



Universidade Federal de Minas Gerais  
Departamento de Engenharia Eletrônica

## Laboratório de Controle e Automação I

# Processo Térmico Seco

PERTENCE AO LABORAT.  
DE PROCESSOS SECOS  
E ÚMIDOS - DPTO. DE  
ENGE. ELETRÔNICA  
PCA - SALA 122

Prof. José Carlos Rodrigues de Oliveira

Belo Horizonte, agosto de 2001

(Favor não  
retirar desta  
sala)

# **Processo Térmico Seco**

## **Laboratório de Controle e Automação I**

Prof. José Carlos Rodrigues de Oliveira, Dr.  
Departamento de Engenharia Eletrônica – EE-UFMG  
2001

### **1. Objetivo**

Este trabalho baseia-se na metodologia de ensino “Motivação pelo Desafio” apresentada pelo Prof. Jim Zhu, da Louisiana State University, em 1994 [1], também denominada de “ensino concorrente” ou “metodologia hands-on” por Silveira & Carmo [2]. No caso das aulas de laboratório, “desafios” são colocados para os alunos na forma de processos reais a serem controlados, de modo que cada sistema de controle atenda a um conjunto de especificações. Ao contrário da metodologia convencional, também chamada “seqüencial”, o aluno participa, junto com o professor, do processo de aprendizagem. Este, ao invés de dar soluções prontas, assiste aos estudantes na resolução do problema, ajudando-os a encontrar e manejar as ferramentas necessárias. Enquanto não se chegar a uma solução satisfatória persiste o “desafio” e, portanto, a motivação para a sua superação.

À luz dessa metodologia, cada grupo de alunos é levado a interagir com uma planta, que pode já estar construída ou até mesmo ser montada por eles mesmos. Após familiarizarem-se com o seu funcionamento, eles partem para a sua modelagem matemática e a identificação de parâmetros. Feita a validação do modelo, um controlador é projetado e colocado em operação para o sistema atender a um conjunto de especificações de desempenho. Como forma de avaliação, são feitas apresentações orais dos trabalhos no meio e no final do semestre, tanto para efeito curricular quanto para uma “realimentação” do trabalho. Essas apresentações são acompanhadas do funcionamento das montagens, além da entrega da documentação, sob a forma de um Relatório.

O objetivo deste “desafio” é aperfeiçoar um sistema já desenvolvido [4,5], com finalidades didáticas, que realiza o controle de temperatura de um processo térmico seco, construído em escala reduzida por meio de um ferro de solda de 100W. A tecnologia utilizada no projeto é toda dominada pela equipe do Departamento de Engenharia Eletrônica da EE-UFMG, e envolve conhecimentos nas áreas de Eletrônica, Instrumentação, Controle, e Computação, o que torna o trabalho interessante para o(a) aluno(a), dando-lhe maior motivação para o aprendizado. Por outro lado, este desafio visa dotar o LECI – Laboratório de Ensino de Controle e Instrumentação de uma planta versátil e rica para a prática de técnicas de controle de processos.

## 2. Relevância.

- O controle de temperatura é muito difundido na indústria, e seu estudo é fundamental para a formação do(a) Engenheiro(a) de Controle.
- Um processo em escala reduzida permite estudar fenômenos importantes, a um custo reduzido e sem riscos para os alunos ou para o laboratório.
- O desenvolvimento de plantas no próprio laboratório, além de economizar preciosos recursos financeiros, visa capacitar a equipe envolvida e gerar tecnologia, tornando o laboratório menos dependente de "kits" importados e suas peças de reposição.

A escolha do sistema térmico baseado no ferro de solda deveu-se aos seguintes aspectos [3]:

- o processo reproduz, em escala reduzida, uma planta industrial;
- é uma planta segura, capaz de criar sensações físicas (calor), ao mesmo tempo realísticas e lúdicas;
- suas dimensões são compatíveis com uma bancada de laboratório, e sua manipulação e manutenção são simples;
- o seu custo e consumo de energia são baixos, e evita-se ficar na dependência de um determinado fabricante;
- a utilização de um ventilador com três velocidades possibilita a introdução de perturbações no controle de temperatura, além de permitir resfriar o ferro de solda rapidamente, para que sejam realizados vários testes durante uma mesma aula.

## 3. Descrição da Planta para Controle de Temperatura e Familiarização com o Processo.

A planta é constituída por um ferro de solda de 100W, tendo-se retirado o "bico" na sua extremidade, permitindo o acesso à sua parte interna [4,5]. Um sensor baseado em um termopar foi inserido no interior do ferro de solda, permitindo monitorar ou controlar a sua temperatura. As fontes de alimentação elétrica e os sistemas de controle e de acionamento do Processo estão localizados próximos ao ferro de solda e pode-se operar tanto em malha aberta quanto em malha fechada. Para o atuador, escolheu-se um gradador de tensão baseado em dois tiristores em anti-paralelo (conversor CA/CA), desenvolvido no Laboratório de Eletrônica de Potência do Depto. de Engenharia Eletrônica da UFMG por Garcia & Cortizo [6], capaz de fornecer tensão / potência variável ao resistor do ferro de solda. Finalmente, o transdutor de temperatura, além do sensor, é composto por um amplificador de termopar de boa precisão.

### 3.1 Características Construtivas da Planta:

#### Ferro de solda:

Potência / Tensão nominais:	100 W /127 V RMS
Comprimento:	30 cm
Diâmetro:	12 mm

**Transformador principal:**

Tensões primárias: 127 – 220 V  
Tensões secundárias: 127 – 15 – 15 – 09 – 09 V

**Acionador:**

Gradador de tensão a tiristores, monofásico  
Tensão de saída: 0 a 127 VRMS (2 A).  
Comando: TCA785

**Transdutor de temperatura:**

Sensor termopar tipo K, conectado a um amplificador OMEGA modelo TX91A – K6, faixa de trabalho 0-1000 °F (isto é, -17,78 a 537,78°C), saída em corrente (4 a 20 mA) [8].

**Ventilador:**

Operando à velocidade máxima, permite resfriar rapidamente o ferro de solda, com o intuito de levá-lo à temperatura ambiente para novo teste de aquecimento. Com duas velocidades menores, possibilita a introdução de uma perturbação no controle de temperatura.

Todos os componentes do processo foram encontrados com facilidade no mercado. O gradador foi montado no laboratório e apenas o sensor e o amplificador são importados. A idéia básica é diminuir ao máximo a dependência de um determinado fornecedor e que a montagem e operação do sistema possa integrar conhecimentos de Controle, de Instrumentação e de Eletrônica de Potência. Além disso, é importante que a tecnologia envolvida no processo seja de domínio do grupo responsável pelo laboratório, em função da sua manutenção e até mesmo para uma eventual modificação.

A Figura 1 apresenta a vista superior do Processo Térmico Seco.

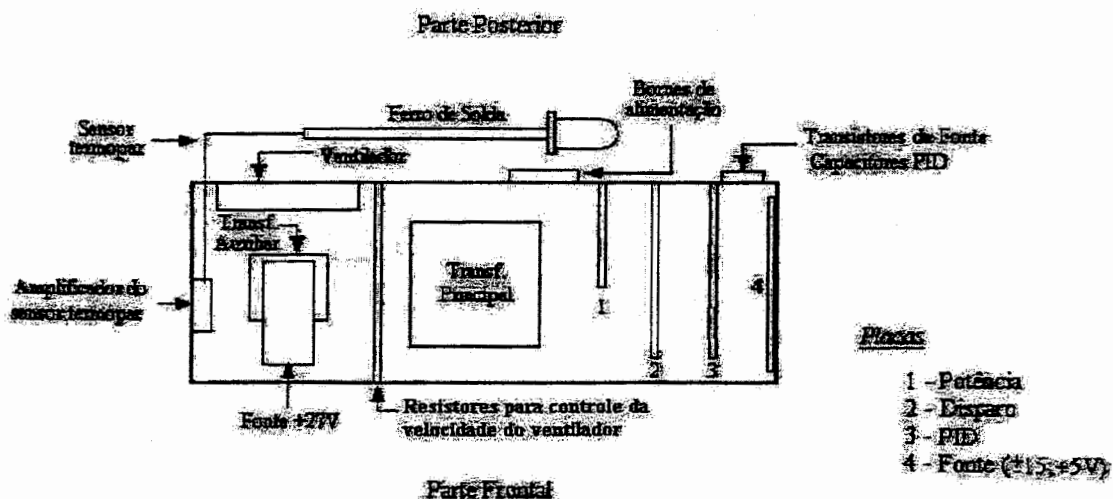


Figura 1: Processo Térmico Seco.

Uma fonte de alimentação de +/-15V, 1A [7] é utilizada para os circuitos de comando e de controle. Após a adaptação e o isolamento da tensão alternada da rede de 127V, ela é retificada em onda completa, filtrada por capacitores e, por fim, regulada. Para o amplificador de termopar, foi construída uma fonte adicional de +27V, não regulada. O esquema de ligações da fonte de +/-15V está apresentado no Apêndice A.

O sistema tem custo baixo e é indicado para experimentos em um Laboratório de Ensino de Engenharia de Controle.

### 3.2 Familiarização com o Processo Térmico.

Pede-se:

- Identificar cada componente da montagem. Dedicar especial atenção às placas dos circuitos de potência (Figura 2) e de comando do gradador (Apêndices B e C).

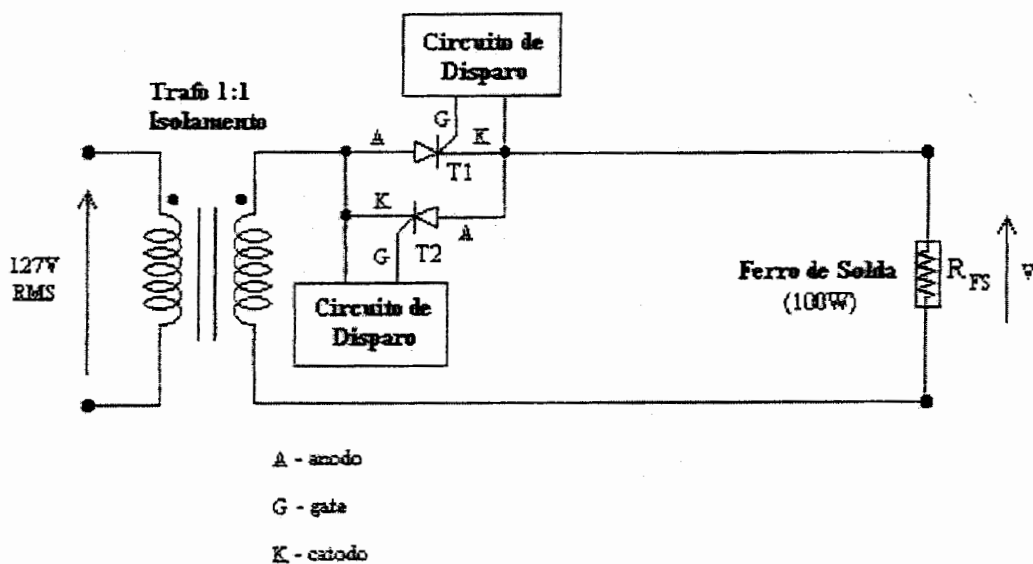


Figura 2: Circuito de potência do Gradador.

- Energizar a montagem, mantendo desligados o ventilador e a potência no ferro de solda (inibir os pulsos nos tiristores). Medir as tensões nas fontes de +/-15V e de +27V, e também a tensão senoidal 127V na entrada do gradador. Em princípio, não se conectam os dois canais do osciloscópio simultaneamente no circuito de potência, para evitar curto-circuito.

O ângulo de disparo  $\theta_0$  nos tiristores é criado pelo Circuito Integrado TCA785, o qual gera um sinal "dente de serra" em sincronismo com a tensão alternada aplicada ao circuito de potência. Conforme a Figura 3, cada tiristor é disparado no semi-ciclo em que está polarizado diretamente (anodo mais positivo que o catodo), e somente no instante em que o sinal dente de serra  $V_{TRI}$  se iguala ao

sinal de comando  $V_C$ . Esse último pode ser obtido de um potenciômetro (operação "manual"), ou de um controlador PID (operação "automático"). Quando  $V_C$  varia entre os valores mínimo e máximo do dente de serra,  $\theta_0$  é ajustado respectivamente entre  $0^\circ$  (potência máxima) e  $180^\circ$  (potência nula).

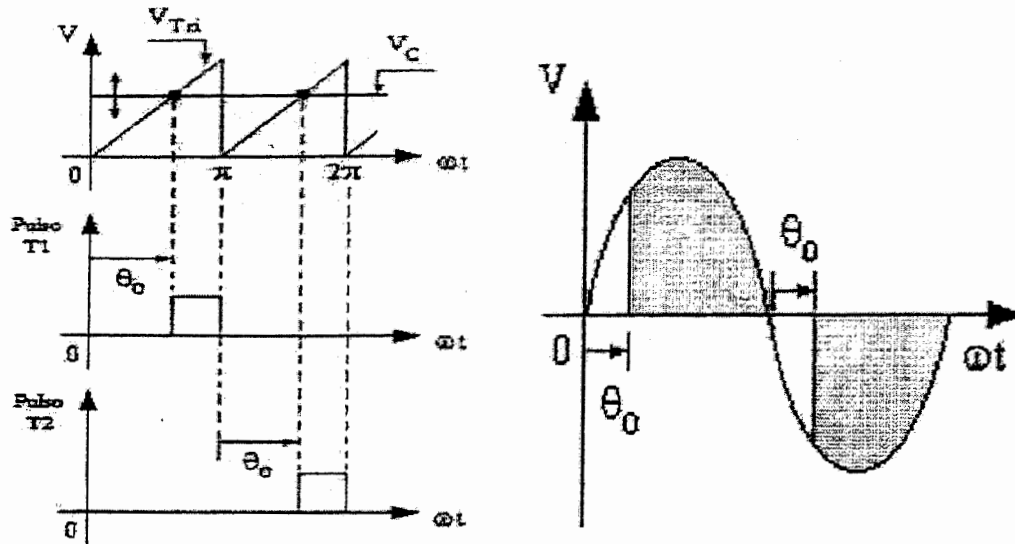


Figura 3: Princípio de Funcionamento do Gradador.

- c) Ainda sem os pulsos nos tiristores, e com o gradador em operação "manual", variar a tensão de comando  $V_C$  através de um potenciômetro. Utilizar os dois canais do osciloscópio para observar simultaneamente as tensões  $V_C$  e  $V_{TRI}$ , ambas referidas ao "terra" do circuito de comando.

A função Potência  $\times V_C$  é não-linear, e tem característica inversa [9]. Na Figura 4, a potência aplicada ao ferro de solda (sinal  $m$ ) e a tensão de comando (sinal  $u$ ) estão representados em p.u., e a variação inversa foi compensada, de forma que um aumento na tensão de comando force uma elevação na potência elétrica / térmica entregue pelo gradador ao processo.

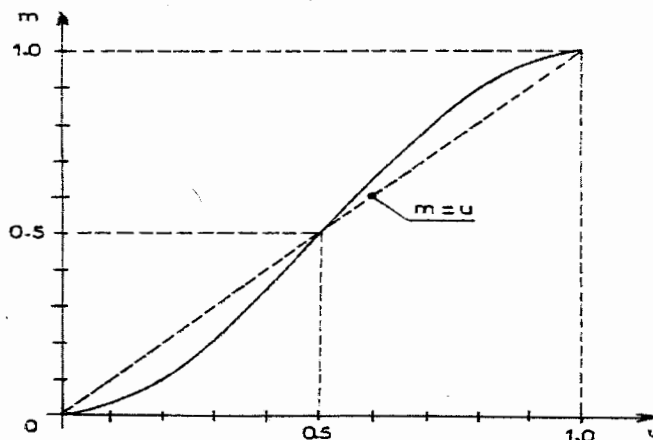


Figura 4: Gradador: Potência  $\times$  Tensão de Comando.

- d) Habilitar os pulsos nos tiristores e observar com o osciloscópio a tensão de saída do gradador em função da variação de  $V_C$  (logo, do ângulo de disparo).
- e) Levantar a característica estática (isto é, de regime permanente) Temperatura x Tensão de Comando. Para cada situação, medir a tensão  $V_C$  com um multímetro e a temperatura do ferro de solda com o auxílio de um termômetro digital com sensor termopar. Observar que, uma vez alterada a potência entregue ao processo, a temperatura leva um certo tempo para se estabilizar (Por quê?). Após anotar os valores em uma tabela, traçar o gráfico  $T \times V_C$  em computador. A característica é linear? Ela passa pela origem? Qual é a influência da temperatura ambiente?
- f) Finalmente, para uma tensão  $V_C$  constante e no seu valor máximo, observar o comportamento da temperatura quando o ventilador é ligado nas velocidades baixa e média. Procurar interpretar fisicamente o que se passa.

#### 4. Transdutor de Temperatura.

O transdutor de temperatura é baseado em um sensor termopar tipo K, constituído por um par de fios Cromel-Alumel, cuja tensão de saída é função da temperatura no interior do ferro de solda. Como essa tensão é muito baixa, o termopar foi acoplado ao amplificador Omega modelo TX91A – K6, faixa de trabalho 0 a 1000 °F, com saída em corrente de 4 a 20 mA [8]. A saída em corrente do transdutor foi convertida em tensão “atacando” um resistor (de precisão) de 250  $\Omega$ . Dessa forma, a faixa de temperatura passou a ser representada por uma tensão de 1 a 5 VCC.

A Figura 5 apresenta o esquema das ligações entre o termopar, o amplificador, a fonte de alimentação de +27V e o resistor para conversão corrente / tensão. Aos bornes 1 e 2 do amplificador foram conectados respectivamente os terminais positivo e negativo do termopar, e os bornes 4 e 5 receberam respectivamente os potenciais positivo e negativo da fonte de 27VDC. Foi inserido um resistor de precisão (250  $\Omega$ ) entre o borne 5 do transdutor e a saída negativa da fonte e, para que a tensão de saída  $V_T$  do transdutor fosse sempre positiva, aterrou-se o lado indicado do resistor, conforme mostrado na figura.

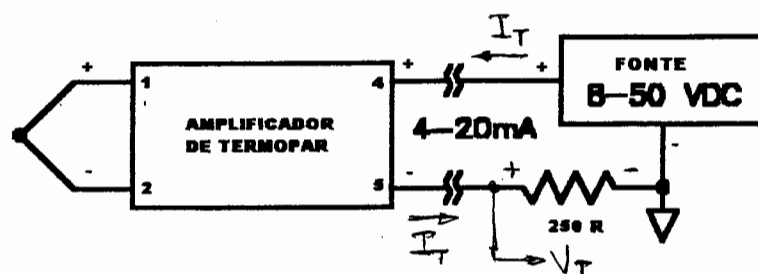


Figura 5: Transdutor de Temperatura.

Os "data sheet" do termopar e do amplificador estão no Apêndice D.

A temperatura em graus Fahrenheit pode ser convertida para graus Celsius pela seguinte expressão:

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32)$$

A Figura 6 apresenta uma relação de proporcionalidade entre a corrente  $I_T$  (mA) e a temperatura  $T_C$  (Centígrados). Graduar a escala de tensão de saída  $V_T$  do transdutor em Volts, bem como a de temperatura em °C, de forma que 0 °C corresponda a 1,0 V, assim como 500 °C a 5,0 V. . Por que se representa a temperatura 0 °C com 4 mA (zero "vivo"), ao invés de 0 mA?

Pode-se escrever:

$$V_T = k_T I_C + V_{OFF}$$

$$V_{OFF} = 1,00 \text{ V}$$

$$k_T = 0,008 \text{ V}/^\circ\text{C}$$

O coeficiente  $k_T$  representa o ganho do transdutor e  $V_{OFF}$  a tensão de "off-set". Esse deslocamento da curva retilínea, em relação à origem, constitui uma não-linearidade do transdutor. Como isso pode ser compensado em uma malha de controle?

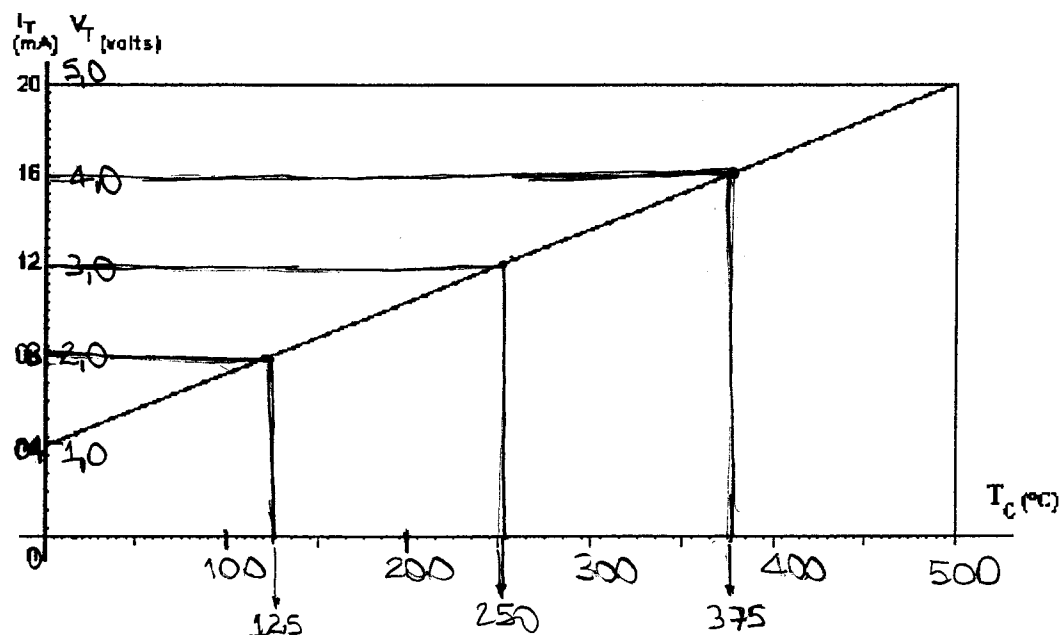


Figura 6: Característica do Transdutor de Temperatura.

A temperatura em graus Celsius pode ser estimada em função da tensão  $V_T$  (medida com multímetro), pela seguinte expressão:

$$T_C = \frac{1}{k_T}(V_T - V_{OFF})$$



Pede-se:

- a) Sabendo-se que o amplificador Omega TX91A – K6 possui uma faixa de trabalho 0 a 1000 °F, calcular essa faixa em graus Celsius. Verificar se ela é compatível com a faixa de operação do termopar Cromel-Alumel (tipo K).
- b) Determinar experimentalmente a faixa de temperatura de trabalho do Processo Térmico, com o auxílio do termômetro digital. Inicialmente, sem aplicar potência ao ferro de solda, medir a temperatura ambiente. Em seguida, aquecer o ferro de solda com potência máxima (ângulo de disparo de 0°) e, após aguardar o estabelecimento do regime permanente, determinar a temperatura máxima.

## Referências Bibliográficas

1. ZHU, J. J.  
Motivation-by-Challenge for Teaching Control Systems.  
IEEE Control Systems, Vol. 14, no. 5, pp. 64-68, oct. / 1994.
2. SILVEIRA, M.A; CARMO, I.C.S.  
Ensinos Seqüencial e Concorrente: Aprofundando a Metodologia Hand's-on.  
Anais do XII CBA – Congr. Bras. de Automática, Vol. II, pp. 631-636, set/1998.
3. SCOTT, L.G.A.  
Aplicação da Metodologia “Motivação pelo Desafio” ao Ensino de Controle de Sistemas Lineares.  
Dissertação de Mestrado, PPGEE / UFMG, dezembro / 1998, 117 pp.
4. FIGUEIREDO, L. C.; OLIVEIRA, J.C.R.  
Instrumentação para o Laboratório de Sistemas de Controle. Controle de Processo Térmico. Relatório de Bolsa de Inic. Científica, CNPq / UFMG, 1983.
5. AWWAL, M, A. ; OLIVEIRA, J.C.R.  
Aperfeiçoamento de Protótipo do Laboratório de Ensino de Controle e Instrumentação. Projeto Orientado I, Curso Eng. Elétrica UFMG, 1997, 49 pp.
6. GARCIA, P. D.; CORTIZO, P. C.  
Placa para Comando de Tiristores.  
Departamento de Engenharia Eletrônica da EE-UFMG, 1992.
7. SEIXAS, P. F.; SILVINO, J. B.  
Fontes de Alimentação Reguladas.  
Departamento de Engenharia Eletrônica da EE-UFMG, 1996.
8. OMEGA TECHNOLOGIES COMPANY.  
TX91A 4-20mA Mini Temperature Transmitter, 1999.
9. LEITE, V.M.P.; LUCCHÈSE, A. J. P.; LEONARDO, M.; OLIVEIRA, J. C. R.  
(Coordenador).  
Seminário “Regulação de Temperatura em Fornos com Aquecimento Resistivo”  
Departamento de Engenharia Eletrônica / FUNDEP / UFMG, Belo Horizonte, 26-28/11/1981.
10. OLIVEIRA, J.C.R.  
Introdução à Engenharia de Controle – Laboratório.  
Departamento de Engenharia Eletrônica da EE-UFMG, 1987.
11. MATOS, L. B. U.; OLIVEIRA, J.C.R.  
Placa PID, Tanques de Água.  
Anais da V Semana de Graduação da UFMG, 2001.