

# KIT DIDÁTICO COM PID DIGITAL DE BAIXO CUSTO

**Sílvia G. S. Cervantes<sup>1</sup>; Kleber R. Felizardo<sup>2</sup>; Francisco de Assis Scannavino Junior<sup>3</sup>**

Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Engenharia Elétrica

UEL – Campus Universitário – Caixa Postal 6001

CEP CEP 86051-990 – Londrina, PR

<sup>1</sup>silvia@uel.br, <sup>2</sup>klerfe@sercomtel.com.br, <sup>3</sup>scanna@uol.com.br

**Resumo:** *Este artigo apresenta o projeto de um kit didático com controlador PID digital que visa a atualização do aluno frente à tendência de abordagens experimentais de sintonia deste tipo de controlador. O kit utiliza o microcontrolador PIC16873 e faz os ajustes de controle da velocidade da ventoinha (cooler). A interface é simples, pois utiliza o software Hyperterminal do Windows (Microsoft) e geração de gráficos pode ser feita em qualquer software de visualização de informação porque o kit fornece os dados em arquivos com extensão txt. O kit se mostrou útil porque os alunos aprenderam a obter os parâmetros de sintonia, e uma vez adquiridos, entrar com os valores para a sintonia do controle PID, muito utilizado nos processos industriais.*

**Palavras-chave:** *Kit didático, PID digital, PWM*

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente nota-se que a maioria dos controladores industriais empregam esquemas de controle PID (Proporcional Integral Derivativo). É interessante notar que há uma tendência de substituir os controladores PID do tipo analógico (com amplificadores operacionais) por controladores PID do tipo digital através do uso de microcontroladores e CLPs (Controlador Lógico Programável). A maioria dos sistemas de controle possui plantas cujo modelo matemático não é conhecido e, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados. Portanto há a necessidade de recorrer a abordagens experimentais de sintonia de controladores PID (OGATA, 2003).

O método mais popular para a sintonia de seus parâmetros foi desenvolvido em 1942, por J. G. Ziegler e N. B. Nichols. Este método, apesar de antigo, ainda é o mais utilizado por profissionais da área de controle de processos industriais (MATIAS, 2002).

Considerando a importância da experiência prática deste controlador em ambiente acadêmico, foi desenvolvido um kit PID digital didático de baixo custo, utilizado por alunos de graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Estadual de Londrina, durante as aulas de laboratório da disciplina de Fundamentos de Controle, do 3º ano de graduação. O kit permite obter os parâmetros para a sintonia do controlador PID, através do método de Ziegler-Nichols, e verificar seu desempenho através do controle da velocidade de uma ventoinha (*cooler*) de computador.

## 2. DESENVOLVIMENTO

O kit didático é formado basicamente de um microcomputador, um microcontrolador PIC, uma ventoinha (*cooler*) e um sensor de passagem.

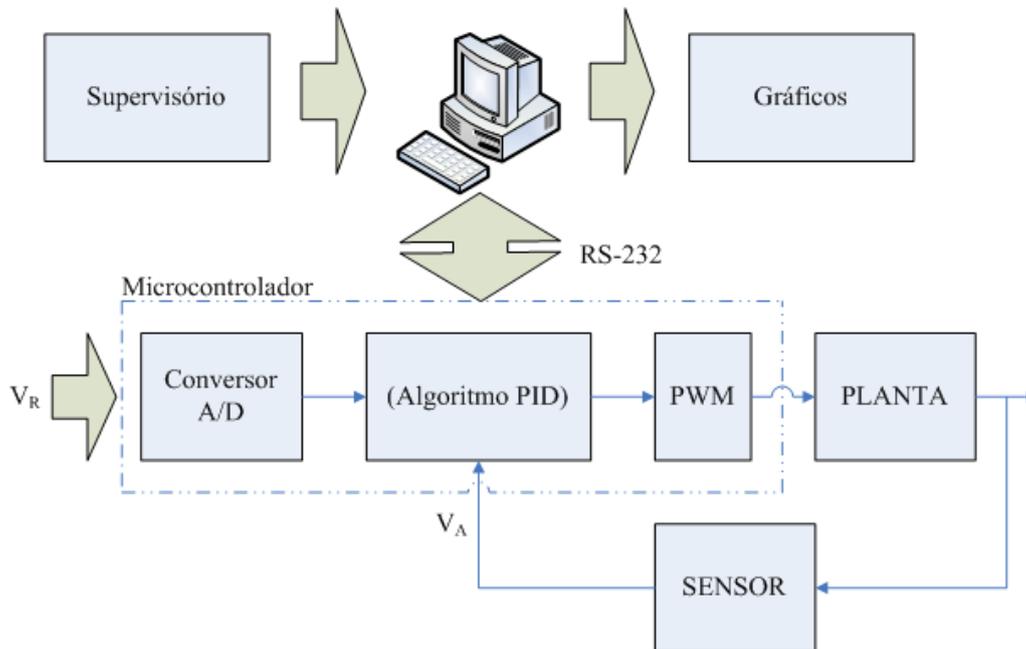


Figura 1 – Diagrama de blocos do kit montado.

De acordo com a Figura 1, a cada intervalo de tempo  $T_S$  (período de amostragem,  $T_S=142.85$  ms), as variáveis  $V_A$  (velocidade atual) e  $V_R$  (velocidade de referência) do processo são amostradas e convertidas para um valor digital que é lido pelo microcontrolador. Este compara o valor  $V_A$  com  $V_R$  e estabelece um sinal de erro, que é tratado pelo algoritmo PID. O resultado deste tratamento corresponde ao sinal de controle, que é convertido para um valor analógico, através de uma saída PWM, e tem a função de manter o valor de saída igual ao valor de referência, atuando diretamente sobre a planta do processo. As variáveis  $V_R$  e  $V_A$  são coletadas a cada intervalo  $T_S$  e salvas em arquivos do tipo texto (TXT), para posterior análise através de geração de gráficos utilizando programas como o EXCEL, MATLAB, SCILAB, MATHCAD, dentre outros.

A Figura 2 é mostra a foto do kit PID e a Figura 3 o esquema elétrico completo deste. A seguir, é descrito os blocos principais mostrados na Figura 1.

## 2.1 Supervisório

A comunicação entre a placa do kit e o computador é feita através da comunicação serial RS-232 (protocolo 8N1: 1 bit de *start*, 8 bit de dados, sem paridade, 1 bit de *stop* e *baud-rate* de 19200 bps). O usuário interage com o kit através de uma interface gráfica (supervisório), com o auxílio do software Hyperterminal do Windows. Esta interface gráfica oferece duas opções ao usuário: (1) obtenção dos parâmetros de sintonia do PID, através do método da resposta ao degrau, de Ziegler-Nichols e (2) entrada dos parâmetros de sintonia do PID, regulagem do valor inicial para  $V_R$ , através de um potenciômetro (esta referência pode ser mudada posteriormente em qualquer instante de tempo) e controle do processo.

A Figura 4 mostra uma tela do programa supervisório.

## 2.2 Conversor A/D

Um potenciômetro de 10 kΩ foi ligado ao pino 2 do microcontrolador (Figura 3). Este é um pino de entrada do conversor A/D (10 bits), responsável pela alteração da variável  $V_R$ .

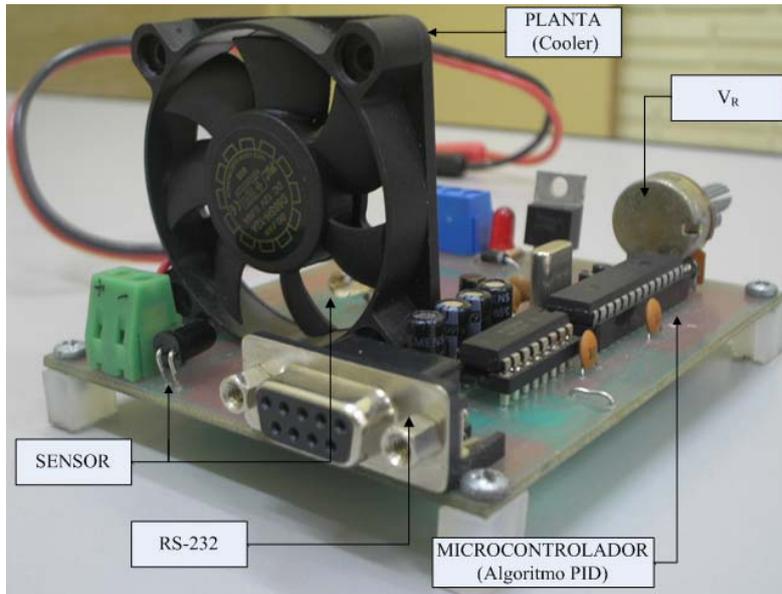


Figura 2 – Foto do kit PID.

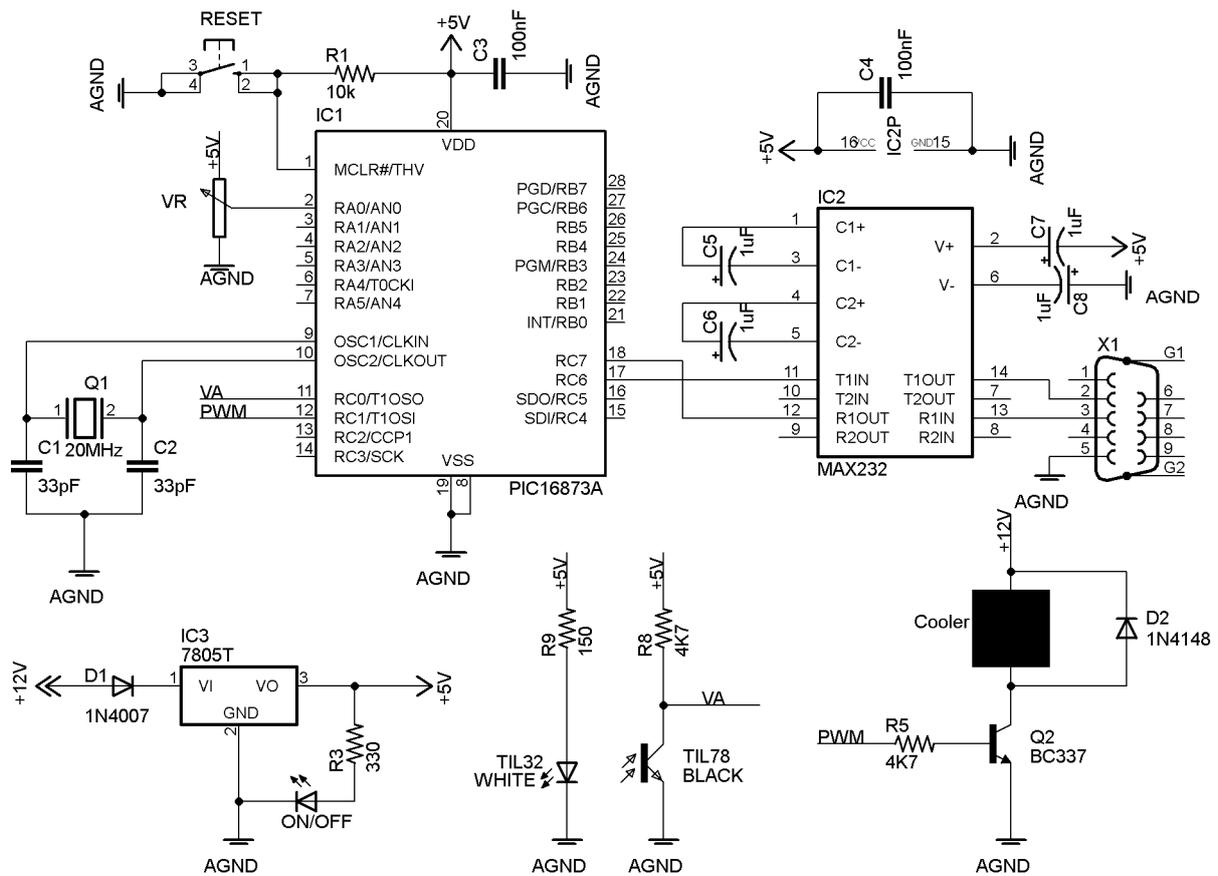


Figura 3 – Esquema elétrico do kit PID.

A relação entre a tensão de entrada lida neste pino (variação do potenciômetro) e  $V_R$  é dada pela equação (1):

$$V_R = 4171 \cdot \frac{R_{AD}}{2^{10} - 1} = \frac{4171}{1023} \cdot R_{AD} = CTE \cdot R_{AD} \quad (1)$$

Onde  $R_{AD}$  é o valor, em decimal, do resultado da leitura do registrador interno do canal 1 do conversor A/D. Por exemplo, uma tensão de 5 V no pino 2 equivale a um  $R_{AD}=1023$ , cujo resultado é  $V_R=4171$  rpm, que é a velocidade máxima de rotação do cooler. A leitura de  $V_R$  é realizada a cada intervalo de  $T_S$ .

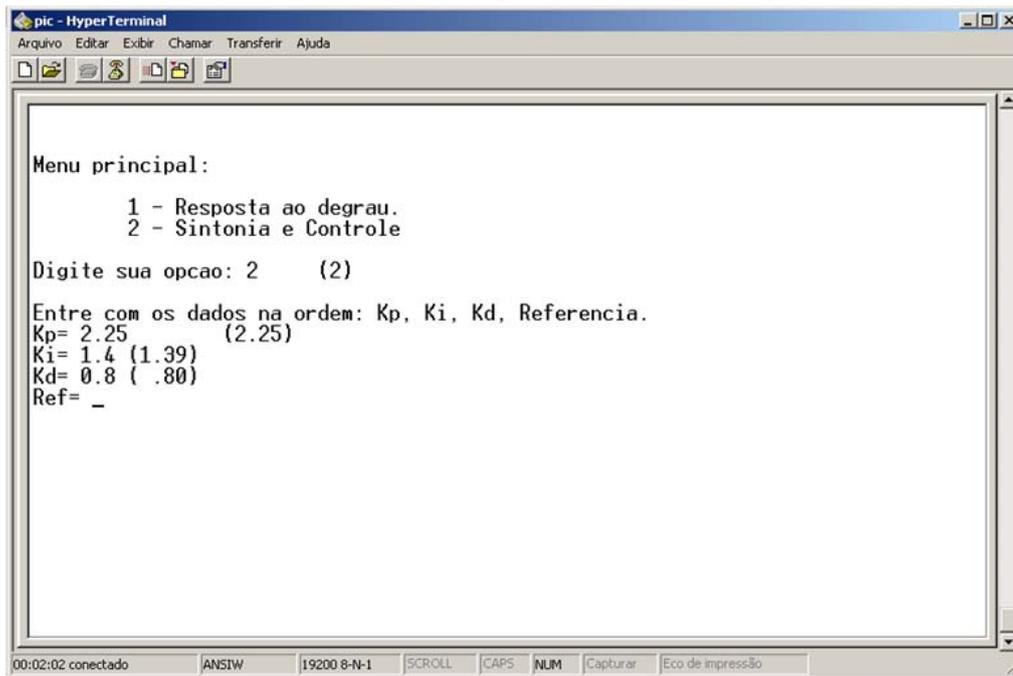


Figura 4 – Tela do programa supervisorio.

### 2.3 Sensor

Este sensor é formado por um LED (TIL32) e um foto-transistor (TIL78), dispostos como mostrado na Figura 2. Quando uma pá impede que a luz emitida pelo LED chegue à base do foto-transistor, a tensão em seu coletor é igual a 5 V; do contrário, a tensão cai para 0 V. Deste modo, temos um sinal TTL na saída do coletor. Os pulsos deste sinal TTL são enviados ao pino 11 do microcontrolador (Figura 2), que é um pino utilizado para a contagem de eventos (pulsos). A contagem destes pulsos, durante o intervalo de tempo  $T_S$ , fornece diretamente o valor de  $V_A$ . Por exemplo, a contagem de 1000 pulsos durante o intervalo  $T_S$ , fornece um  $V_A=1000$  rpm.

### 2.4 Planta

A planta do sistema de controle é um cooler de computador (12 V/80 mA), composto de sete pás, conforme mostrado na Figura 2. Uma variação de tensão em sua alimentação permite uma variação de sua velocidade. Esta variação de tensão é realizada através de um sinal PWM. Quanto maior o ciclo ativo deste sinal PWM, maior será sua tensão média e conseqüentemente maior será a velocidade do cooler.

## 2.5 Sinal PWM

O sinal PWM é gerado pelo microcontrolador (10 bits) e enviado a um pino de saída através do pino 12. Neste projeto, foi gerado um sinal PWM de frequência 1k Hz. O ciclo ativo deste sinal, calculado posteriormente pelo algoritmo PID, pode variar entre 0 a 1023.

Um driver de corrente foi ligado ao pino 12 para acionamento do cooler, conforme mostrado na Figura 3. Esta configuração permite variar a tensão de alimentação do cooler entre 0V a 12V, que corresponde; respectivamente, a um ciclo entre 0 a 1023 e uma velocidade entre 0 rpm a 4171 rpm.

## 2.6 Microcontrolador (Algoritmo PID)

O microcontrolador utilizado neste projeto foi o PIC16F873A. Este modelo foi escolhido por possuir os recursos necessários para o projeto, tais como: comunicação serial no padrão RS-232, saída PWM de 10 bits (*Pulse Width Modulation*), conversores AD de 10 bits e contadores/temporizadores utilizados para a leitura do sensor e implementação do algoritmo PID.

O código-fonte foi feito em Linguagem C, através do compilador PCW, versão 3.2, da CCS, versão de avaliação de 30 dias (PEREIRA, 2006). O fluxograma deste código é mostrado na Figura 5.

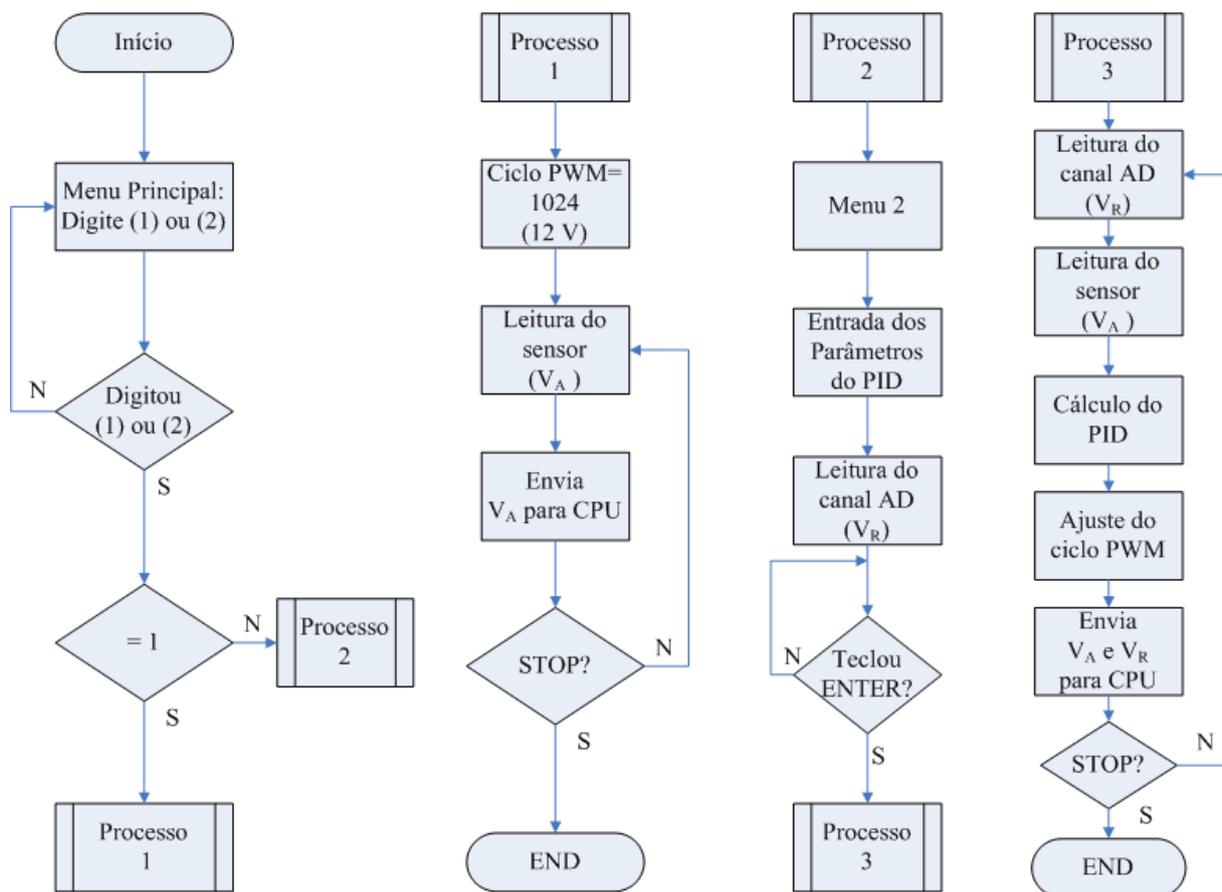


Figura 5 – Fluxograma do algoritmo do microcontrolador.

O PROCESSO 1 é responsável pela resposta ao degrau e o PROCESSO 2 é responsável pela entrada dos parâmetros de sintonia do PID e de um  $V_R$  inicial. O PROCESSO 3 executa

o algoritmo PID. O botão STOP encerra qualquer processo, através do reset forçado do microcontrolador, o que faz com que o fluxograma volte para o início.

O algoritmo PID no domínio do tempo é expresso pela equação (2) (OGATA, 2006):

$$e(t)dt + K_P \cdot T_D \cdot \frac{d}{dt} e(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(t)dt + K_D \cdot \frac{d}{dt} e(t) \quad (2)$$

$$x(t) = K_P \cdot e(t) + \frac{K_P}{T_I} \cdot \int_0^t e(t)dt$$

Sendo  $K_P$ ,  $T_I$  e  $T_D$ , respectivamente, os valores do ganho proporcional, do tempo integral e do tempo derivativo. A entrada do bloco de controle (sinal de erro) é dada por  $e(t)$  e a entrada do processo (sinal de controle) é dada por  $x(t)$ .

O processo de selecionar estes parâmetros ( $K_P$ ,  $T_I$  e  $T_D$ ) que garantam uma dada especificação de desempenho é conhecido como sintonia do controlador. Ziegler e Nichols sugeriram uma regra para a sintonia deste controlador baseadas na resposta experimental ao degrau. Neste método, obtemos experimentalmente a resposta da planta a uma entrada em degrau, como mostra a Figura 6.

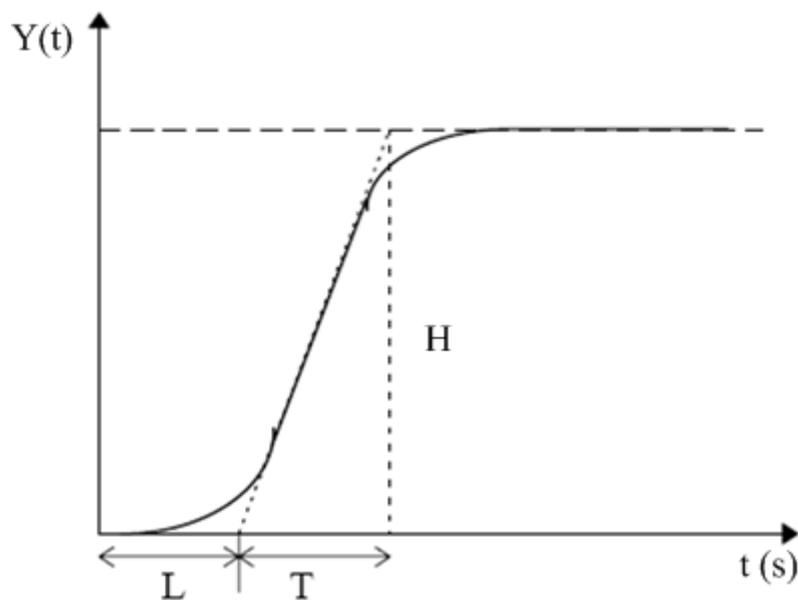


Figura 6 – Curva de resposta em forma de S.

A curva em formato de S pode ser caracterizada por duas constantes, o atraso L e a constante de tempo T. A partir destas constantes, obtêm-se os valores de  $K_P$ ,  $T_I$  e  $T_D$  com o auxílio da Tabela 1.

Tabela 1 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau da planta.

Tipo de controlador	$K_P$	$T_I$	$T_D$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0,9 \cdot \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \cdot \frac{T}{L}$	$2 \cdot L$	$0,5 \cdot L$

A equação (2) pode ser discretizada de forma apropriada para a elaboração do algoritmo PID, desenvolvido neste projeto, utilizando-se a integração retangular e a derivação triangular. A expressão a seguir descreve a ação proporcional (BORDON,1993; LEIGH 1995):

$$x_p(t) = K_p \cdot e(t) \quad (3)$$

Na forma discreta esta expressão pode ser escrita como segue:

$$x_p(kT_s) = K_p \cdot e(kT_s) \quad (4)$$

Onde  $e[kT_s]$  é o sinal de erro discretizado. A ação integral pode ser descrita pela seguinte expressão:

$$x_i(t) = K_I \cdot \int_0^t e(t) dt \quad (5)$$

Na forma discreta, utilizando a integração retangular, esta expressão pode ser escrita como segue:

$$x_i(kT_s) = x_i(kT_s - T_s) + K_I \cdot (e(kT_s) \cdot T_s) \quad (6)$$

Onde  $x_i[kT_s - T_s]$  é o valor da integral acumulada e a constante de integração é  $K_I = K_P / T_I$ . A ação derivativa do controlador pode ser descrita pela expressão a seguir:

$$x_d(t) = K_D \cdot \frac{d}{dt} e(t) \quad (7)$$

Na forma discreta, utilizando a derivação triangular, esta expressão pode ser escrita como segue:

$$x_d(kT_s) = K_D \cdot \left[ \frac{e(kT_s) - e(kT_s - T_s)}{T_s} \right] \quad (8)$$

Onde  $e(kT_s - T_s)$  é o sinal de erro no período anterior e a constante de derivação é  $K_D = K_P \cdot T_D$ . O controlador PID pode ser descrito pela soma das equações (3), (5) e (7):

$$x(t) = x_p(t) + x_i(t) + x_d(t) \quad (9)$$

Na forma discreta esta expressão pode ser escrita em função dos instantes de amostragem, igualmente espaçados ( $kT_s$ ):

$$x(kT_s) = x_p(kT_s) + x_i(kT_s) + x_d(kT_s) \quad (10)$$

Substituindo os resultados obtidos pelas equações (4), (6) e (8):

$$x(kT_s) = K_P \cdot e(kT_s) + \{x_i(kT_s - T_s) + K_I \cdot (e(kT_s) \cdot T_s)\} + \left\{ K_D \cdot \left[ \frac{e(kT_s) - e(kT_s - T_s)}{T_s} \right] \right\} \quad (11)$$

O algoritmo PID digital utilizado neste trabalho foi derivado da equação (11). O algoritmo é gravado na memória de programa do microcontrolador e não pode ser alterado. O código-fonte deste algoritmo é apresentado em detalhes ao aluno, pois a sua estrutura pode ser utilizada em outras aplicações que necessitam de um controle PID.

## 2.7 Gráficos

O gráfico da Figura 7 mostra um resultado prático obtido com o kit durante uma aula de laboratório. Foi aplicado um degrau de velocidade igual a 4100 rpm na planta e o comportamento de sua curva de resposta ao degrau ao longo do tempo foi obtido graficamente. Desta curva, temos que:  $L = 0,23$  s  $T = 1,47$  s.

Com o auxílio da Tabela 1, encontramos:  $K_P = 7,67$   $T_I = 0,46$  e  $T_D = 0,88$ .

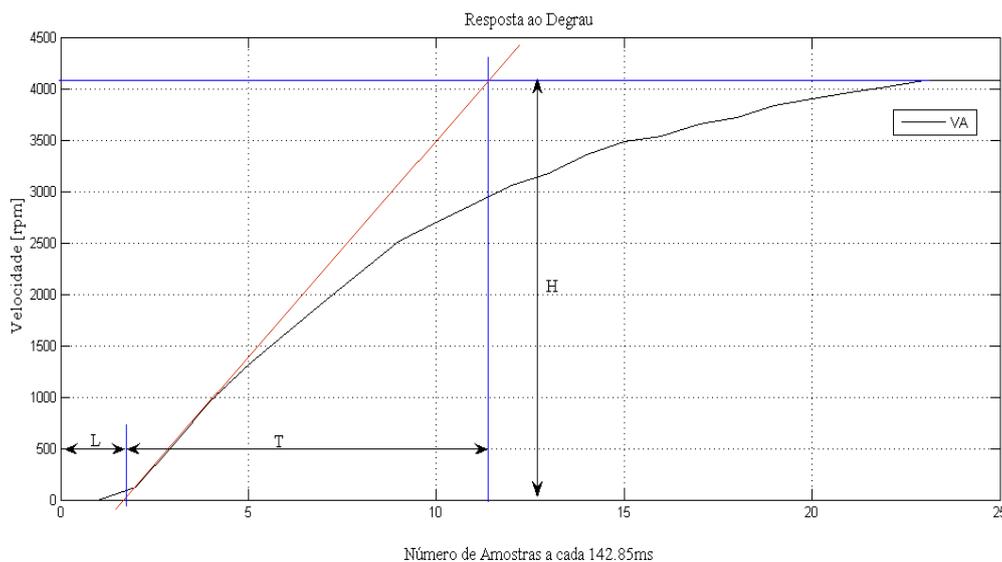


Figura 7 – Curva de resposta ao degrau da planta.

Logo, os parâmetros de sintonia para o controle digital,  $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$ , para  $T_S = 142,85$  ms foram:  $K_P=7,67$ ,  $K_I= 16,67$  e  $K_D= 0,88$ . Com estes parâmetros foi possível realizar a etapa de controle de velocidade do cooler. O resultado desta etapa é apresentado na Figura 8.

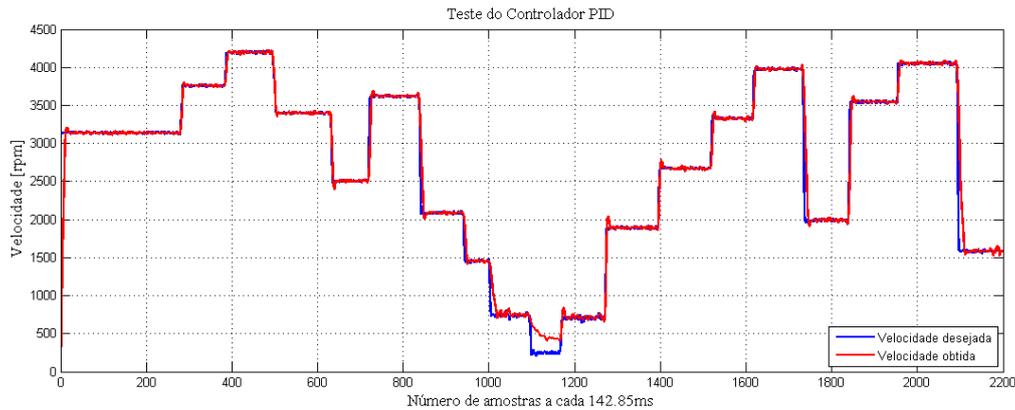


Figura 8 – Resultado experimental do controle de velocidade do cooler.

De acordo com a Figura 8, podemos concluir que o controlador digital fez o ajuste correto da velocidade desejada, pois a velocidade obtida encontra-se quase que sobreposta à velocidade desejada.

## 2.8 Procedimento experimental didático

O procedimento experimental didático é dividido em duas aulas experimentais.

Na primeira aula, todos os componentes do kit são explicados em detalhes, de forma parecida como é exposto nas subseções 2.1 a 2.6 deste artigo, sempre fazendo uma analogia com a teoria já vista em sala de aula. Em seguida, o aluno realiza a etapa de resposta ao degrau com o kit PID, plota o respectivo gráfico e encontra os valores de  $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$ , com o auxílio da Tabela 1.

Na segunda aula, o aluno realiza as etapas de sintonia e controle com o kit PID. O aluno então pode verificar experimentalmente que o método de sintonia de Ziegler-Nichols e o controlador digital PID são realmente eficientes no controle de velocidade.

## 3. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos por este kit didático foram considerados positivos na visão tanto dos alunos como pelo professor. Através do kit, os alunos puderam aplicar os conhecimentos adquiridos de uma forma experimental, pois muitas vezes o custo elevado dos kits disponíveis no mercado não permite esta abordagem experimental. O custo total estimado do kit foi de R\$ 60,00, o que viabilizou a confecção de mais kits para a utilização em todas as bancadas.

Pode-se verificar um aumento de interesse dos estudantes na utilização deste kit, pois estes sugeriram a construção de outro kit PID para aplicação no controle de temperatura de um mini-forno comercial.

### *Agradecimentos*

Agradecimentos ao Fundo de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão (FAEPE/UEL), pelo apoio recebido na forma de verba para compra de componentes para confecção dos próximos kits. Ao Departamento de Engenharia Elétrica da UEL, por proporcionar a estrutura física, equipamentos e pessoal que tornou possível a realização do projeto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORDON, M. E. **Controlador PID Microprocessado**. 1993. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

LEIGH, J. R. **Applied Digital Control**. London: Ed. Prentice Hall Internation, 1985.

MATIAS, J. **Teoria de Controle PID**. Mecatrônica Atual, v. 1, n. 3, p. 17-25, 2002.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Ed. Prentice Hall, 2003.

PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC: Programação em C**. São Paulo: Ed. Érica, 2006.

## TEACHING KIT WITH LOW COST DIGITAL PID

**Abstract:** *This article presents the design of a teaching kit with digital controller PID aimed at upgrading the student front of the trend line of experimental approaches to this type of controller. The kit uses the microcontroller PIC16873 and makes adjustments to control the speed of the fan (cooler). The interface is simple because it uses the software Hyperterminal of Windows (Microsoft) and generation of graphics can be in any software for viewing information because the kit provides the data in files type txt. The kit was useful because the students learned to get the parameters of tune, and once acquired, to enter the values for the tune of control PID, widely used in industrial processes.*

**Key-words:** *Teaching Kit, PID, PWM*