porém em escala reduzida de processos reais. Nestes simuladores é possível implementar técnicas de controle, aprendidas na teoria, e verificar o seu funcionamento em um processo real. Com o intuito de oferecer aos alunos do Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial da Uned-Cajazeiras essa experiência prática, é utilizado um simulador de uma planta térmica, onde podem ser simulados controles clássicos como o controle On-Off e o controle PID. Neste artigo foram apresentados resultados de simulação desta planta térmica utilizando as técnicas de controle clássico descritas. Dos resultados obtidos, pode-se verificar que o nível de ruído em todas as simulações foi relativamente elevado. De forma a melhorar os resultados futuros, pretende-se acoplar um filtro de linha para minimizar esse problema. Comparando as técnicas implementadas, chega-se a conclusão que o controle PID, como era de se esperar, apresenta resultados melhores do que o controle On-Off. Porém, o controle On-Off é mais simples de ser implementado, e para sistemas que apresentam tempos de respostas lentos, como é o caso de plantas térmicas, este tipo de controle pode ser implementado, obtendo-se bons resultados. Como proposta para a continuação da pesquisa pretende-se implementar técnicas de controle mais avançadas, assim como técnicas de identificação de sistemas e estimação de parâmetros, através do desenvolvimento de um novo hardware que pode ser acoplado ao sistema original em uso atualmente.

REFERÊNCIAS

DIDACTA ITALIA. **CRT – Módulo de Regulagem de Controle de Temperatura. Manual do Usuário e Exercícios.** 2002.

MATIAS, J. **Teoria de Controle PID.** Revista Mecatrônica Atual, Nº 3, Abril, 2002.

HANSELMAN, D. & LITTLEFIELD, B. **Matlab 6. Curso Completo.** São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2003.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2003.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao professor Alexandre Ribeiro Andrade pelo seu apoio e orientação no início desta pesquisa.