

Karl Friedrieck Stahlke

**Controle
para Túnel de Vento Visando Número de Reynolds
como Variável controlada**

**Orientador:
Prof. Dr. Jurandir Yanagihara**

**SÃO PAULO
1995**

AGRADECIMENTOS:

À minha esposa Regina pela paciência e compreensão, ao meu amigo e chefe Sílvio Figueiredo pelo apoio e suporte, ao meu amigo Sabanai pela paciência e disposição e ao meu orientador Prof. Dr. Jurandir Yanagihara pela força e visão.

ÍNDICE

1. RESUMO.....	1
2. INTRODUÇÃO.....	3
3. DESCRIÇÃO DO APARATO.....	5
4. DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO.....	8
4.1. Túnel de Vento.....	8
4.2. Ventilador.....	10
4.3. Motor Elétrico/Ventilador(resposta dinâmica).....	13
4.4. Sensor de Temperatura.....	14
4.5. Sensor de Vazão.....	15
5. LÓGICA DE CONTROLE.....	19
5.1. Malha de Controle.....	19
5.2. Estratégia de Controle.....	21
5.3. Determinação dos Ganhos Gerais.....	22
5.4. Equação Característica do Sistema.....	25
5.5. Parâmetros do Controlador.....	26
6. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DE CONTROLE.....	29
7. DISCUSSÃO.....	35
8. CONCLUSÃO.....	36
9. BIBLIOGRAFIA.....	37

APÊNDICE A: Curva do Ventilador

APÊNDICE B: Planilha de Cálculos

APÊNDICE C: Diagrama de blocos para simulação

APÊNDICE D: Gráficos provenientes das simulações

APÊNDICE E: Programa principal já implementado no laboratório

APÊNDICE F: Subrotinas usadas no algoritmo de controle

1. RESUMO

Este Trabalho consiste na modelagem de um sistema composto de túnel de vento, medidores de temperatura, medidores de vazão, ventilador e motor de acionamento, variador de frequência para o motor e um controlador a ser programado em computador, com o objetivo final de se conseguir que, dado um determinado número de Reynolds, o sistema se acomode da melhor forma possível para que o valor fixado seja mantido. Considera-se como perturbação a variação de temperatura atmosférica, que tende a alterar a massa específica, e consequentemente a viscosidade dinâmica do ar, o que causa variação no núm. de Reynolds. Considera-se também, como parte do projeto, a análise dinâmica do conjunto, quando este é submetido a uma entrada em degrau no valor de referência do núm. De Reynolds.

Feitas as modelagens dos componentes do sistema, partiu-se para a determinação das funções de transferência, através das quais foi desenvolvido o diagrama de blocos, incluindo o controlador. Utilizou-se o critério de Routh para se determinar o ganho limite para o controlador.

Foram feitas simulações dinâmicas do sistema sem e com o controlador, para a determinação dos ganhos ótimos para o controlador, e para comparação do sistema não controlado e controlado. Foi usado o recurso Simulink, do programa MATLAB, para esse fim. Foram plotados gráficos das simulações que levaram à escolha do controlador e dos ganhos.

Foi encontrada dificuldade para a implementação de um controlador PID, devido a problemas de saturação. Os melhores resultados para o controlador foram obtidos para um controlador proporcional. Um controlador proporcional e integral, PI, foi considerado como a segunda melhor opção.

Após se ter chegado à definição do controlador, foi desenvolvido um algoritmo, para a implementação do controlador.

O trabalho de montagem do equipamento foge do escopo deste trabalho. Foi feita uma análise superficial do aparato experimental já construído, assim como sugestões a serem implementadas. O fim deste trabalho é portanto estabelecer um caminho de solução para o controle do túnel de vento, assim como desenvolver o algoritmo para implementação em computador.

2. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é o projeto e implantação de um sistema de controle para manter o número de Reynolds constante na seção de testes em um túnel de vento de múltiplas possibilidades de uso.

A implementação do túnel de vento está sendo feita paralelamente ao desenvolvimento deste projeto de controlador, e sua finalidade é a realização de experimentos com intensificação de transferência de calor.

O objetivo do controle é manter o número de Reynolds constante, considerando-se que a temperatura ambiente varia ao longo das vinte e quatro horas de um dia. A variação da temperatura atmosférica altera a viscosidade dinâmica do ar que é inversamente proporcional ao número de Reynolds. A necessidade desse controle se dá por que os testes a serem realizados terão, com frequência, duração longa. As ações de controle são realizadas pela mudança da rotação do ventilador, e o 'feed back' pela leitura da vazão, através de placas de orifício. A perturbação causada pela variação da temperatura, é medida por termopares.

Outro estudo também relevante é do comportamento dinâmico do sistema sem e com o controlador, dado um degrau no set-up (valor de referência do número de Reynolds).

Através de um programa em microcomputador pode-se controlar o variador de frequência, que por sua vez controla a rotação do motor.

Em primeira instância, pretende-se resolver o problema de, dado um número de Reynolds desejado, fixo, corrigir-se a vazão volumétrica, considerando-se que

há variação na viscosidade dinâmica pela variação da temperatura. Isto é facilmente feito, dado que as variações de temperatura tem um período longo, e de pequena amplitude relativa (10°C em 24 horas).

Em segunda instância, deseja-se resolver o proplema dinâmico acrescentando-se um transitório, ou seja a resposta do sistema a uma entrada em degrau no valor de referência do número de Reynolds. Para tal é importante que o sistema chegue ao valor setado de forma rápida e ao mesmo tempo sem muitas oscilações. Isso é basicamente resolvido por uma boa escolha dos parâmetros de controle, à saber, o ganho do controlador, o ganho proporcional, o tempo integral e o tempo derivativo.

3. DESCRIÇÃO DO APARATO

Na figura 1 está representado o aparato túnel de vento, composto do túnel, propriamente dito, de medidores de temperatura, pressão e vazão, e de um ventilador acionado por motor elétrico AC.

TÚNEL DE VENTO

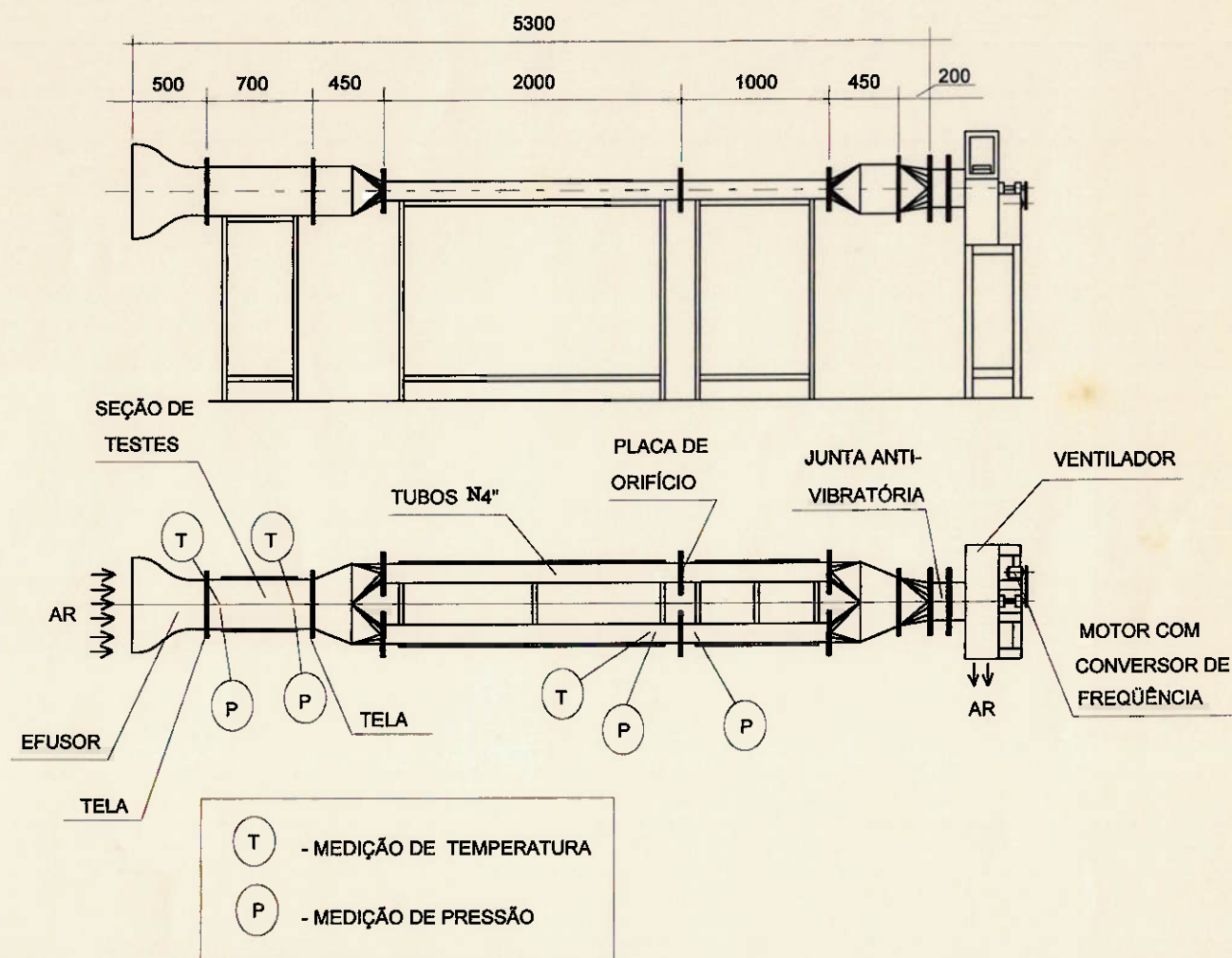


figura 1: desenho esquemático do túnel de vento. (cortesia Eng. Sabanai)

O túnel, propriamente dito, compõem-se de:

- bocal ou efusor, na entrada do túnel; construído com resina acrílica e fibras de vidro, cujas dimensões são : boca de entrada, 500x500 mm; boca de saída, 260x260 mm, provida de flanges;
- seção de testes; feita em chapas de acrílico transparente de 10 mm de espessura, com 700 mm de comprimento, 260x260 mm de secção, também provida de flanges;
- dutos de estabilização para medição de vazão; são dois dutos de diâmetro 4 polegadas (int. de 101 mm), de 2000 mm de compr., à montante das placas de orifício;
- placas de orifício; há duas placas de diâmetro interno 66,3 mm; conforme norma ISO 5167-1-1991(E) a tomada de pressão à montante dista o diâmetro interno da tubulação (101 mm), e a tomada à montante dista meio diâmetro (50,5 mm).
- dutos pós medição de vazão; são dois dutos de 4 polegadas (101 mm int.) de 1000 mm de compr., à juzante das placas de orifício;
- transição de quadrado, 260x260 mm, para duplo redondo, diâmetro 101 mm; encontra-se na entrada dos dutos de estabilização;
- transição de duplo redondo, diâm. 101 mm, para redondo, diâm. 130 mm; encontra-se na saída dos dutos pós medição de vazão;
- junta anti-vibratória; liga a transição duplo redondo/redondo à entrada do ventilador, de 130 mm de diâm.;
- telas para uniformização do fluxo e que também servem como proteção do equipamento; há duas telas, uma à montante da seção de testes e outra à juzante;

Para atingir os objetivos deste trabalho, os medidores utilizados são seis: os quatro termopares que se encontram logo depois da seção de testes do túnel e os dois medidores de vazão.

Os termopares são do tipo J, ferro constantan. Tem por objetivo medir a temperatura média do ar que passa pela seção de testes, para se determinar a alteração da massa específica do ar, que varia com a temperatura, e consequentemente, da viscosidade dinâmica, que é o que interessa para a correção do número de Reynolds.

O ventilador é do tipo radial, com a carcaça medindo cerca de 720 mm em sua maior extensão e 550 mm do eixo até a base. O diâm. de entrada é 130 mm. A saída está conectada a um duto que promove a exaustão para fora da sala de testes.

O motor elétrico é de corrente alternada, trifásico, 220V-360V, 60 Hz, 2 polos, 5 Hp, marca WEG. Deve-se notar que a potência do motor supera em muito a necessidade atual do túnel de vento. Essa potência à mais deve-se a outros futuros planos de utilização do túnel.

O motor é regulado por um variador de frequência, da marca TOSHIBA, modelo VF-SXN, 3,7 KW, capacidade de conversão de 0 a 240 Hz, trifásico, 220 V, e permite sobrecorrente de 50 %.

É usado um microcomputador que se conecta com as entradas e a saída. As entradas são os sinais dos termopares e os sinais dos dois medidores de vazão, cujas diferenças de pressão são medidas por transdutores de pressão. A saída do computador leva o sinal de controle para o variador de frequência.

4. DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO

4.1. Túnel de vento

A influência do túnel de vento como sistema dinâmico é importante para o modelo de controle, pois as perdas de carga assim como suas dimensões agem diretamente sobre a vazão.

Adotando-se uma secção transversal ao escoamento e de comprimento infinitesimal, pode-se escrever a equação da quantidade de movimento para o elemento de massa correspondente, como mostra a figura 2 :

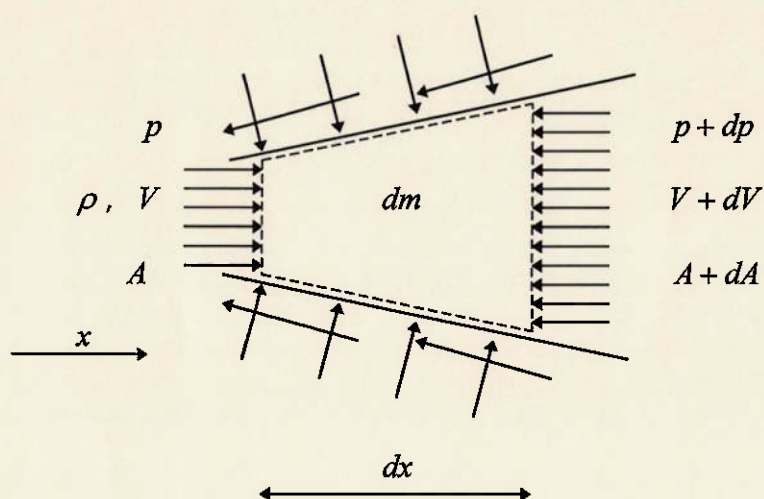


Figura 2 : elemento de massa do sistema.

Pela equação da Quantidade de Movimento, têm-se:

$$\frac{d}{dt}(m \cdot v) = \sum F_{ext} \quad (1)$$

No caso do elemento representado na figura 2, obtém-se:

$$\rho \cdot A \cdot dx \cdot \frac{dv}{dt} = -A \cdot dp - \tau \cdot S(x) \cdot dx \quad (2)$$

onde : ρ : massa específica do ar;

A : área da secção transversal na abscissa x ;

dx : elemento diferencial de comprimento;

v : velocidade média na secção;

dp : elemento diferencial de pressão;

τ : tensão de cisalhamento pelo atrito com as paredes do túnel;

$S(x)$: perímetro ao longo do túnel.

Note-se que a velocidade em cada secção foi admitida uniforme, o que é razoável para um escoamento turbulento plenamente desenvolvido.

Dividindo-se a equação (2) por $A(x)$ e integrando-se ao longo do comprimento total do túnel, obtém-se:

$$\rho \cdot \frac{dQ}{dt} \cdot \int_0^L \frac{1}{A(x)} \cdot dx = - \int_0^L \left(\frac{dp}{dx} \right) \cdot dx - \int_0^L \frac{\tau \cdot S(x)}{A(x)} \cdot dx \quad (3)$$

Essa integração leva ao seguinte resultado :

$$\frac{\rho}{L_{eq}} \cdot \frac{dQ}{dt} = (\Delta p)_{\text{ventilador}} - k \cdot Q^2 \quad (4)$$

onde :

k : constante de perda de carga do túnel de vento a ser determinado pelas condições de operação;

L_{eq} é proveniente da integração na equação (3):

$$L_{eq} = \frac{1}{\int_0^L \frac{dx}{A(x)}} \quad (5)$$

Deve-se observar que a equação (4) é não linear em Q e em $(\Delta p)_{ventilador} = \Delta p(Q)$.

4.2 Ventilador

A relação da pressão estática desenvolvida pelo ventilador em função da vazão no túnel pode ser modelada através dos adimensionais do ventilador, extraídos de [1]:

$$\Psi = \frac{\Delta p}{d_v^2 \cdot n^2 \cdot \rho} \quad (6)$$

$$\Phi = \frac{Q}{d_v^3 \cdot n} \quad (7)$$

A curva de trabalho do ventilador pode ser aproximada por uma parábola da forma:

$$\Psi = A \cdot \Phi^2 + B \cdot \Phi + C \quad (8)$$

As constantes A , B e C são determinadas à partir da curva real do ventilador em questão (apêndice A).

Substituindo-se as equações (6) e (7) na equação (8), e isolando deixando-a em função de Δp , obtém-se:

$$\Delta p = \frac{A \cdot \rho}{d_v^4} \cdot Q^2 + \frac{B \cdot \rho}{d_v} \cdot n \cdot Q + C \cdot d_v^2 \cdot n^2 \cdot \rho \quad (9)$$

Usando, agora a equação (4), referente ao sistema-túnel, e substituindo (9) em (4), obtém-se:

$$\frac{\rho}{L_{eq}} \cdot \frac{dQ}{dt} = K_Q \cdot Q^2 + K_{NQ} \cdot Q \cdot n + K_N \cdot n^2 \quad (10)$$

onde :

$$K_Q = \left[\frac{A \cdot \rho_0}{d_v^4} - k \right] \quad (11)$$

$$K_{NQ} = \left(\frac{B \cdot \rho_0}{d_v} \right) \quad (12)$$

$$K_N = \left(C \cdot d_v^2 \rho_0 \right) \quad (13)$$

Linearização:

No ponto de operação (Q_0, n_0) tem-se o equilíbrio desejado. A derivada da vazão deve ser nula nesse ponto:

$$0 = K_Q \cdot Q_0^2 + K_{NQ} \cdot n_0 \cdot Q_0 + K_N \cdot n_0^2 \quad (14)$$

Para pequenos deslocamentos, pode-se reduzir as variações de Q e n da seguinte forma:

$$\frac{dQ}{dt} = \left. \frac{dQ}{dt} \right|_0 + \Delta \left(\frac{dQ}{dt} \right) \quad (15)$$

e

$$Q = Q_0 + \Delta Q \quad (16)$$

$$n = n_0 + \Delta n \quad (17)$$

Substituindo as equações (15), (16) e (17) na equação (10), e subtraindo a equação (14), obtém-se:

$$\frac{\rho}{L_{eq}} \cdot \frac{d\bar{q}}{dt} = \bar{q} \cdot (2 \cdot K_Q \cdot Q_0 + K_{NQ} \cdot n_0) + \bar{n} \cdot (K_{NQ} \cdot Q_0 + 2 \cdot K_N \cdot n_0) \quad (18)$$

onde :

$$\bar{q} = \Delta Q \quad (19)$$

e

$$\bar{n} = \Delta n \quad (20)$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação (18), e isolando a função de transferência entre vazão e rotação, obtém-se:

$$G_p(s) = \frac{\bar{q}(s)}{\bar{n}(s)} = \frac{K_{PL}}{\tau_{PL} \cdot s - 1} \quad (21)$$

onde:

$$K_{PL} = - \frac{(K_{NQ} \cdot Q_0 + K_N)}{(2 \cdot K_Q \cdot Q_0 + K_{NQ} \cdot n_0)} \quad (22)$$

$$\tau_{PL} = \frac{-\rho}{L_{eq} \cdot (2 \cdot K_Q \cdot Q_0 + K_{NQ} \cdot n_0)} \quad (23)$$

Observe-se que, com a linearização, a planta a ser controlada passa a ser de 1ª ordem.

4.3. Motor Elétrico/Ventilador (resposta dinâmica)

A resposta dinâmica do motor e a do ventilador estão intimamente ligadas, pois as pás do ventilador estão solidárias ao eixo do motor. Esse sistema motor/ventilador pode ser modelado como um sistema de resposta de 1ª ordem:

$$G_m(s) = \frac{n(s)}{f(s)} = \frac{K_{MV}}{\tau_{MV} \cdot s + 1} \quad (24)$$

onde :

$n(s)$: rotação do rotor do ventilador;

$f(s)$: sinal de frequência que o computador emite para o variador de frequência;

K_{MV} : ganho do motor/ventilador;

τ_{MV} : tempo de resposta do motor/ventilador.

O ganho do motor/ventilador é dado pela relação entre a faixa de rotação do rotor do ventilador ($N_{\max} - N_{\min.}$) e a faixa de frequência do sinal de controle que chega ao variador de frequência ($f_{\max.} - f_{\min.}$):

$$K_{MV} = \frac{N_{\max.} - N_{\min.}}{f_{\max.} - f_{\min.}} \left[\frac{\text{Hertz}}{\text{Hertz}} \right] \quad (25)$$

Essa rotação máxima já leva em consideração um escorregamento médio, que ocorre gradativamente entre o rotor e o estator do motor.

4.4. Sensor de temperatura

Os sensores de temperatura são termopares do tipo J, e estes ficam alojados na saída da seção de testes. Suas conexões são feitas diretamente ao computador onde está há um programa de aquisição de dados já implementado (apêndice 5), que transmite os valores ao programa de controle.

Estes termopares tipo J têm uma curva da relação tensão versus temperatura, que, na faixa de utilização, é praticamente linear.

O termopar como sistema dinâmico é de primeira ordem e o ganho do termopar pode ser resumido a uma constante que é a derivada da reta linear:

$$K_T = \frac{dV}{dT} \left[\frac{\text{Volts}}{^{\circ}\text{C}} \right] \quad (26)$$

Existe um detalhe que faz com que na prática o ganho do termopar seja unitário, e este é que o que será lido pelo programa controlador será a

temperatura em graus célius, dado que a leitura do termopar é feita por um programa específico de aquisição de dados, que já transforma voltagem em graus Célcus. Apesar de o ganho ser unitário o tempo de resposta do termopar é importante para o estudo do comportamento dinâmico do sistema completo.

Dessa forma, a função de transferência do termopar fica da seguinte forma:

$$G_T(s) = \frac{1}{\tau_T \cdot s + 1} \quad (27)$$

onde:

τ_T : tempo de resposta do termopar.

4.5. Sensor de vazão

A medição de vazão é feita através de duas placas de orifício, alojadas em uma secção circular, à juzante da secção de testes. Há dois duto com 20 diâmetros de comprimento antes dos bocais, para que, com segurança, seja garantida a estabilização do fluxo.

O princípio de medição é a obtenção da diferença de pressão entre o lado à juzante e o lado à montante da placa. A equação que relaciona essa pressão com a vazão volumétrica que se deseja efetivamente medir está à seguir [2]:

$$Q_V = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot C_D \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot l_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (28)$$

onde :

- Q_V : vazão volumétrica;
- d : diâmetro interno da placa de orifício;
- C_D : coeficiente de descarga da placa;

ε : coeficiente de expansão volumétrica;

Δp : diferencial de pressão medida;

l_1 : distância entre a superfície da placa à montante, e a tomada de pressão à montante;

$\beta = \frac{d}{D}$: razão entre diâmetro interno da placa e o diâmetro da secção onde está a placa de orifício;

ρ : massa específica do ar.

Esta equação é altamente não linear em Q_v e Δp , pois o coeficiente de descarga é função de Q_v e o coeficiente de expansão volumétrica é função de Δp , como mostram as seguintes relações [2]:

$$C_d = 0,5959 + 0,0312 \cdot \beta^{2,1} - 0,1840 \cdot \beta^8 + 0,0029 \cdot \beta^{2,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,75} + 0,9 \cdot L_1 \cdot \beta^4 \cdot (1 - \beta^4)^{-1} - 0,0337 \cdot L'_2 \cdot \beta^3$$

(29)

e

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot \beta^4) \cdot \frac{\Delta p}{k \cdot p_1} \quad (30)$$

onde :

$$Re_D = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot D \cdot \nu} : \text{adimensional de Reynolds em função do diâmetro da}$$

secção circular; (31)

$$L_1 = \frac{l_1}{D} \quad (32)$$

$$L'_2 = \frac{l'_2}{D} \quad (33)$$

l'_2 : distância da tomada de pressão à juzante da placa de orifício.

Apesar deste equacionamento, assim como no caso do termopar, a leitura é feita por um programa de aquisição de dados, e portanto, o ganho do medidor de vazão é unitário, pois o programa lerá em unidades de vazão ao invés de ler unidades de pressão. O que deve ser considerado é o tempo de resposta do medidor, assim como no caso do termopar.

A função de transferência do medidor de vazão fica, portanto:

$$G_V(s) = \frac{1}{\tau_V \cdot s + 1} \quad (34)$$

onde:

τ_V : tempo de resposta do medidor e vazão.

Para o cálculo do ganho de transformação de variação de temperatura para variação de núm. de Reynolds, é preciso proceder a uma linearização, pois a temperatura é inversamente proporcional ao núm. de Reynolds. Pelo gráfico da figura 4 (mais adiante neste texto) nota-se que para a configuração de equilíbrio, e nas regiões próximas, existe uma quase linearidade.

Fazendo-se a linearização, teremos a seguinte relação entre variação de núm. de Reynolds e Temperatura atmosférica:

$$K_{TR} = \frac{Re_{max.} - Re_{min.}}{T_{min.} - T_{max.}} \quad (35)$$

onde :

Re_{max} : Número de Reynolds superior para linearização;

Re_{min} : Número de Reynolds inferior para linearização;

T_{min} : Temperatura mínima para linearização;

T_{max} : Temperatura máxima para linearização;

O ganho de transformação de vazão em núm. de Reynolds é dado pela seguinte fórmula:

$$K_{QR} = \frac{D_H}{\nu_0 \cdot A_{ST}} \quad (36)$$

onde :

D_H : diâmetro hidráulico do corpo de prova a sofrer transferência de calor;

A_{ST} : área total da seção de testes;

ν_0 : viscosidade dinâmica do ar média.

5. LÓGICA DE CONTROLE

5.1. Malha de controle

A malha de controle a ser adotada leva em conta que a entrada de referência da malha de controle, assim como a saída da malha são parâmetros que o computador manipula, pois o número de Reynolds é um resultado indireto, que depende de cálculo para ser determinado. Ao mesmo tempo que o programa de computador provê o número de Reynolds de referência, determina por meio de cálculo qual o número de Reynolds de saída, levando em conta a vazão no túnel e a variação da viscosidade dinâmica causada pela variação de temperatura atmosférica.

A malha de controle é representada na figura 3:

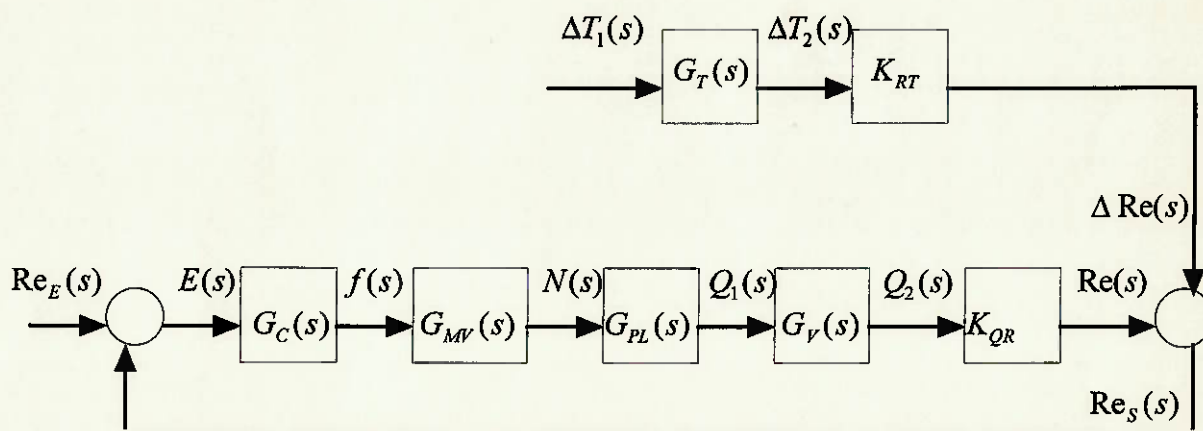


Figura 3 : malha de controle do sistema.

Onde :

Re_E : núm. de Reynolds de referência (set-up);

Re_S : núm. de Reynolds de saída;

$G_C(s)$: função de transferência do controlador;

$G_{MV}(s)$: função de transferência do motor/ventilador;

$G_{PL}(s)$: função de transferência da planta;

$G_V(s)$: função de transferência do medidor de vazão;

K_{QR} : ganho de transformação de vazão em núm. de Reynolds;

$\Delta T_1(s)$: função perturbação, variação de temperatura em relação a uma temperatura T_0 .

$\Delta T_2(s)$: função perturbação de temperatura, defasada pelo tempo de resposta do termopar;

K_{TR} : ganho de transformação da variação de temperatura em variação de núm. de Reynolds;

$E(s)$: erro entre set-up e saída;

$f(s)$: sinal de frequência do controlador para o conjunto variador, motor e ventilador;

$N(s)$: rotação do rotor do ventilador;

$Q(s)$: vazão volumétrica no túnel;

$Re(s)$: núm. de Reynolds intermediário;

ΔRe : variação do núm. de Reynolds pela variação da temperatura;

As equações de transferência são :

Entre saída e a entrada de referência:

$$\frac{Re_S(s)}{Re_R(s)} = \frac{K_{QR} \cdot G_{MV}(s) \cdot G_V(s) \cdot G_{PL}(s) \cdot G_C(s)}{1 + K_{QR} \cdot G_{MV}(s) \cdot G_V(s) \cdot G_{PL}(s) \cdot G_C(s)} \quad (37)$$

Entre saída e a perturbação pela variação de temperatura:

$$\frac{Re_s(s)}{\Delta T(s)} = \frac{K_{TR}}{1 + K_{QR} \cdot G_{MV}(s) \cdot G_V(s) \cdot G_{PL}(s) \cdot G_C(s)} \quad (38)$$

O denominador, comum às duas equações acima, quando igualado a zero, é a equação característica do sistema, e é através dela que se fará a análise de estabilidade do sistema controlador/túnel.

5.2. Estratégia de controle

Existem várias estratégias de controle, como : P., P.I., P.D., P.I.D. Para se conseguir os melhores resultados, a estratégia P.I.D. é a mais indicada, em primeira instância, pois ela reúne a propriedade do integrador (I.), de levar o erro a zero, e a propriedade do derivativo (D.), de adiantar-se no tempo para que o controle seja feito o mais rápido possível.

Com essa estratégia em mente pode-se definir o ganho do controlador como:

$$G_C(s) = K_C \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_I \cdot s} + \tau_D \cdot s \right) \quad (39)$$

onde :

K_C : ganho do controlador;

τ_I : tempo integral;

τ_D : tempo derivativo.

O tempo integral terá como estimativa a mesma ordem do tempo de resposta do túnel de vento.

O tempo derivativo terá como estimativa um quarto do tempo integral.

O ganho do controlador será determinado através da análise de estabilidade pelo critério de Routh.

5.3. Determinação do ganhos gerais

Para se obter os ganhos de malha fechada, acima descritos, é preciso que se conheçam os ganhos e funções de transferência de cada componente da malha de controle, antes de se partir para a determinação da equação característica em função dos ganhos de malha fechada.

Para se calcular o ganho do motor/ventilador, precisamos conhecer:

$$f_{\min.} = 0Hz \quad (40)$$

$$f_{\max.} = 150Hz \quad (41)$$

$$N_{\min.} = 0rpm \quad (42)$$

$$N_{\max.} = 3500rpm \quad (43)$$

Então teremos, de acordo com a equação (24):

$$K_{MV} = 23,33 \left[\frac{rpm}{Hz} \right] = 0,3889 \left[\frac{Hz}{Hz} \right] \quad (44)$$

Através do gráfico do fabricante do ventilador (vide apêndice A) foi possível determinar as constantes da aproximação da curva por uma parábola, conforme equação (8). Essa determinação foi feita à partir de três pontos da curva: $(250 \frac{m^3}{h}, 1750Pa)$, $(500 \frac{m^3}{h}, 1500Pa)$ e $(750 \frac{m^3}{h}, 1000Pa)$ Os valores das mesmas são:

$$\begin{aligned}\left(\frac{A \cdot \rho}{d^4} - k\right) &= -25,920 \\ \left(\frac{B \cdot \rho}{d}\right) &= 1800 \\ d^2 \cdot \rho \cdot C &= 1750\end{aligned}\quad (45)$$

Para a temperatura de $20^\circ C$, foram determinadas as constantes [3] :

$$\rho_0 = 1,2 \text{ Kg/m}^3 \quad (46)$$

$$\nu_0 = 1,518 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (47)$$

O ponto de operação do sistema é:

$$Q_0 = 500 \text{ m}^3/\text{min.} = 0,139 \text{ m}^3/\text{s} \quad (48)$$

$$n_0 = 2000 \text{ rpm} = 33,33 \text{ Hz} \quad (49)$$

Com os valores (45) a (49) pode-se calcular, segundo as equações (11), (12), e (13) :

$$K_Q = -340,578 \text{ Kg/m}^7 \quad (50)$$

$$K_{NQ} = 54,01 \text{ Kg/m}^4 \quad (51)$$

$$K_N = 1,58 \text{ Kg/m} \quad (52)$$

Através da somatória para toda a tubulação, determina-se a equação (5) :

$$L_{eq} = 0,0046 \text{ m} \quad (53)$$

Substituindo de (50) a (53) na equação (21), chega-se à equação de ganho da planta :

$$G_{PL}(s) = \frac{0,00411}{0,1182 \cdot s + 1} [m^3] \quad (54)$$

Dados :

$$D_H = 0,025m \quad (56) ;$$

$$A_{ST} = 0,0676m^2 \quad (57) ;$$

Com (49), (56) e (57), calcula-se (36) :

$$K_{QR} = 24.362,48 \frac{s}{m^3} \quad (58)$$

Para o cálculo da transformação da variação da temperatura para variação do número de Reynolds, usa-se o gráfico da figura 4.

onde :

$$Re_{max} = 3635 \quad (59)$$

$$Re_{min} = 3220 \quad (60)$$

$$T_{min} = 0^\circ C \quad (61)$$

$$T_{max} = 35^\circ C \quad (62)$$

Substituindo os valores (59) a (62) em (35), resultará em:

$$K_{TR} = -11,86 \left[\frac{1}{^\circ C} \right] \quad (63)$$

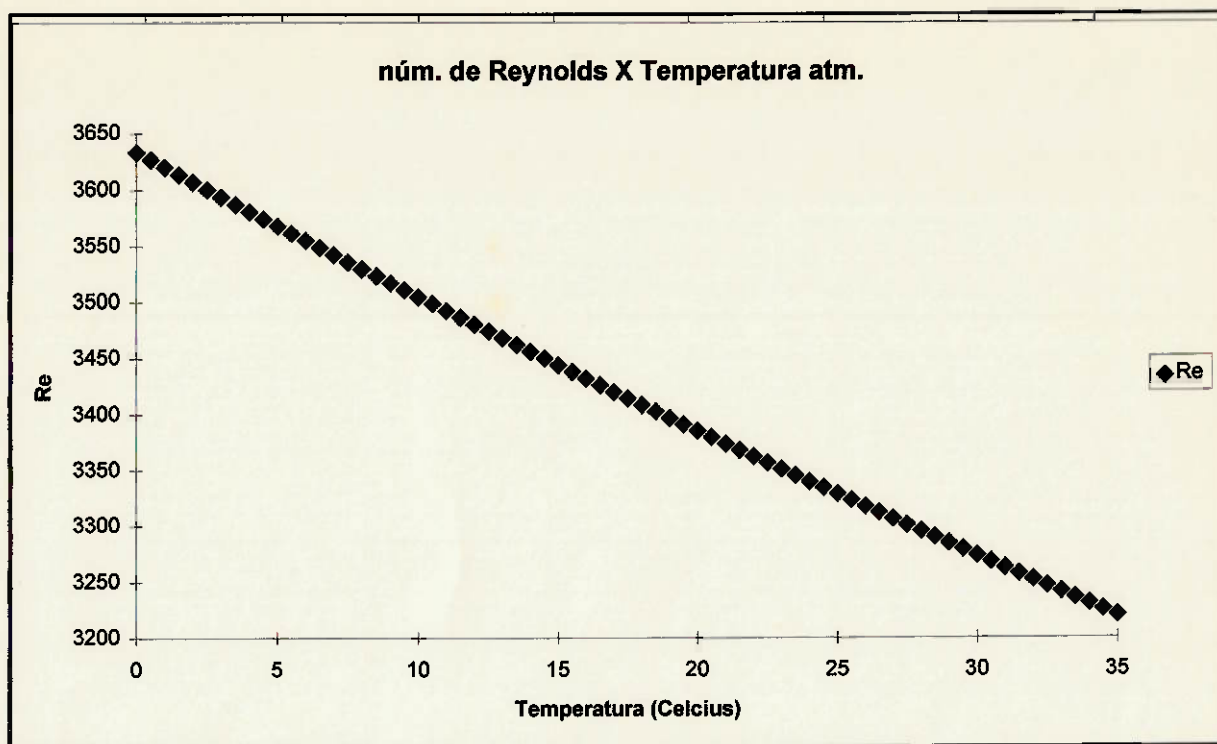


Figura 4: Núm. de Reynolds em função da temperatura atmosférica, para velocidade na seção de testes igual a 2,06 m/s (vazão de 500 m³/h), e diâmetro hidráulico de 25 mm. Cálculos feitos para viscosidade dinâmica constante igual a $1,518 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

5.4. Equação característica do sistema

O passo seguinte neste processo é determinar a equação característica em função dos ganhos de malha fechada. Para isso é só substituir os valores dos ganhos dos componentes do sistema na equação formada pelo denominador das funções de transferências entre saída e entrada e entre saída e perturbação (37) e (38) respectivamente. A Equação característica é :

$$1 + K_{QR} \cdot G_{MV}(s) \cdot G_V(s) \cdot G_p(s) \cdot G_c(s) = 0 \quad (64)$$

Fazendo-se a substituição acima mencionada, e deixando a equação em forma de potências de s , tem-se a seguinte equação de segundo grau em s :

$$s^4 + 13,84 \cdot s^3 + \left(46,83 + 14,37 \cdot \frac{K_c}{\tau_D}\right) \cdot s^2 + (14,11 + 16.460 \cdot K_c) \cdot s + 1945,6 \cdot \frac{K_c}{\tau_I} = 0 \quad (65)$$

5.5. Parâmetros do controlador

Para a determinação dos parâmetros do controlador, foram tomadas as seguintes medidas para os tempos integral e derivativo (conforme já mencionado acima):

$$\tau_I \approx \text{tempo_do_tunel} = 0,1182 \text{seg.} \quad (66)$$

$$\tau_D = \frac{\tau_I}{4} = 0,029 \text{seg.} \quad (67)$$

Através de uma planilha (apêndice B) foram feitos os cálculos dos ganhos já descritos acima, e também foram adotados os tempos de resposta para o conjunto motor/ventilador e o medidor de pressão, conforme é dado à seguir:

$$\tau_{MV} = 3 \text{seg.} \quad (68)$$

$$\tau_V = 0,2 \text{seg.} \quad (69)$$

Os valores obtidos pelo critério de Routh foram testados dinamicamente através do utilitário SIMULINK, do programa MATLAB. O diagrama de blocos criado para se fazer a simulação dinâmica tanto da planta controlada quanto da planta sem o controle está no apêndice C. Para simular o degrau no set-up foi utilizado

um simulador de função degrau seguido de um ganho que representa o número de Reynolds desejado. Para simular a variação de temperatura diária, foi utilizada uma função senoidal cujo período é 24 horas, e a amplitude de variação é 10 graus Célcius.

Foram testados vários valores de K_C : 0,019 ; 0,122 ; 1,94 ; 10 e 100 , e o resultado de todos os testes não se enquadrou dentro do esperado, pois todos apresentara grandes oscilações até chegarem a convergir. Os gráficos 1 a 5, do apêndice D, representam as respostas do controlador, assim como a resposta da planta controlada e da planta sem o controle (para comparação). Foi também testado o valor 0,002, e se obteve o resultado do gráfico 6, que é aceitável do ponto de vista de estabilidade, pois oscila muito pouco. Apesar disso, o tempo de assentamento é praticamente igual ao da planta não controlada. Testou-se o valor 0,0002, dez vezes menor que o anterior, e se obteve as respostas do gráfico 7, que são inaceitáveis, pois levam a planta a responder cerca de 4 vezes mais devagar.

Observando-se esses resultados, verificou-se que por haver uma restrição no sinal de saída do controlador PID, dado por um limitador superior de 150 Hz, que é a frequência máxima que o variador de frequência envia ao motor, e por um limitador inferior de 0 Hz, frequência mínima, os primeiros 7 segundos tem respostas semelhantes nos gráficos 1 a 5, e isso por que a saída de controle fica saturada nos valores máximos e mínimos. Os gráficos 6 e 7 não são satisfatórios de qualquer forma, então se partiu para um estudo que considerasse a saturação como parte do controle efetivamente e não como um obstáculo.

Para se obter bons resultados, mexeu-se no ganho proporcional, fazendo-se co que ele tivesse 54.08% da banda de ganhos PID, sendo que o integral teve 45.76%, e o derivativo 0.16%. Isso é praticamente um controlador PI. Obteve-se

um resultado promissor, cujo tempo de estabilização é o mesmo da planta sem o controle, porém sem oscilações posteriores, como mostra o gráfico 8. Aumentando-se muito a banda proporcional não houve melhoras na resposta, pois o banda integral decresceu e o sistema demorou para convergir, apesar de não oscilar. Nos gráficos 9 e 10 são mostrados os testes para o ganho proporcional igual a 20 e 50, respectivamente.

À fim de verificar se existem outros ganhos que atenderiam as expectativas de controlar adequadamente, foram estudadas as possibilidades de controladores P, PI com várias outras porcentagens do que já feito e PD, além do que já foi feito para PID. O que trouxe o único resultado condizente foi o controlador proporcional. No gráfico 11 são mostradas as respostas, que são adequadas ao que se procura, com um tempo de subida de cerca de 4 vezes o do controlador PID, e sem oscilações. Foi usado um ganho conjunto, entre K_c e K_p igual a 10. Para verificar quais ganhos proporcionais seriam os melhores partiu-se para outros testes mudando-se de 10 para 20 e depois 100, e 1000. Os resultados foram semelhantes, se bem que para maiores ganhos mais oscilações o controlador apresentava. Diga-se que as oscilações do controlador não faziam com que a resposta fosse oscilatória, à não ser uma oscilação de cerca de 0.1%, que é desprezível.

O ganho que mais se adequou em termos de poucas oscilações do controlador foi o ganho conjunto de 1 (vide gráfico 12), ou seja, simplesmente não haveria um controlador, mas um feed-back negativo com os limitadores de frequência em máxima de 150 Hz e mínima de zero.

6. IMPLANTAÇÃO DO ALGORITMO DE CONTROLE

À fim de implementar o controlador em um programa é necessário que se façam algumas transformações no formato da função de transferência entre o número de Reynolds de saída e o de entrada.

Em primeiro lugar é importante lembrar que o controle será em tempo discreto, e para isso se deve substituir a variável S por uma expressão em função da variável z , que transforma a outra em tempo discreto. Foi usada a transformação Bilinear, que consiste da seguinte expressão:

$$S = \frac{2}{T} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (70)$$

onde:

T : período de amostragem das medições de temperatura e pressão.

Essa substituição é feita nas funções que não fazem parte da planta, mas que fazem parte da manipulação pelo computador, como, os ganhos de transformação de variação de temperatura lida para variação do núm. de Reynolds, e vazão lida para núm. de Reynolds, assim como o set-up e o controlador.

Feita a substituição e passando para o tempo discreto, chega-se ao seguinte algoritmo a ser implementado em computador:

Para o controlador PID: (mais próximo a um PI):

declaração de constantes:

$K_{tr} = -11,86$ (ganho temp./Reyn.)

$K_{qr} = 24.362,48$ (ganho vazão/Reyn.)

Ti=0,1182	(tempo integral)
Td=0,02954	(tempo derivativo)
Kc=0,019	(ganho do controlador)
Kp=10	(ganho proporcional)
T=0,05 (seg)	(período de amostragem)
Temp_amb=25	(temperatura ambiente Célcius)

declaração de variáveis:

dT2,	(var. temp. c/ atrazo atual)
dRe,	(var. Reyn. atual)
Re,	(Reyn. medido atual)
ReS,	(Reyn. de saída atual)
ReE,	(Reyn. set-up atual)
E_ant_ant_ant,	(erro 3 períodos anterior)
E_ant_ant,	(erro 2 períodos anterior)
E_ant,	(erro 1 período anterior)
E,	(erro atual)
f_ant_ant,	(freq. 2 período anterior)
f_ant,	(freq. 1 período anterior)
f,	(freq. atual)
Vazão,	(vazão volumétrica medida)
Temp3_ant,	(medida do termopar 3)
Temp4_ant,	(medida do termopar 4)
Temp5_ant,	(medida do termppar 5)
Temp6_ant,	(medida do termopar 6)
Temp_media	:real (temp. média)
A, B, C	:real (auxiliares)

Antes do loop de controle:

```

E_ant_ant_ant:=0;

E_ant_ant:=0;

E_ant:=0;

f_ant_ant:=0;

f_ant:=0;

ReE:=3386;          (equivalente a 2000 rpm)

A:=Kc*((Ti*(2*t+4*Td)+Kp*(t^2))/(2*Ti*t));

B:=Kc*(Kp*(t^2)-4*Td*Ti)/(Ti*t);

C:=Kc*((Ti*(4*Td-2*t)+Kp*(T^2))/(2*Ti*T));

```

Dentro do loop de controle:

faz aquisição dos dados(Temp3_ant, Temp4_ant, Temp5_ant, Temp6_ant,
Vazão)

```

Temp_média:=(Temp3_ant+ Temp4_ant+Temp5_ant+Temp7_ant)/4;

dT2:=Temp_amb-Temp_média;

dRe:=Ktr*dT2;

Re:=Kqr*Vazão;

ReS:=Re+dRe;

E:=ReE-ReS;

f:=f_ant_ant+A*E_ant+B*E_ant_ant+C*E_ant_ant_ant;

if (f>150) then f:=150

        else if (f<0) then f:=0;

faz sinal de saída para variador de frequência(f);

(* atualizações *)

f_ant_ant:=f_ant;

f_ant:=f;

E_ant_ant_ant:=E_ant_ant;

```

E_ant_ant:=E_ant;

E_ant:=E;

(* fim do loop *)

Para o controlador proporcional (P):

declaração de constantes:

Ktr=-11,86	(ganho temp./Reyn.)
Kc=1	(ganho do controlador)
Kp=1	(ganho proporcional)
T=0,05 (seg)	(período de amostragem)
Temp_amb=25	(temperatura ambiente Célcus)

declaração de variáveis:

dT2,	(var. temp. c/ atrazo atual)
dRe,	(var. Reyn. atual)
Re,	(Reyn. medido atual)
ReS,	(Reyn. de saída atual)
E,	(erro atual)
f,	(freq. atual)
Vazão,	(vazão volumétrica medida)
Temp3_ant,	(medida do termopar 3)
Temp4_ant,	(medida do termopar 4)
Temp5_ant,	(medida do termppar 5)
Temp6_ant,	(medida do termopar 6)
Temp_media	:real (temp. média)

A, B, C :real (auxiliares)

Antes do loop de controle:

```
ReE:=3386;          (equivalente a 2000 rpm)
A:=Kc*((Ti*(2*t+4*Td)+Kp*(t^2))/(2*Ti*t));
B:=Kc*(Kp*(t^2)-4*Td*Ti)/(Ti*t);
C:=Kc*((Ti*(4*Td-2*t)+Kp*(t^2))/(2*Ti*t));
```

Dentro do loop de controle:

```
faz aquisição dos dados(Temp3_ant, Temp4_ant, Temp5_ant, Temp6_ant,
Vazão)

Temp_média:=(Temp3_ant+ Temp4_ant+Temp5_ant+Temp7_ant)/4;
dT2:=Temp_amb-Temp_média;
dRe:=Ktr*dT2;
Re:=Kqr*Vazão;
ReS:=Re+dRe;
E:=ReE-ReS;
f:=Kc*Kp*E;
if (f>150) then f:=150
      else if (f<0) then f:=0;
faz sinal de saída para variador de frequência(f);

(* fim do loop *)
```

Estes algoritmos devem ser inseridos dentro do programa já existente, que está mostrado no apêndice E, logo antes da linha de comando "Until Var_total<=Reg_perm;". Atualmente este programa de testes, que é de

responsabilidade do engenheiro responsável pelo projeto do Túnel de vento, ainda está incompleto, e o que ainda será inserido nele está descrito abaixo:

- * a variável ReE será um vetor com vários número de Reynolds set-up, para serem usados ao longo de um experimento;

- * dentro do loop de controle haverá uma condicional que permitirá que o processamento de controle pare por alguns segundos e um novo valor de ReE será setado (o que ocasionará um transitório);

Os procedimentos de aquisição de dados e de saída do sinal do computador para o variador de frequência estão em anexo no apêndice F, e fazem parte do já mencionado programa de testes que ainda será modificado.

7. DISCUSSÃO

O controle do Número de Reynolds pela variação da temperatura é algo muito simples, bastando que haja um feed-back para que o sistema se acomode rapidamente. Isso também é devido à pequena faixa de variação de temperatura ambiente, e da pequena alteração que a variação provoca no Número de Reynolds.

O controle PID fica bastante comprometido quando há as restrições de frequência para entrada no variador, que provocam constantes saturações dos sinais de saída. Esta limitação é devida à rotação máxima do motor, assim como à potência do mesmo. A curva que a saída da planta descreve enquanto há saturação é do mesmo tipo que a da planta sem controlador, e portanto, essa saturação é indesejável. Recorde-se para tanto que as saturações causaram oscilações indesejadas nos casos dos gráficos 1 a 5, do apêndice D.

O controlador Proporcional, do gráfico 11, mostrou-se muito eficiente, diminuindo o tempo de resposta em cerca de 4 vezes em relação ao melhor PID conseguido. O erro estático, calculado pelo gráfico 12.3 ampliado, no final do apêndice D, resulta em cerca de 0.5%, um valor muito razoável, dado que todos os erros de medição são da ordem de 1%.

8. CONCLUSÃO

O melhor método de controle deve ser aquele que consiga sobrepor os problemas de saturação, dado que haverá saturação. Para este túnel, uma melhoria é se conseguir que com o mesmo motor e mesma rotação se consiga uma vazão bem maior, o que levaria o limite de saturação superior para valores maiores, proporcionando condições de que efetivamente o PID possa ter uma ação melhor, ou seja, que a parte integral não sature a saída.

A solução para esta atual montagem do túnel é usar o controlador proporcional, que efetivamente controla uma entrada em degrau do set-up.

Uma idéia futura é colocar dentro do loop de controle uma forma de se manipular o set-up de forma dinâmica, sem que seja necessário abandonar o loop. Isso poderia ser feito através de uma interrupção e o respectivo tratamento.

9. BIBLIOGRAFIA

[1] Osborne, William C.; FANS ;

Pergamon Press; 1966

Great Britain

pg. 37-38, 52

[2] Measurement of flow by means of pressure differential devices - part 1

International Standard;

ISO 5167-1-1991(E); 1st Edition

pg. 16 a 23

[3] Schiozer, Dayr; Mecânica dos Fluidos;

Editora Araguaia; 1990

São Paulo, Brasil

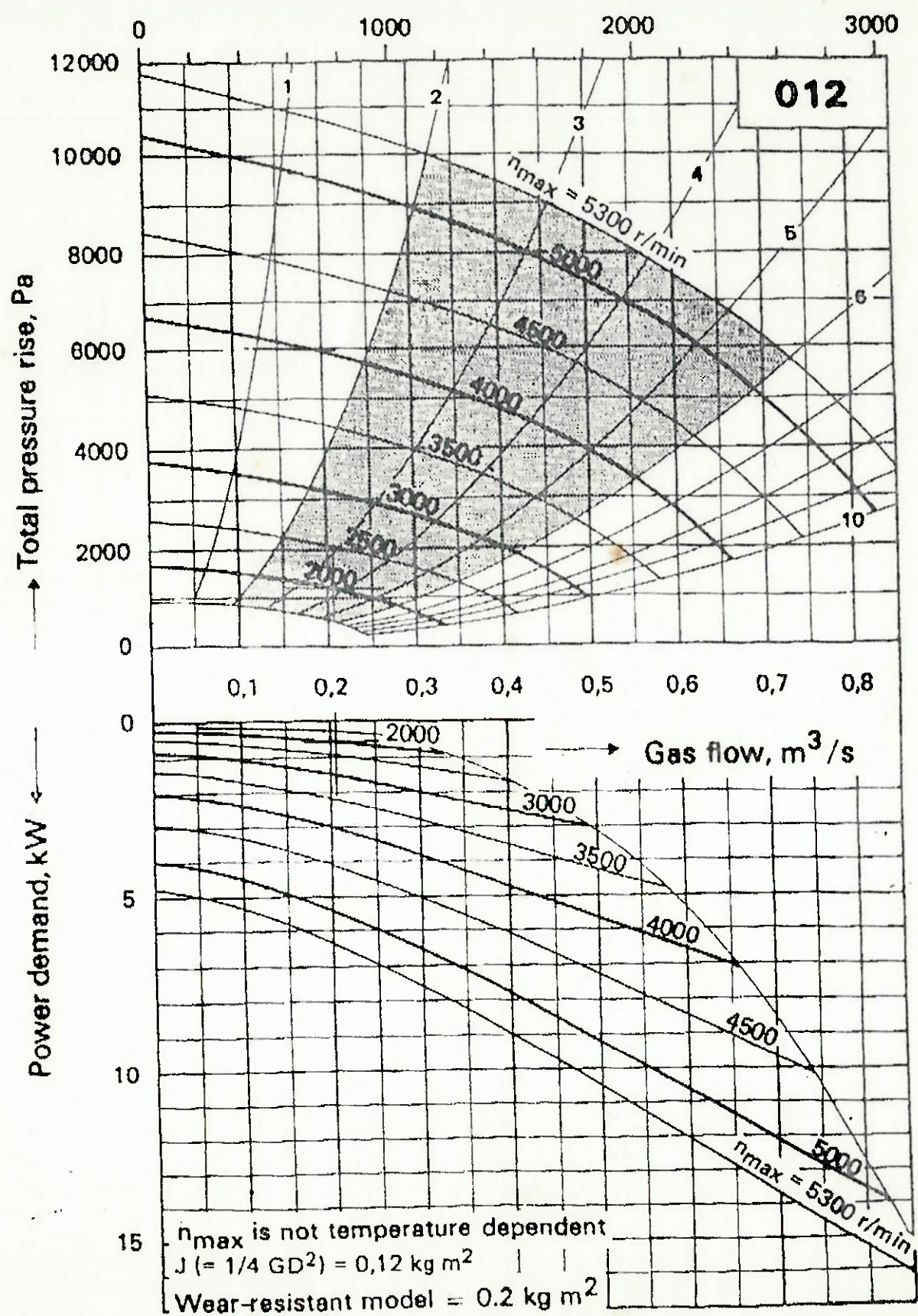
APÊNDICE A:

Curva do Ventilador

CURVA VALIDA FI GAS NA DENSIDADE DE 1,2 KG/M³

→ Gas flow, m³/h

HCHT-3



APÊNDICE B:

Planilha de Cálculos

<u>Valor</u>	<u>Unid.</u>	<u>Descrição</u>	<u>Símbolo</u>
2000	rpm	Rotação de Operação (=33,33Hz)	n_0
0,139	m ³ /s	Vazão volumétrica de Operação	Q_0
1,2	Kg/m ³	Densidade média do ar	ρ_{00}
0,00001518	m ² /s	Viscosidade cinemática média do ar	ν_{i0}
0,025	m	Diâmetro hidráulico do corpo de testes	d_H
0,0676	m ²	Área da secção de testes	A_{ST}
0,6	m.c.a.	Perda de carga do sistema	dp_C
101325	Pa	Pressão atmosférica	P_{ATM}
10	m.c.a.	Pressão atmosférica	P_{ATM}
0,0046	m	Comprimento equivalente	L_{EQ}
0,0	Hz	Freq. mín. para o variador de freq.	$V_{min.}$
150,0	Hz	Freq. máx. para o variador de freq.	$V_{máx.}$
0,0	rpm	Rotação mínima do motor	$N_{min.}$
3500	rpm	Rotação máxima do motor	$N_{máx.}$
<u>Pré-cálculos</u>			
-25920	Pa*s ² /m ⁶	Coefficiente do termo em Q ²	alfa
1800	Pa*s/m ³	Coefficiente do termo em Q ¹	beta
1750	Pa	Coefficiente do termo em Q ⁰	gama
3386	-	Número de Reynolds de Operação	Re_0
314658	Pa*s ² /m ⁶	Coefficiente de perda de carga	k
-340578	Pa*s ² /m ⁶	Coefficiente do termo em Q ²	K_Q
54,00	Pa*s/m ³	Coefficiente do termo em Q ¹ *n ¹	K_{QN}
1,58	Pa	Coefficiente do termo em n ²	K_N
4,11E-03	(m ³ /s)/Hz	Ganho da Planta	K_{PL}
0,1182	s	Tempo da Planta	$\tau_{u_{PL}}$

Função de Transferência da Planta

$$G_{PL}(S) = \frac{4,11E-03}{0,1182 \cdot S + 1}$$

Valor	Unid.	Descrição	Símbolo
0,1182	s	Tempo Integral	t_i
0,02954	s	Tempo Derivativo	t_D
3	s	Tempo do Motor&Ventilador	t_M
0,1182	s	Tempo da Planta	t_{PL}
0,2	s	Tempo do Medidor de Vazão	t_{PR}
0,39	Hz/Hz	Ganho do Motor&Ventilador	K_m
4,11E-03	(m³/s)/Hz	Ganho da Planta	K_{pl}
24362,48	1/(m³/s)	Ganho vazão/Reynolds	K_{qr}
Pré-cálculos			
8,38E-03	s⁴		a_0
0,1156	s³		a_1
38,90	1/Hz		$K_m * K_{pl} * K_{qr}$
3,32	s		$t_M + t_{PL} + t_{PR}$
0,392	s²		$t_i * (t_M + t_{PL} + t_{PR})$
4,597	s/Hz		$t_i * K_m * K_{pl} * K_{qr}$
0,13582	s²/Hz		$t_i * K_m * K_{pl} * K_{qr} * t_D$

Função de Transferência do Motor&Ventilador

$$G_M(S) = \frac{0,3889}{3 * S + 1}$$

Função de Transferência do Medidor de Vazão

$$G_M(S) = \frac{1}{0,2 * S + 1}$$

Numerador da função de transferência do sistema completo:

$$1E-01 K_C * S^2 + 4,60 K_C * S + 38,90 * K_C$$

Equação Característica: (denominador da função de transf. do sistema completo)

$$8,4E-03 * S^4 + 0,1156 * S^3 + (0,3921 + 0,13582 * K_C) * S^2 + (0,11817 + 4,6 * K_C) * S + 38,905 * K_C = 0$$

Critério de Routh

1)

$$K_C < 1,943$$

2)

$$a = \begin{matrix} 1 & 2,3 \end{matrix}$$

$$b = \begin{matrix} -0,141 & -0,3187 \end{matrix}$$

$$c = \begin{matrix} 0,002 & 0,00524 \end{matrix}$$

$$1 * K_C^2 - 0,141 * K_C + 0,00231 = 0$$

$$K_{C1} = 2E-02$$

$$K_{C2} = 0,122$$

Resultado:

$$\begin{matrix} 0,122 & < K_{CL} < & 1,9427 & \text{Hz}/(\Delta \text{Re}) \\ 0 & & K_{CL} < & 1,9E-02 \end{matrix}$$

Cálculo do numerador para o root locus via MATLAB:

$$1E-01 K_C * S^2 + 4,60 K_C * S + 38,90 * K_C$$

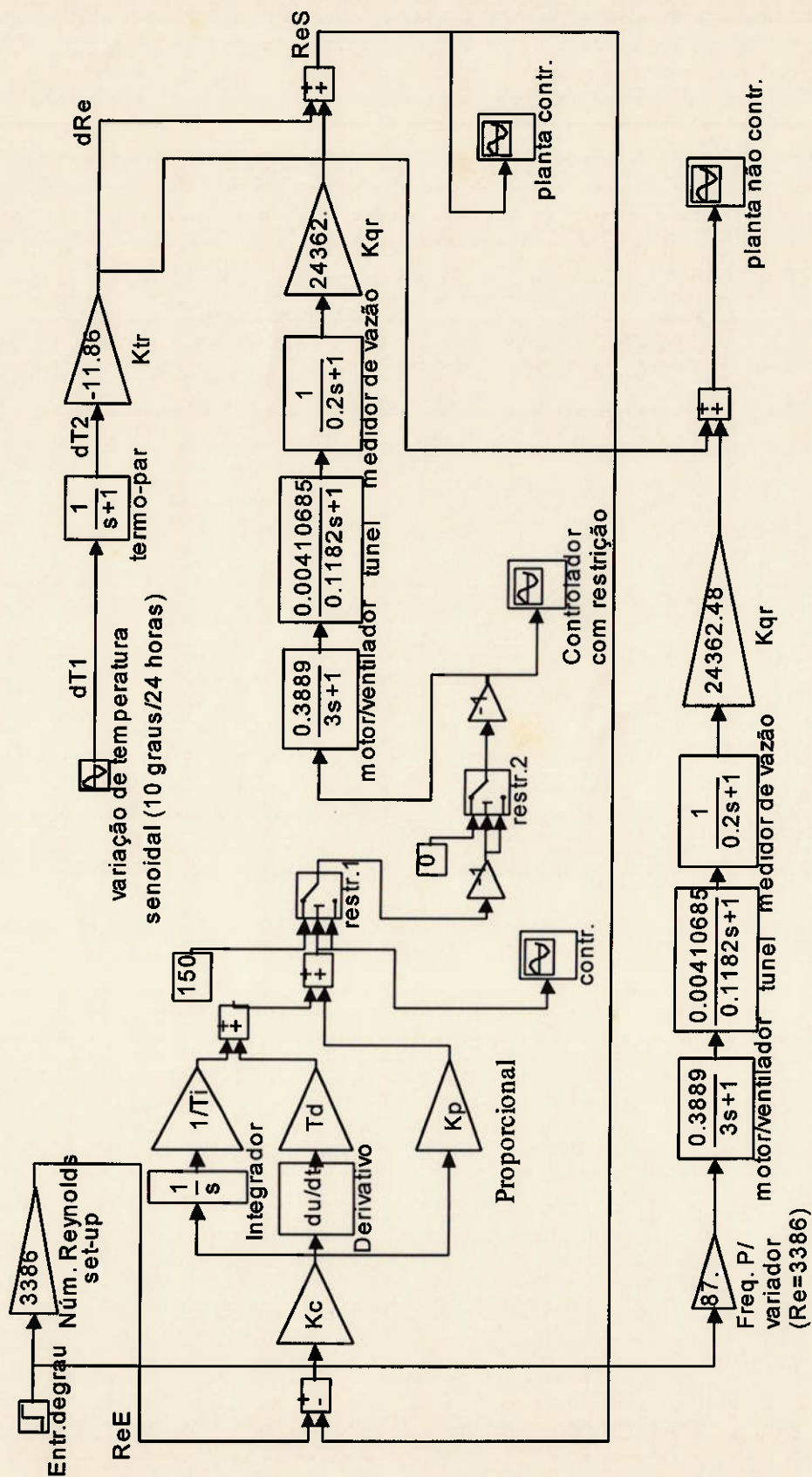
Cálculo do denominador para o root locus via MATLAB:

$$8,4E-03 * S^4 + 0,1156 * S^3 + 0,39211 * S^2 + 0,11817 * S$$

APÊNDICE C:

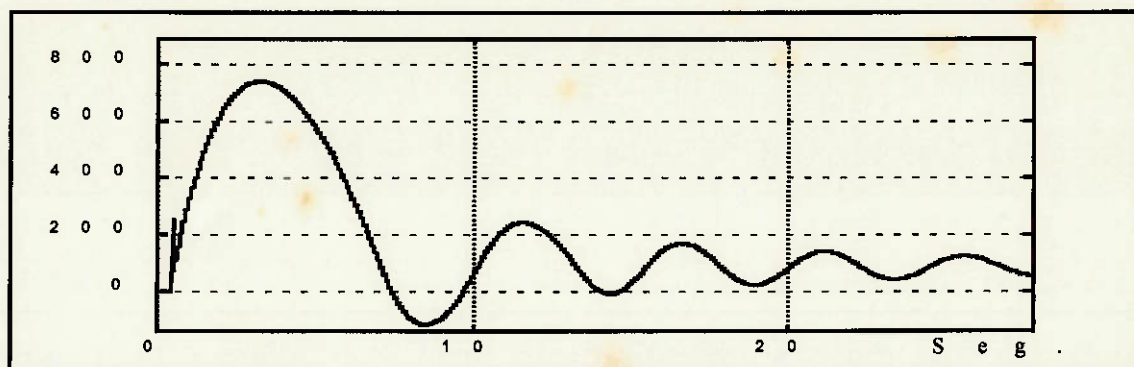
Diagrama de blocos para simulação

Diagrama de blocos para simulação : Planta controlada (acima) e planta não controlada (abaixo)

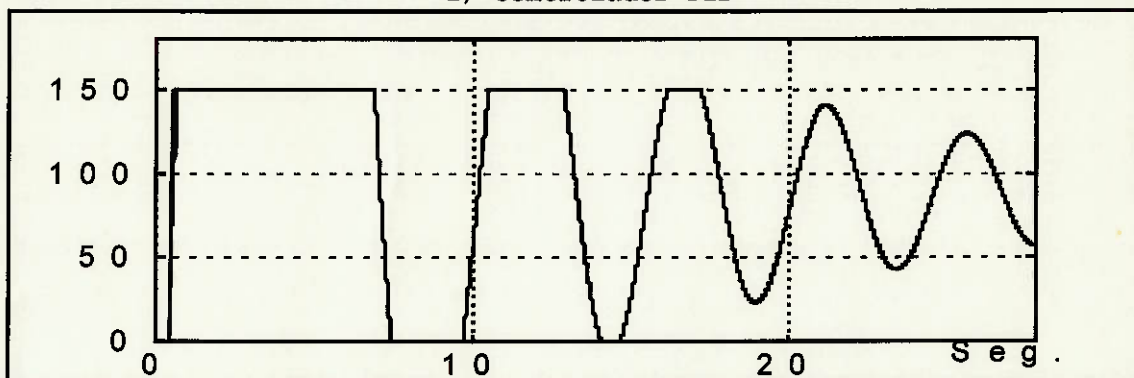


APÊNDICE D:

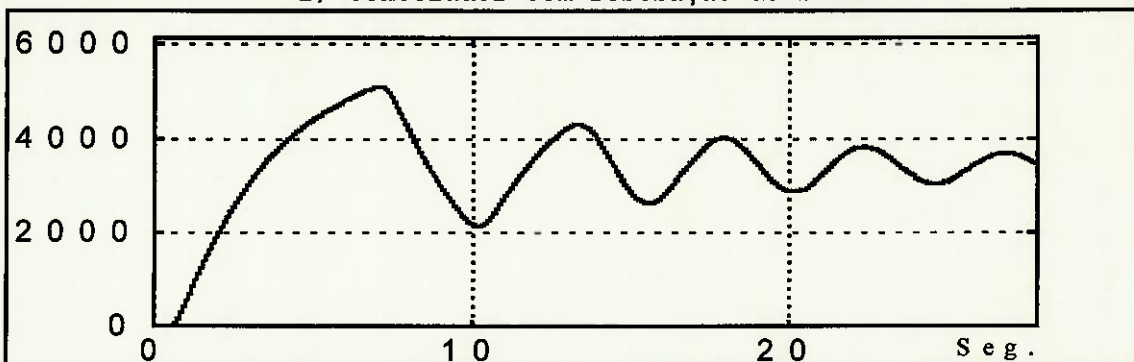
Gráficos provenientes das simulações



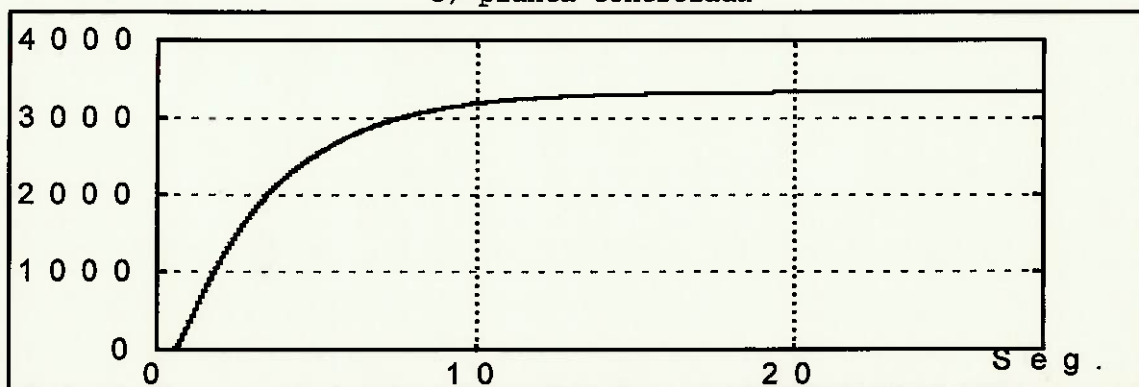
1) controlador PID



2) controlador com restrição de saída



3) planta controlada



4) planta não controlada para comparação

gráfico 1: $K_c=0.019$, $T_i=0.1182$, $T_d=0.02954$, $K_p=1$
 89.15% 0.31% 10.54%

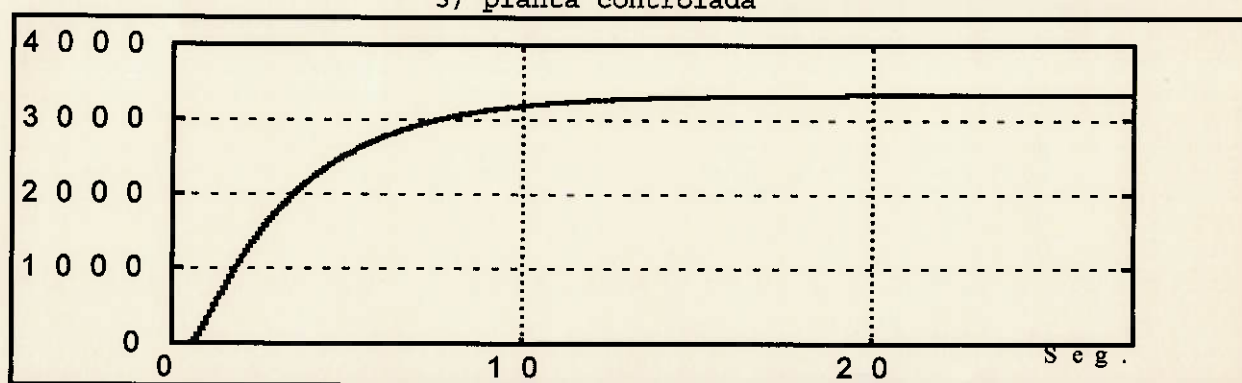
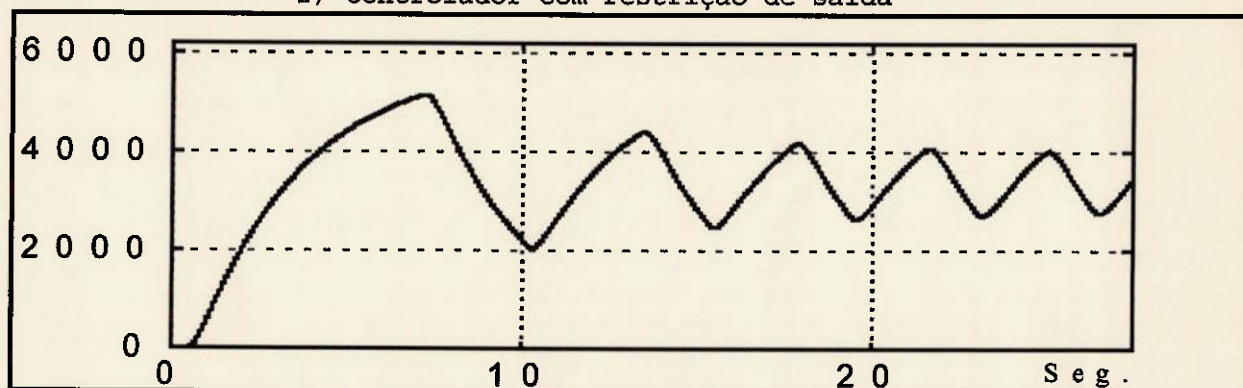
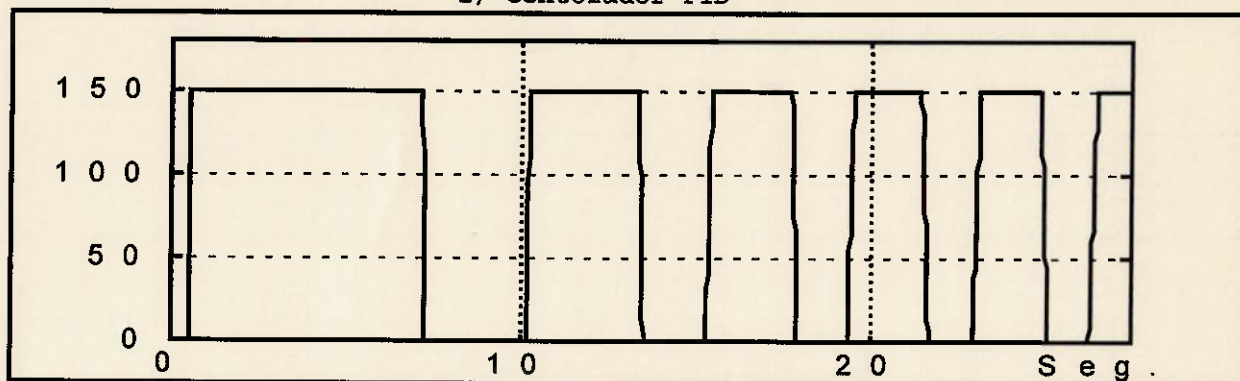
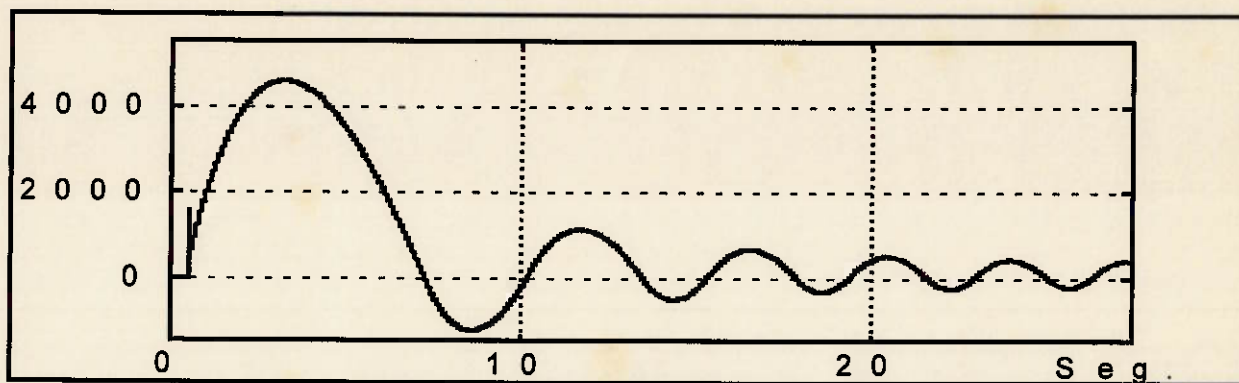
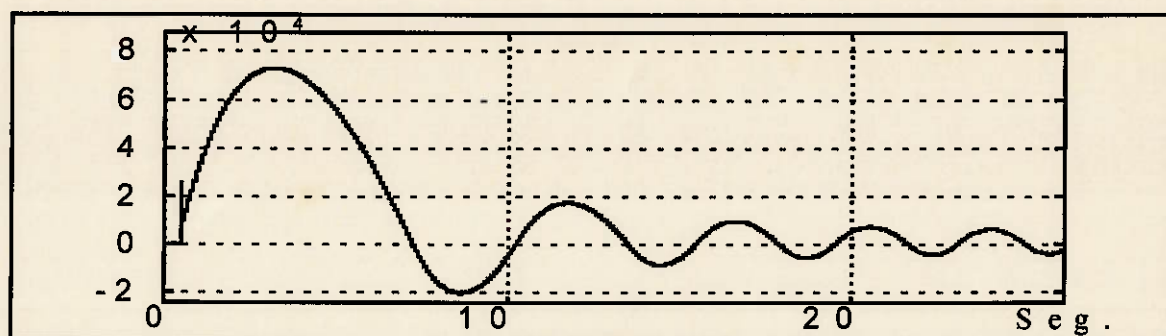
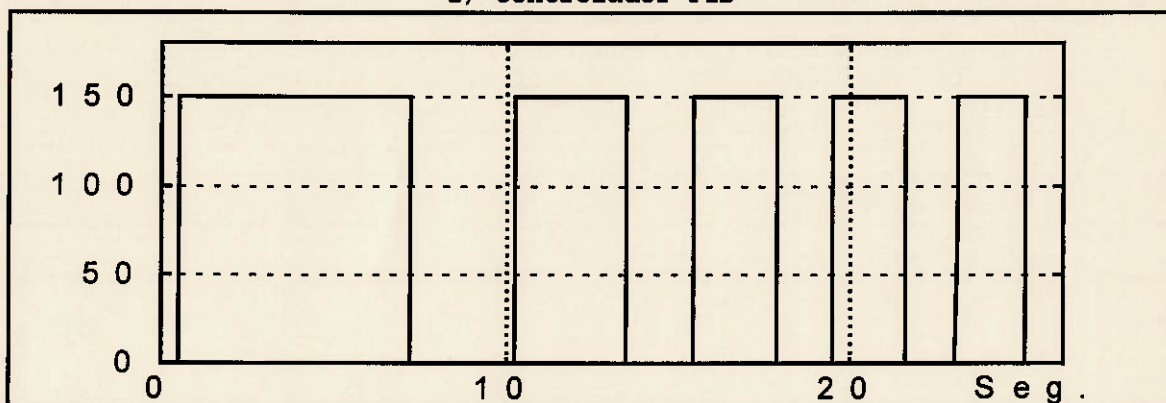


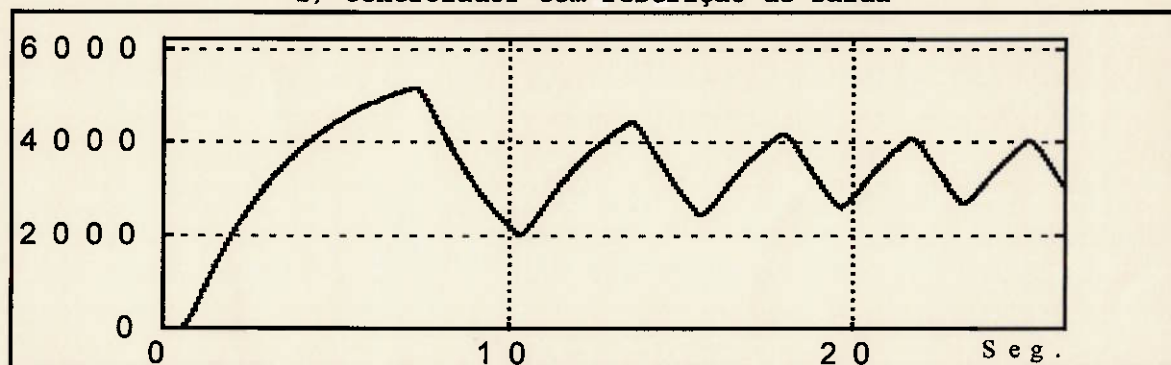
gráfico 2: $K_c=0.122$, $T_i=0.1182$, $T_d=0.02954$, $K_p=1$
 89.15% 0.31% 10.54%



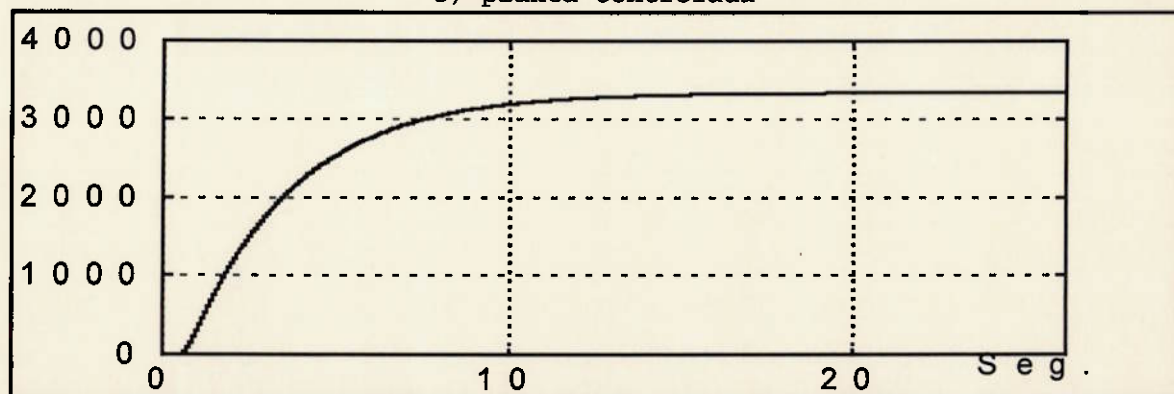
1) controlador PID



2) controlador com restrição de saída



3) planta controlada



4) planta não controlada para comparação

gráfico 3:

Kc=1.94,	Ti=01182,	Td=0.02954,	Kp=1
89.15%	0.31%	10.54%	

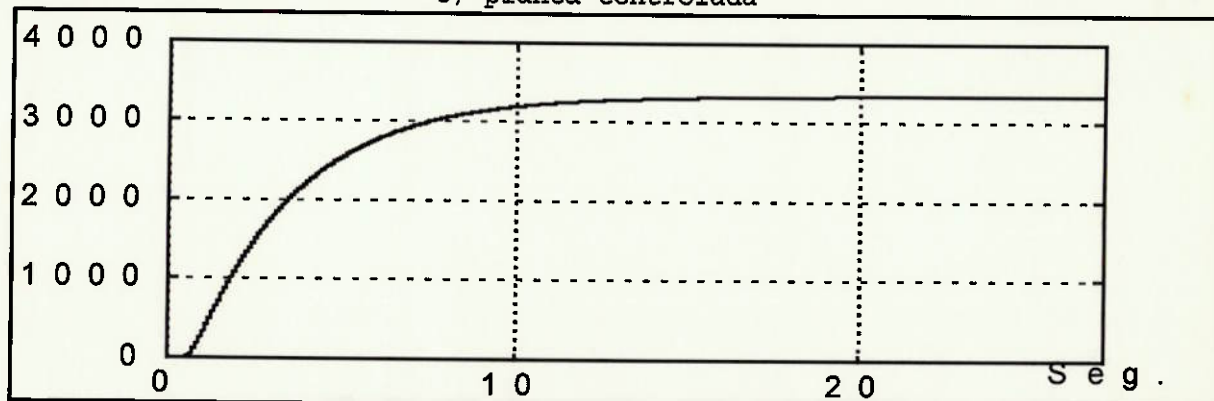
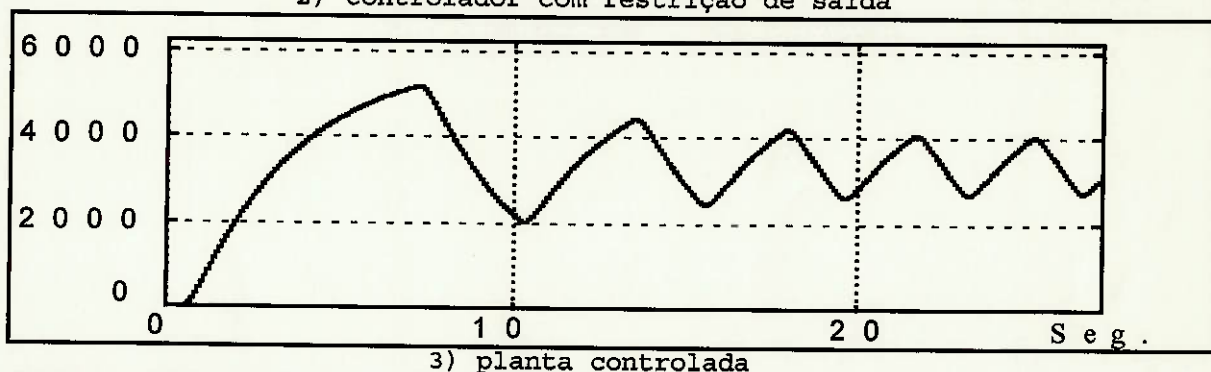
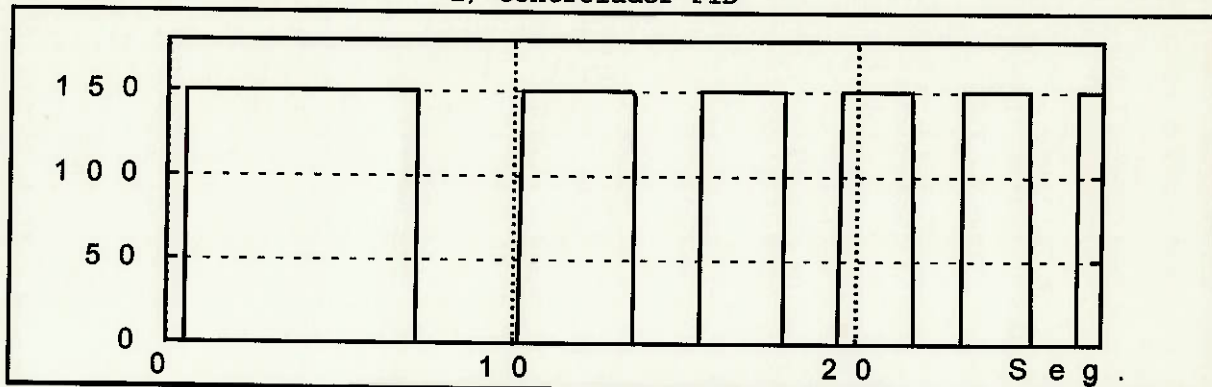
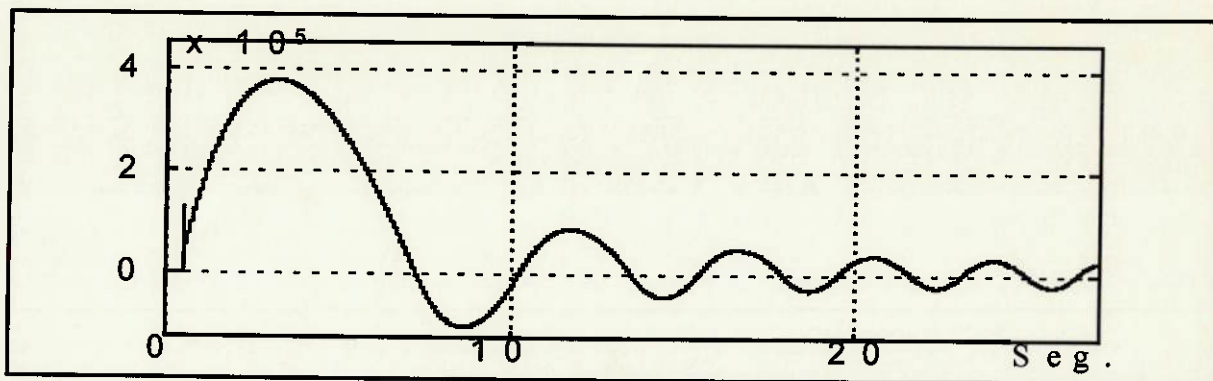


gráfico 4: $K_c=10$, $T_i=0.1182$, $T_d=0.02954$, $K_p=1$
 89.15% 0.31% 10.54%

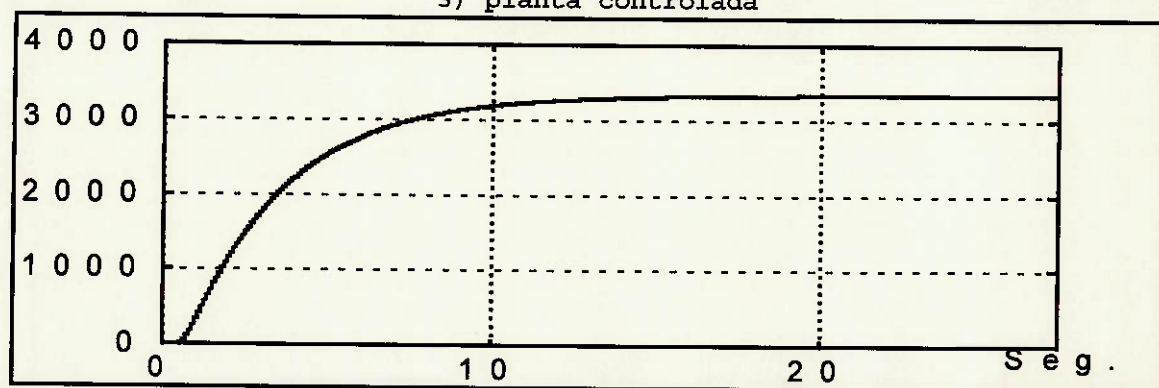
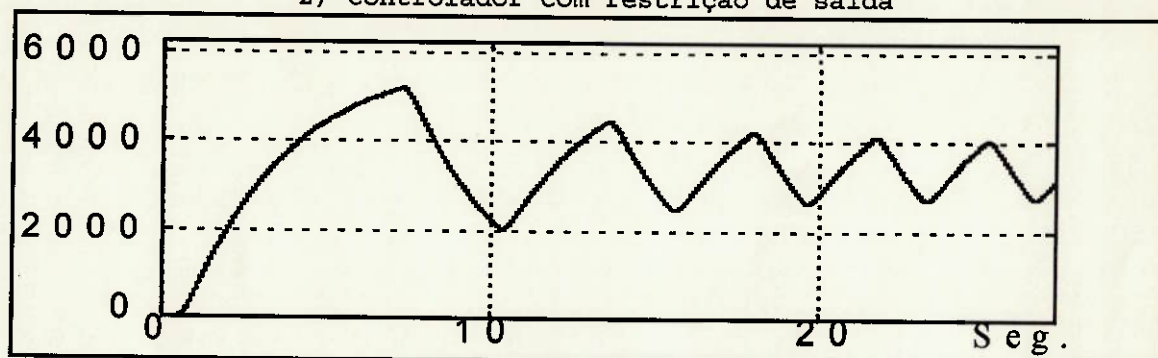
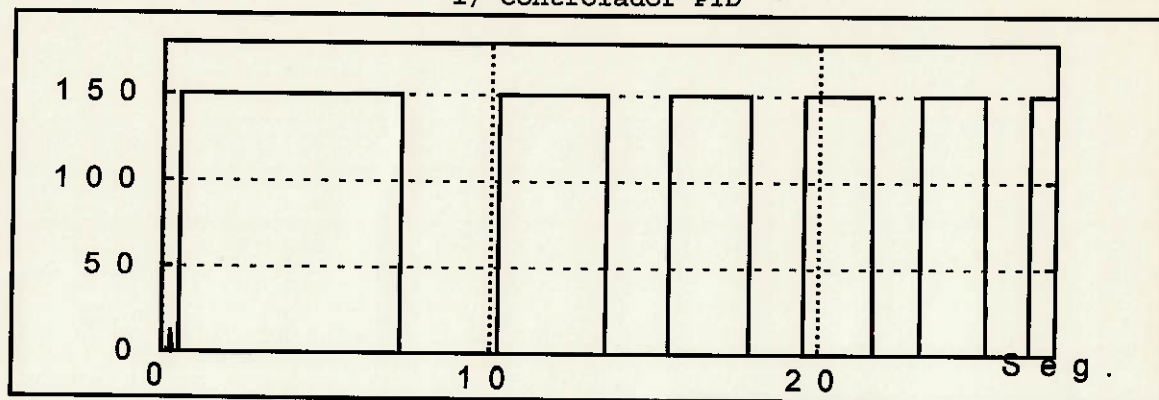
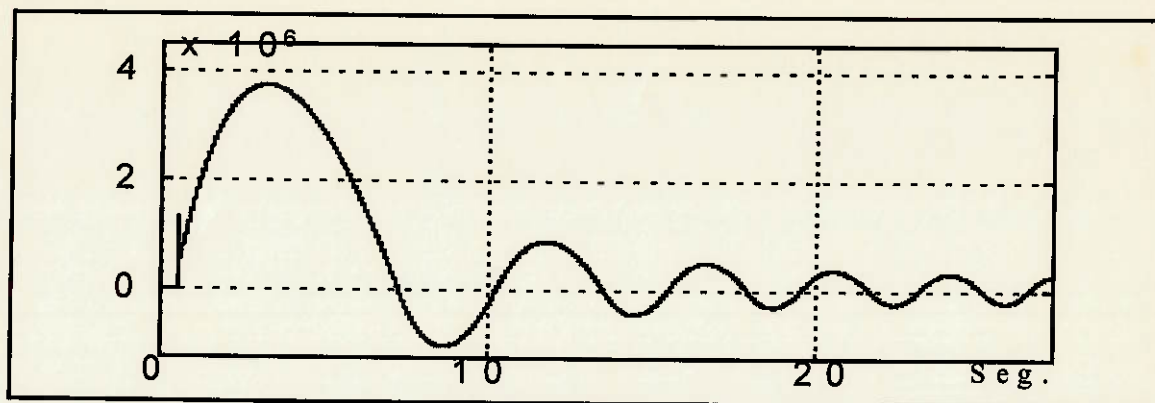
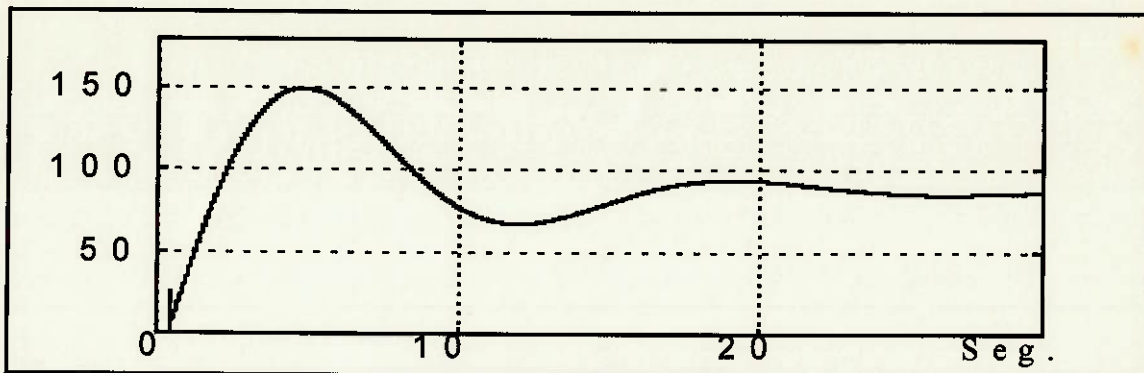
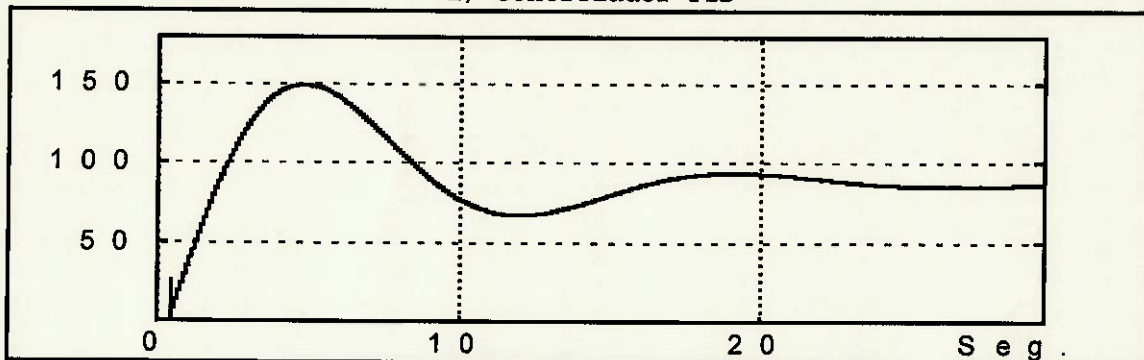


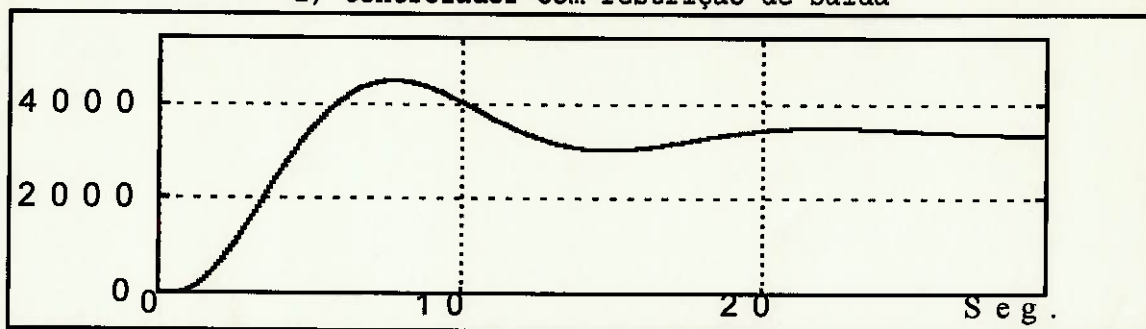
gráfico 5: $K_c=100$, $T_i=0.1182$, $T_d=0.02954$, $K_p=1$
 89.15% 0.31% 10.54%



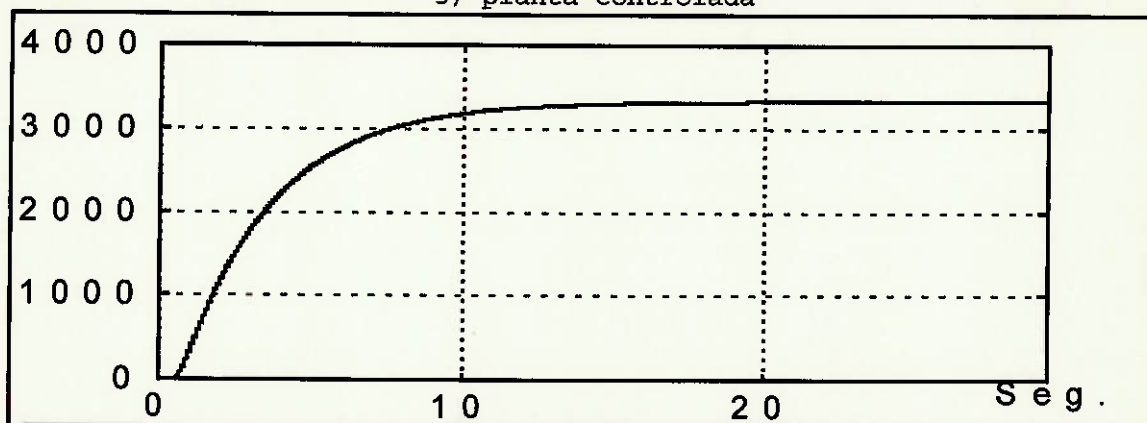
1) controlador PID



2) controlador com restrição de saída



3) planta controlada



4) planta não controlada para comparação

gráfico 6: $K_c=0.002$, $T_i=0.1182$, $T_d=0.02954$, $K_p=1$
 89.15% 0.31% 10.54%

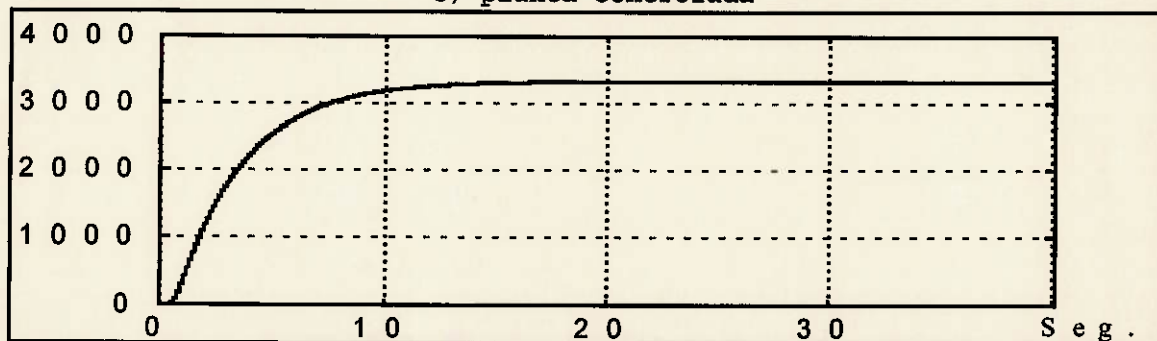
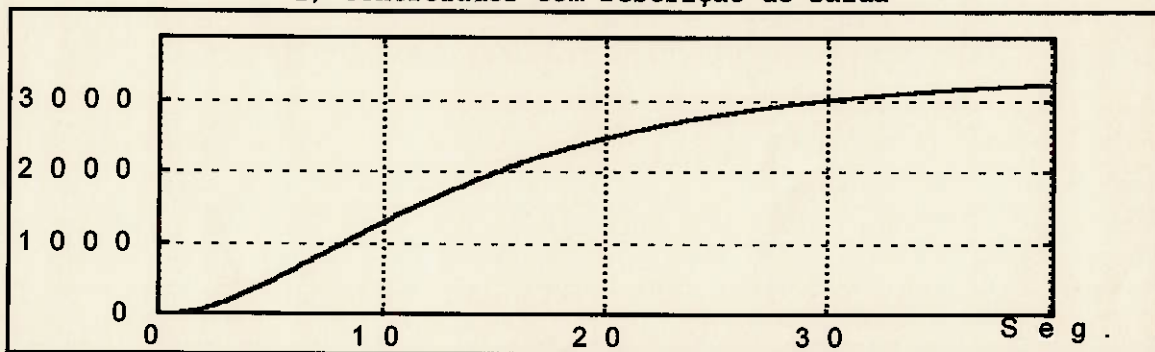
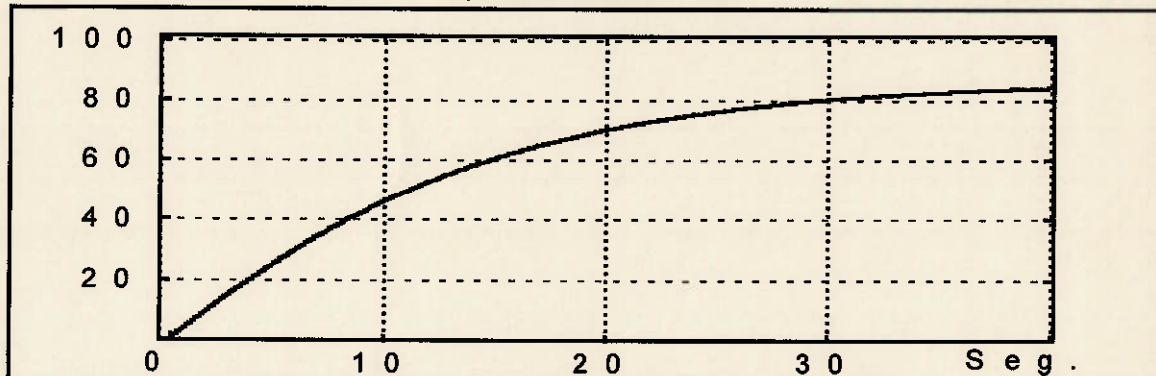
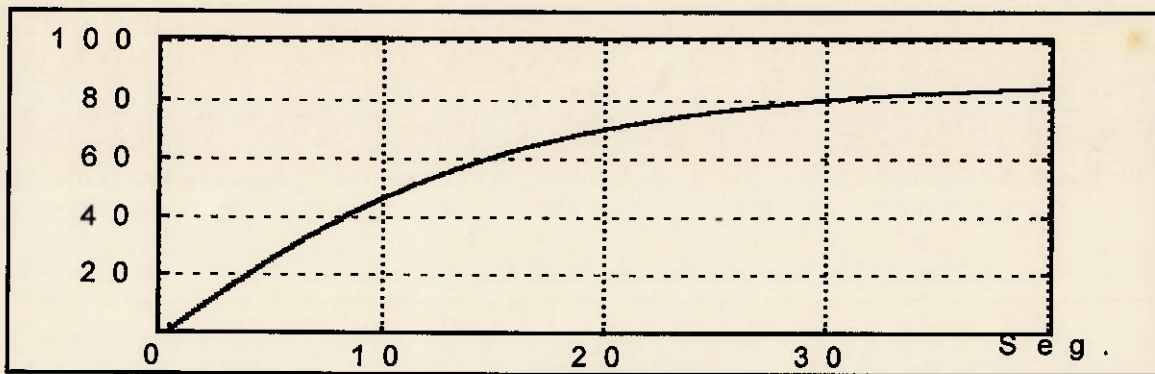
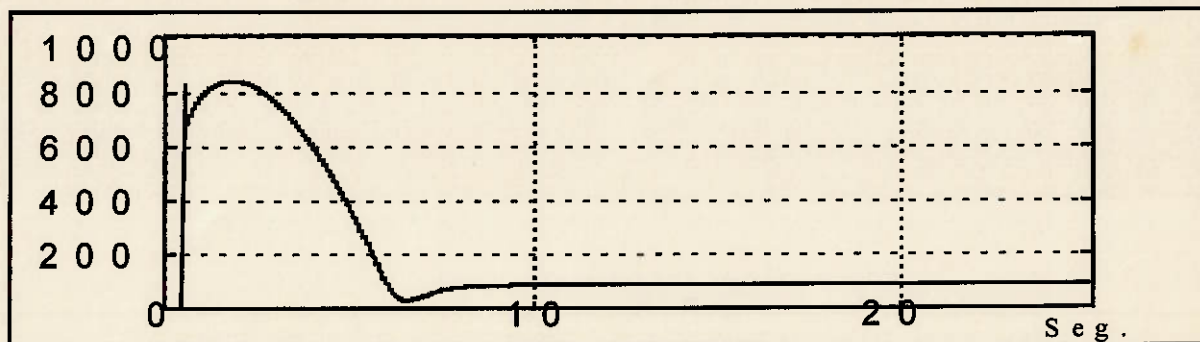
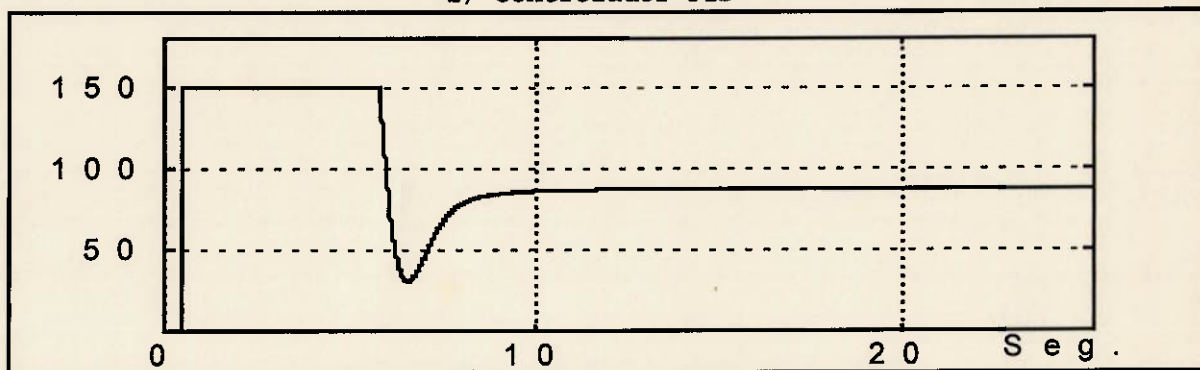


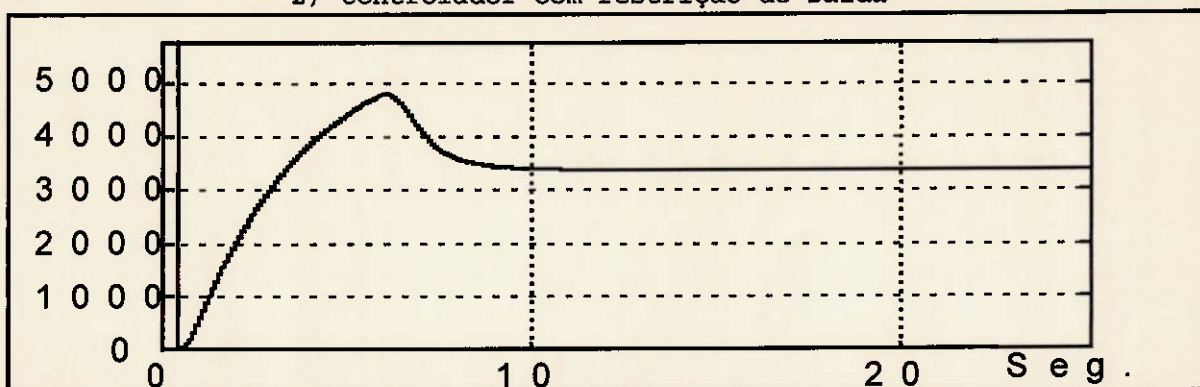
gráfico 7: $K_c=0.0002$, $T_i=0.1182$, $T_d=0.02954$, $K_p=1$
 89.15% 0.31% 10.54%



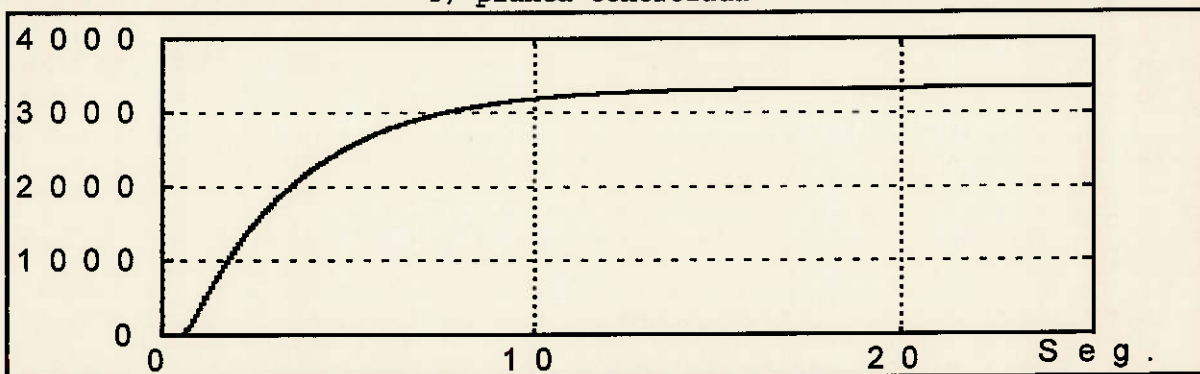
1) controlador PID



2) controlador com restrição de saída

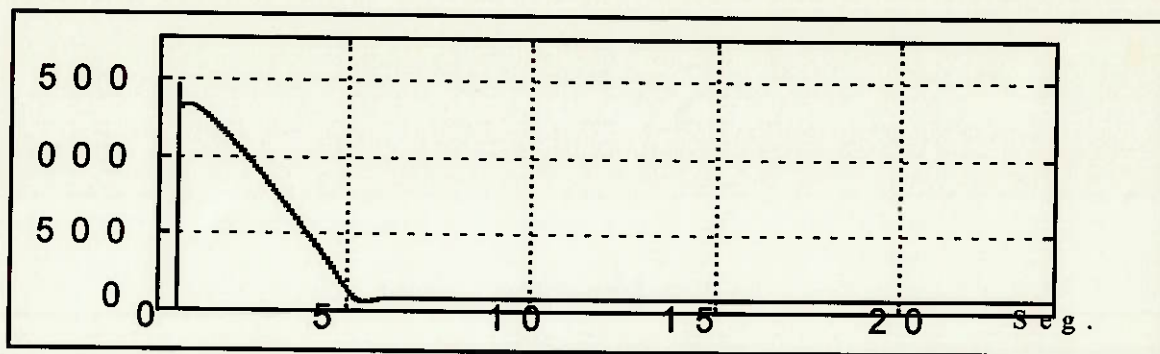


3) planta controlada

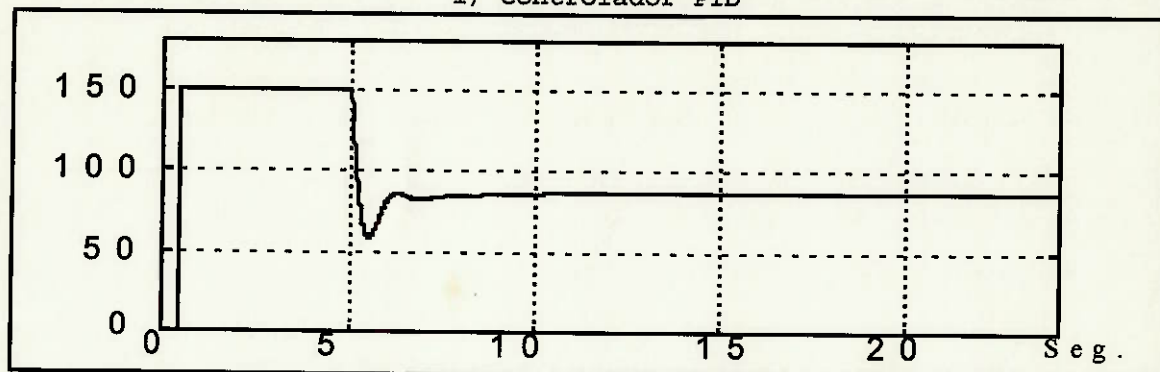


4) planta não controlada para comparação

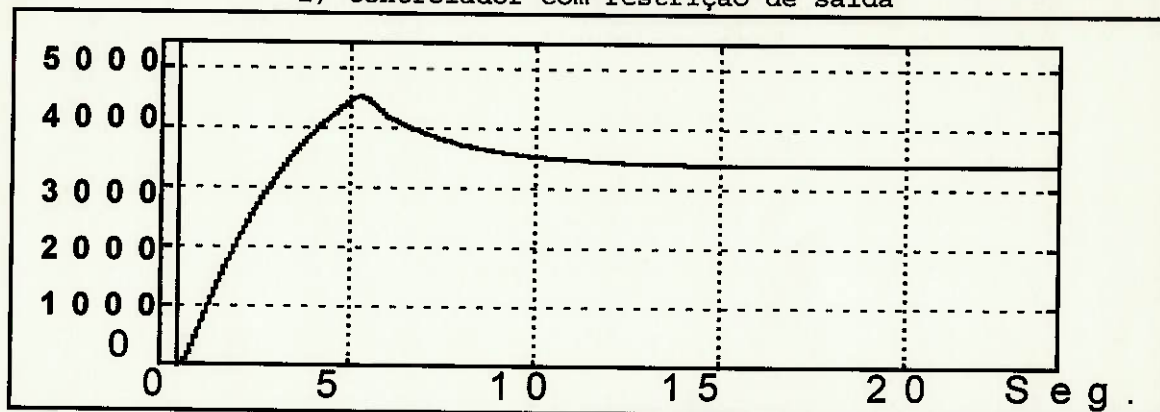
gráfico 8: $K_c=0.019$, $T_i=0.1182$, $T_d=0.02954$, $K_p=10$
 45.76% 0.16% 54.08%



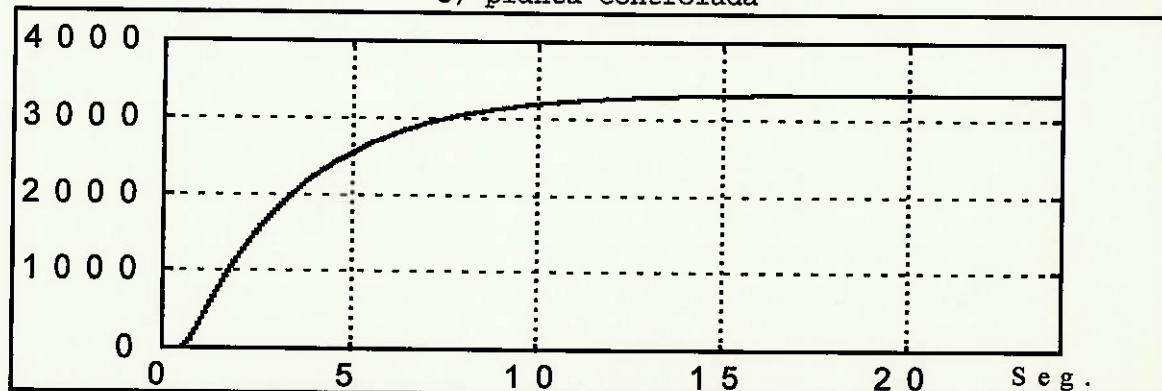
1) controlador PID



2) controlador com restrição de saída

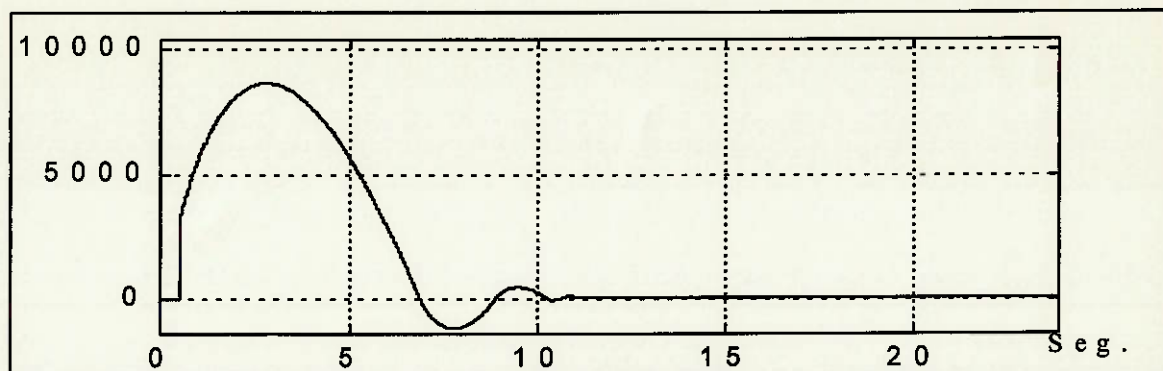


3) planta controlada

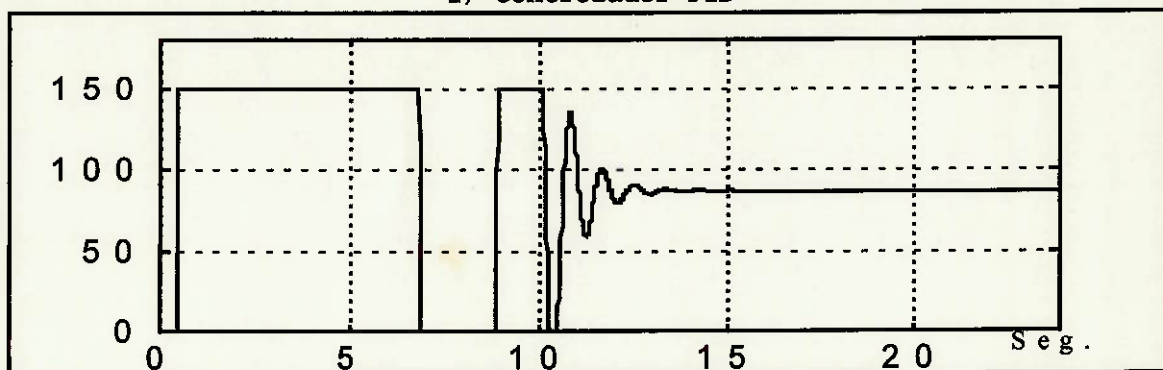


4) planta não controlada para comparação

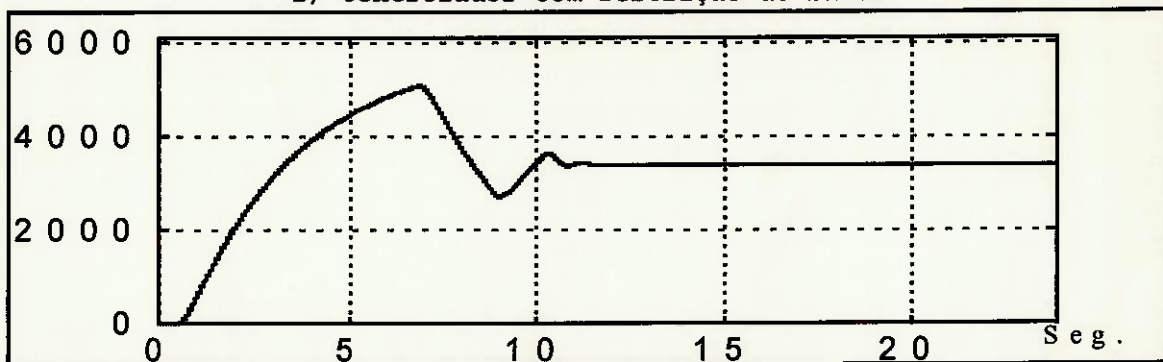
gráfico 9: $K_c=0.019$, $T_i=0.1182$, $T_d=0.02954$, $K_p=20$
 29.70% 0.10% 70.20%



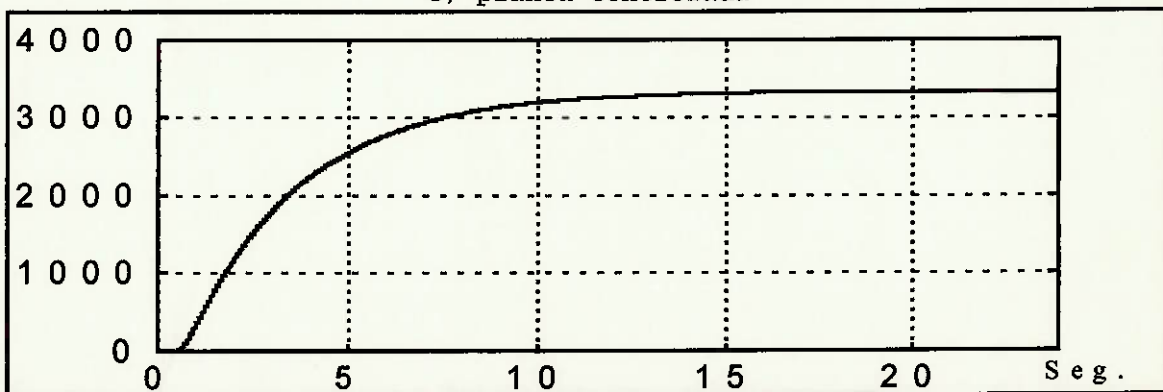
1) controlador PID



2) controlador com restrição de saída

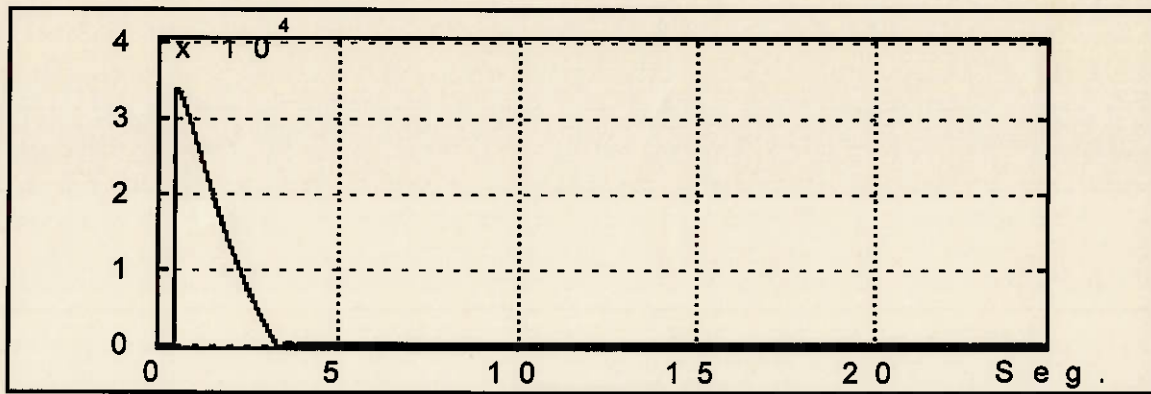


3) planta controlada

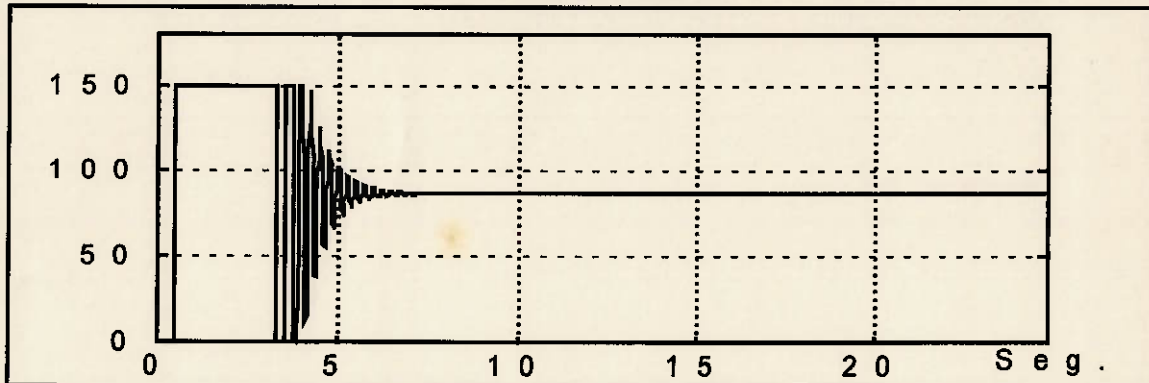


4) planta não controlada para comparação

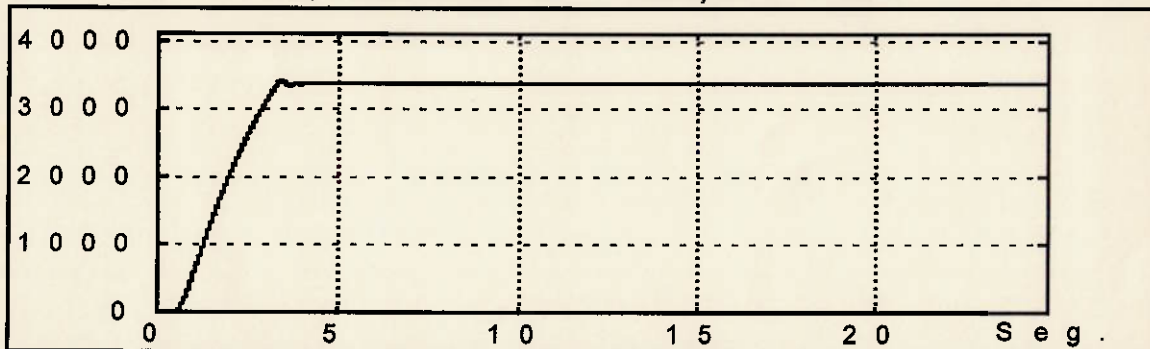
gráfico 10: $K_c=0.019$, $T_i=0.05$; $T_d=0.02954$, $K_p=50$
 28.56% 0.04% 71.40%



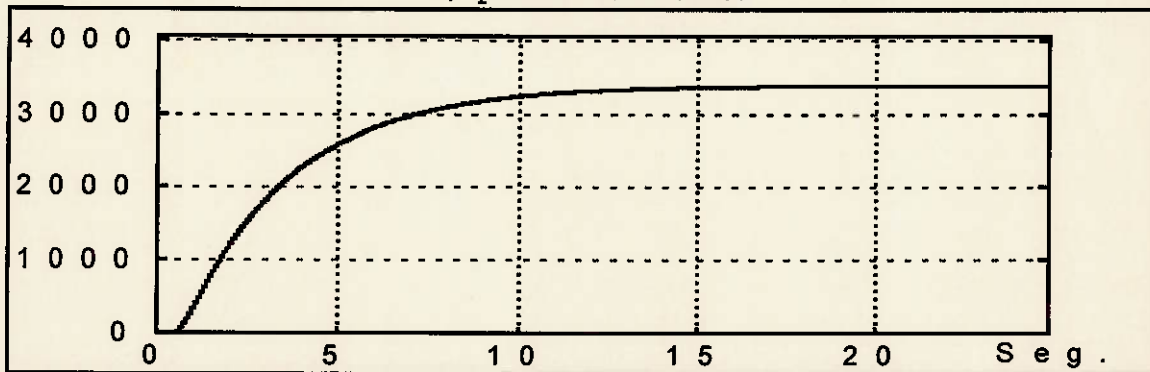
1) controlador P



2) controlador com restrição de saída

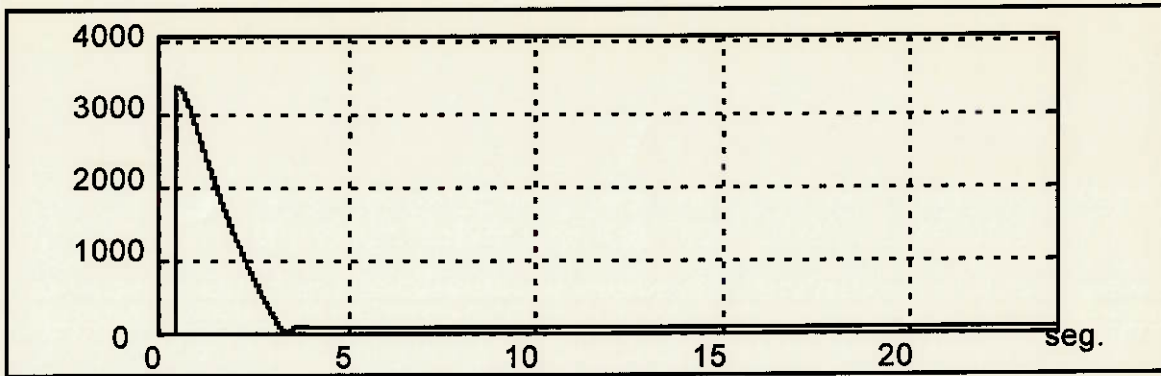


3) planta controlada

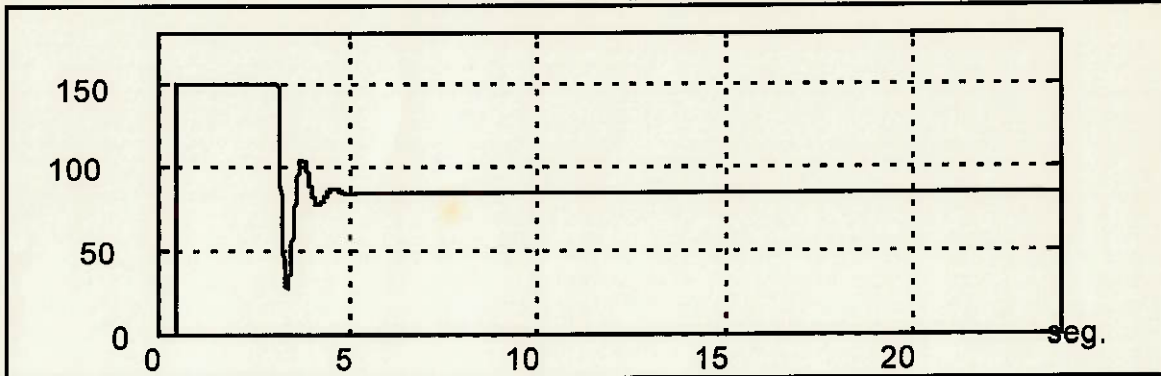


4) planta não controlada para comparação

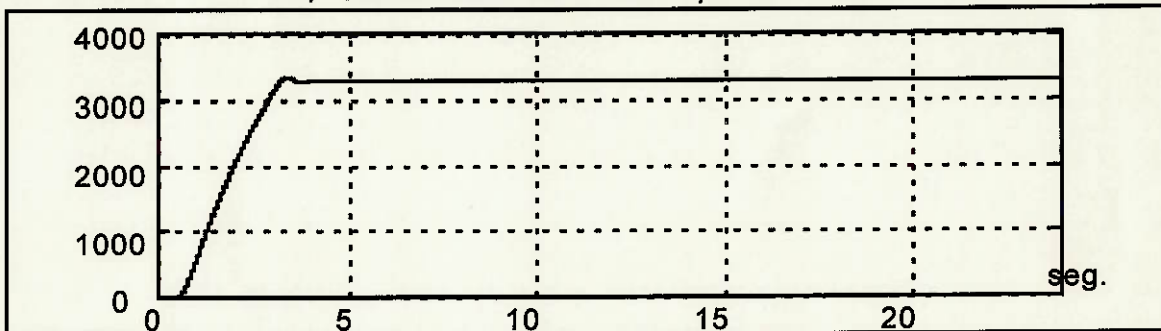
gráfico 11: $K_c=0.019$, $T_i=00$, $T_d=0$, $K_p=526$ (ganho conj. de 10)
 0.0% 0.0% 100%



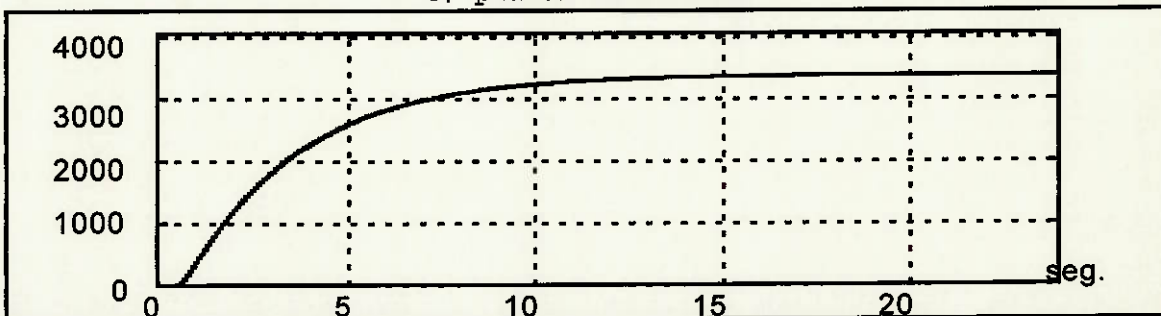
1) controlador P (proporcional)



2) controlador com restrição na saída

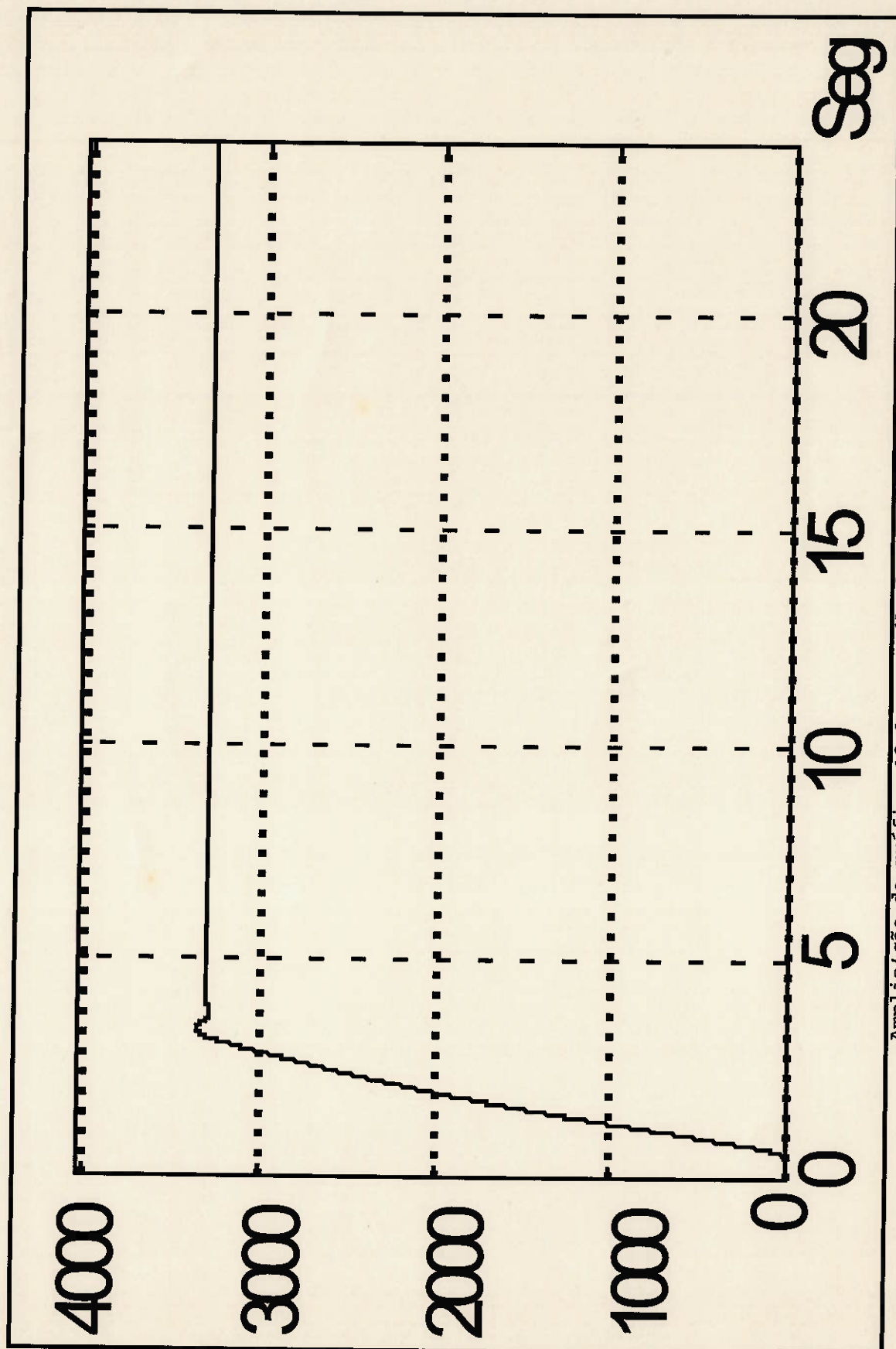


3) planta controlada



4) planta não controlada para comparação

gráfico 12: $K_c=0.019$, $T_i=0,0$ $T_d=0,0$ $K_p=52.63$ (ganho tot. =1)
 0.0% 0.0% 100%



Ampliação do gráfico 12.3 para cálculo do erro estático.

APÊNDICE E:

Programa principal já implementado no laboratório

Program Main;

Uses Crt, Tela, Tipos, Aquisita,
Termopar, Desvios, Flow, Bias,
Grafico;

Const

Reg_Perm = 0.5;

Var

Arq1 : text;
Nome_arq : String;
Caso : String;
i : integer;

Temp0_ant, Temp1_ant, Temp2_ant,
Temp3_ant, Temp4_ant, Temp5_ant,
Temp6_ant, Temp7_ant, Temp8_ant,
Temp9_ant, Temp10_ant : Real;

Vazaol_ant,
Vazao2_ant : Real;
Var_Total : Real;
Temp_media, Inc_Temp : Vetor10_real;
Bias_Temp : Vetor10_Real;

DP_Medial, Inc_DP1,
DP_Medio2, Inc_DP2 : Real;
Bias_DP1, Bias_DP2 : Real;
Temp_aux1, Inc_Temp_Aux1 : Real;
Temp_aux2, Inc_Temp_Aux2 : Real;
Bias_Temp_aux1, Bias_Temp_Aux2 : Real;

Vazaol,
Inc_Vazaol,
Vazao2,
Inc_Vazao2,
Inc_Vazao : Real;
Bias_Vz1, Bias_Vz2 : Real;
Bias_vz : Real;

Umid, Inc_Umid : Real;
Bias_Umid : Real;
Dens, Inc_Dens,
B_Dens : Real;

Visc, Inc_Visc,
B_Visc : Real;

hconv : Real;
Inc_hconv, Bias_hconv : Real;
Erro_hconv : Real;

V , Inc_V, Bias_V : Real;

```

Re                                     : Real;
B_Re, Inc_Re,
Erro_Re                               : Real;

Nusselt                               : Real;
Bias_Nu, Inc_Nu                       : Real;
Inc_kar                               : Real;
Erro_Nu                               : Real;

Begin
  ClrScr;
  Cabecalho;
  Entrada_Dados (Nome_arq, Caso, Pressao_atm);

  Carrega_Dados_Termopar( Termopar_J );
  Temp1_ant := 0;
  Temp2_ant := 0;
  Temp3_ant := 0;
  Temp4_ant := 0;
  Temp5_ant := 0;
  Temp6_ant := 0;
  Temp7_ant := 0;
  Temp8_ant := 0;
  Temp9_ant := 0;
  Temp10_ant := 0;
  Vazao1_ant := 0;
  Vazao2_ant := 0;

  ClrScr;
  Cabecalho;

  Repeat { Regime Transitorio }

    Aquisita_Dados ( Temperatura, Vazao, Pressao_Atm );
    Calc_variacao ( Temperatura, Vazao, Temp0_ant, Temp1_ant,
Temp2_ant,
                                Temp3_ant, Temp4_ant, Temp5_ant, Temp6_ant,
                                Temp7_ant, Temp8_ant, Temp9_ant, Temp10_ant,
                                Vazao1_ant, Vazao2_ant, Var_total );

    Mostra_Dados ( Temperatura, Vazao );

  Until Var_total <= Reg_perm;

  Assign ( Arq1, 'c:\multibra\aquisica\' + Nome_arq + '.dat' );
  Rewrite ( Arq1 );

  For i:= 1 to 300 do { Regime Permanente }
  Begin
    Aquisita_Dados ( Temperatura, Vazao, Pressao_Atm );

    Calc_variacao ( Temperatura, Vazao, Temp0_ant, Temp1_ant,
Temp2_ant,
                                Temp3_ant, Temp4_ant, Temp5_ant, Temp6_ant,

```

```

Temp7_ant, Temp8_ant, Temp9_ant, Temp10_ant,
Vazao1_ant, Vazao2_ant, Var_total );

Mostra_interacao (i);
Mostra_Dados ( Temperatura, Vazao );

Salva_Dados ( Temperatura, Vazao, Arq1 );

Delay (1);

End;

Close (Arq1);

{ Esta secao executa todo o tratamento dos dados aquisitados }
{ incluindo a analise de incertezas }

Calc_Media_Medicoes( Nome_Arq, Temp_Media, DP_Medio1, DP_Medio2 );

Calc_Inc_Medicoes ( Nome_Arq, Inc_Temp, Inc_DP1, Inc_DP2 );

Bias_Medicoes ( Bias_Temp, Bias_DP1, Bias_DP2 );

Temp_Aux1 :=
(Temp_Media[3]+Temp_Media[4]+Temp_Media[5]+Temp_Media[6])/4;

Inc_Temp_Aux1 := Sqrt( Sqr(Inc_Temp[3]) + Sqr(Inc_Temp[4]) +
                      Sqr(Inc_Temp[5]) + Sqr(Inc_Temp[6]) )/4;
Bias_Temp_Aux1 := Bias_T;

Umid := Calc_Umidade_ar ( Temp_Media[1], Temp_Media[0], Pressao_Atm
);

Inc_Umid := Calc_Inc_W ( Temp_media[1], Inc_Temp[1], Temp_Media[0],
                        Inc_Temp[0], Pressao_atm, Inc_Patm );

Bias_Umid := Bias_W ( Temp_Media[0], Bias_Temp[0], Temp_Media[1],
                     Bias_Temp[1], Pressao_atm, Inc_Patm );

Dens := Calc_Densidade_ar (Pressao_atm, Umid, Temp_Aux1);

Vazao1 := Calc_Vazao( DP_Medio1, Pressao_Atm, Temp_Aux1, Dens );

Inc_Vazao1 := Calc_Inc_Vazao ( Vazao1, Temp_Aux1, Inc_Temp_Aux1,
Temp_Media[0],
                                Inc_Temp[0], Temp_Media[1],
Inc_Temp[1],
                                DP_Medio1, Inc_DP1, Pressao_atm,
Inc_Patm );

Bias_Vz1 := Bias_Vazao ( Temp_Aux1, Bias_Temp_Aux1, Temp_Media[0],

```

```

Bias_Temp[0], Temp_Media[1], Bias_Temp[1],
DP_Medio1, Bias_DP1, Pressao_Atm,
Bias_Patm);

Vazao2 := Calc_Vazao( DP_Medio2, Pressao_Atm, Temp_Aux1, Dens );

Inc_Vazao2 := Calc_Inc_Vazao ( Vazao2, Temp_Aux1, Inc_Temp_Aux1,
Temp_Media[0],
Inc_Temp[0], Temp_Media[1],
Inc_Temp[1],
DP_Medio2, Inc_DP2, Pressao_atm,
Inc_Patm );
Bias_Vz2 := Bias_Vazao ( Temp_Aux1, Bias_Temp_Aux1, Temp_Media[0],
Bias_Temp[0], Temp_Media[1], Bias_Temp[1],
DP_Medio2, Bias_DP2, Pressao_Atm,
Bias_Patm);

Inc_Vazao := sqrt ( sqr(Inc_vazao1) + sqr(Inc_Vazao2) );

Bias_Vz := sqrt ( sqr(Bias_Vz1) + sqr(Bias_Vz2) );

Temp_Aux2 :=
(Temp_Media[7]+Temp_Media[8]+Temp_Media[9]+Temp_Media[10])/4;
Inc_Temp_Aux2 := Sqrt( Sqr(Inc_Temp[7]) + Sqr(Inc_Temp[8]) +
Sqr(Inc_Temp[9]) + Sqr(Inc_Temp[10]) )/4;

Bias_Temp_Aux2 := Bias_T;

Dens := Calc_Densidade_ar (Pressao_atm, Umid, Temp_Media[2]);
Inc_Dens := Calc_Inc_Dens ( Dens, Temp_Media[2], Inc_Temp[2],
Temp_Media[0], Inc_Temp[0],
Temp_Media[1],
Inc_Temp[1], Pressao_atm, Inc_Patm );

B_Dens := Bias_Dens ( Dens, Temp_Media[2], Bias_Temp[2],
Temp_Media[0], Bias_Temp[0], Temp_Media[1],
Bias_Temp[1], Pressao_atm, Bias_Patm );

V := vel ( Vazao1+Vazao2, Dens );
Inc_v := Calc_Inc_Vel ( v, Vazao1+Vazao2, Inc_Vazao, Dens, Inc_Dens);
Bias_v := Bias_vel (v, Vazao1+Vazao2, Bias_Vz, dens, B_dens );

Visc := Calc_Visc_Cinematica(Temp_media[2]);
Inc_Visc := Calc_Inc_Visc ( Temp_Media[2], Inc_Temp[2] );
B_Visc := Bias_Visc ( Temp_Media[2], Inc_Temp[2] );

Re := V*Dh/Visc;
Inc_Re := Calc_Inc_Re( Re, v, Inc_v, dh, Inc_Dh, Visc, Inc_Visc );
B_Re := Bias_Re( Re, v, Bias_v, dh, Bias_Dh, Visc, B_Visc );
Erro_Re := sqrt( sqr(B_Re) + sqr(Tstudent*Inc_Re) );

```

```

hconv := calc_h (Vazao1,Vazao2, umid, Temp_Aux1, Temp_Media[2],
                Area, Temp_Aux2 );

Inc_hconv := Calc_Inc_h ( hconv, Temp_Media[2], Inc_Temp[2],
Temp_Aux1,
                        Inc_Temp_Aux1, vazao1+vazao2, Inc_Vazao,
Umid,
                        Inc_Umid, Temp_Aux2, Inc_Temp_aux2, Area,
                        Inc_Area);

Bias_hconv := Bias_h ( hconv, Temp_Media[2], Bias_Temp[2], Temp_Aux1,
                        Bias_Temp_Aux1, vazao1+Vazao2, Bias_Vz, Umid,
                        Bias_Umid, Temp_Aux2, Bias_Temp_Aux2, Area,
                        Bias_Area );

Erro_hconv := sqrt ( sqr(Bias_hconv) + sqr(Tstudent*Inc_hconv) );

Nusselt := hconv*Dh/kar(Temp_media[2]);
Inc_kar := Calc_Inc_K ( Temp_Media[2], Inc_Temp[2]);

Bias_Nu := Bias_Nusselt ( Nusselt, hconv, Bias_hConv, Dh, Bias_Dh,
                        kar(Temp_Media[2]), Bias_k(Temp_media[2], Bias_temp[2]) );
Inc_Nu := Calc_Inc_Nusselt ( Nusselt, hconv, Inc_hconv,
                        Kar(Temp_media[2]), Inc_Kar );

Erro_Nu := Sqrt( sqr(Bias_Nu) + sqr(Tstudent*Inc_Nu) );

Assign ( Arq1, 'c:\multibra\aquisica\' + Nome_Arq + '.cnd' );
Rewrite ( arq1 );
Salva_Condicoes ( Arq1, Caso );
Writeln(Arq1);
Writeln(Arq1, Re:6:2, Erro_Re:6:2, Nusselt:6:2, Erro_Nu:6:2,
        hconv:6:2, Erro_hconv:6:2);
Close ( Arq1 );

End.

```

APÊNDICE F:

Subrotinas usadas no algoritmo de controle

Unit Aquisita;

```
{ ===== }
{ = }
{ = Esta unit efetua a aquisicao de dados necessarios ao }
{ = calculo do coeficiente medio de transferencia de calor hc, }
{ = que e o objeto de estudo do Convenio MULTIBRAS-USP, Termo }
{ = Aditivo 4. }
{ = }
{ = A saida de dados estao no arquivo Dados.dat que sera }
{ = processado pelo MATLAB para representacao grafica }
{ = }
{ = Software desenvolvido por Lynx Tecnologia Eletronica Ltda }
{ = (C) 1989 e modificado por Hamilton J. Sabanai - EPUSP }
{ = Versao 1.0 08.08.95 }
{ ===== }
```

Interface

Uses Dos, Crt, Flow, Tipos, Termopar;

Var

```
Dens_ar      : Real;
Umid_ar      : Real;
Temp_amb     : Real;
```

```
Procedure Aquisita_Dados ( Var Temp : VetorTemp; Var Vazao : VetorVazao;
                          P_Atm : Real );
```

```
Procedure Conv_Temperatura ( var VetTen : VetorTensao);
```

Implementation

```
{ ===== }
{ = Declaracao de Constantes = }
{ ===== }
```

Const

```
EndBase = $380; { Endereco base da placa CAD12/36 }
```

```
SecLimite = 0; { End. secundario da CAD12/36 - Reg. de Limite }
SecPonteiro = 1; { End. secundario da CAD12/36 - Ponteiro Memoria }
SecComAD = 2; { End. secundario da CAD12/36 - Comando Conv. A/D }
SecRM = 3; { End. secundario da CAD12/36 - Reg. de Modo }
SecMemoria = 4; { End. secundario da CAD12/36 - Escrita Memoria }
SecAutoCal = 6; { End. secundario da CAD12/36 - Auto Calibracao }
```

```
{ ===== }
{ = Declaracao de Variaveis = }
{ ===== }
```

```
Var CadCtr0 : word; { Reg. Contador 0 da CAD12/36 }
    CadCtr1 : word; { Reg. Contador 1 da CAD12/36 }
    CadCtr2 : word; { Reg. Contador 2 da CAD12/36 }
```

CadModo	: word;	{ Reg. de Modo do Timer	}
CadStatus	: word;	{ Reg. Estado da CAD12/36	}
ByteA	: word;	{ Reg. Byte A do conversor A/D	}
ByteB	: word;	{ Reg. Byte B do conversor A/D	}
CadEnd	: word;	{ Registrador de Endereco	}
CadDado	: word;	{ Reg. dado de escr. memoria	}
CadDigOut	: word;	{ Saida Digital da Placa	}
VetLeit	: VetorCanal;	{ Vetor com leituras	}
VetTen	: VetorTensao;	{ Vetor com Tensoes aquisitadas	}
VetG	: VetorGanho;	{ Vetor com os ganhos dos canais	}
Arq	: Text;	{ Arquivo de saida de dados	}

```
{ ===== }
{ =          Rotina  IniciaEnderecoHardware          = }
{ ===== }
```

```
Procedure IniciaEnderecoHardware;
begin
```

```
  CadCtr0  := EndBase + 0;
  CadCtr1  := EndBase + 1;
  CadCtr2  := EndBase + 2;
  CadModo  := EndBase + 3;
  CadStatus := EndBase + 3;
  ByteA    := EndBase + 4;
  ByteB    := EndBase + 5;
  CadEnd   := EndBase + 4;
  CadDado  := EndBase + 5;
  CadDigOut := EndBase + 6;
```

```
end;
```

```
{ ===== }
{ =          Rotina  EscreveRegSecundario          = }
{ ===== }
```

```
Procedure EscreveRegSecundario (EndReg, Dado: byte);
begin
```

```
  Port [CadEnd]  := EndReg;
  Port [CadDado] := Dado;
```

```
end;
```

```
{ ===== }
{ =          Rotina  EscreveMemCanais          = }
{ ===== }
```

```
Procedure EscreveMemCanais (Posicao, Dado: byte);
begin
```

```
  EscreveRegSecundario (SecPonteiro, Posicao);    { Endereco da Memoria de
```

```
  Canais }
  EscreveRegSecundario (SecMemoria, Dado);      { Canal e Ganho
```

```
  correspondente }
```

```
end;
```

```
{ ===== }
{ =          Rotina  AutoCalibracao          = }
```

```

{ ===== }

Procedure AutoCalibracao;
begin
  EscreveRegSecundario (SecAutoCal, 0);
  Delay (400);
end;

{ ===== }
{ =                      Rotina LimpaFIFO                      = }
{ ===== }

Procedure LimpaFIFO;

Var i, Dado: integer;

begin
  for i := 1 to 17 do
  begin
    Dado := Port [ByteB];
    Dado := Port [ByteA];
  end;
end;

{ ===== }
{ =                      Rotina ProgramaMemoriaCanais          = }
{ = Os canais serao utilizados seguindo a seguinte             = }
{ = convencao :                                                 = }
{ = Canal 0  - Temperatura de referencia do amplificador      = }
{ = Canal 1  - Temperatura de bulbo seco do psicrometro       = }
{ = Canal 2  - Temperatura de bulbo umido do psicrometro      = }
{ = Canal 3  - Temperatura do ar antes do trocador            = }
{ = Canal 4  - Temperatura do ar depois do trocador pto.1     = }
{ = Canal 5  - Temperatura do ar depois do trocador pto.2     = }
{ = Canal 6  - Temperatura do ar depois do trocador pto.3     = }
{ = Canal 7  - Temperatura do ar depois do trocador pto.4     = }
{ = Canal 8  - Temperatura do tubo pto.1                      = }
{ = Canal 9  - Temperatura do tubo pto.2                      = }
{ = Canal 10 - Temperatura do tubo pto.3                      = }
{ = Canal 11 - Temperatura do tubo pto.4                      = }
{ = Canal 12 - livre                                           = }
{ = Canal 13 - livre                                           = }
{ = Canal 14 - Pressao diferencial da placa 1                  = }
{ = Canal 15 - Pressao diferencial da placa 2                  = }
{ ===== }

Procedure ProgramaMemoriaCanais;

const
  G1   = 7*16;           { constantes para programar o ganho }
  G2   = 6*16;
  G5   = 5*16;
  G100 = 3*16;
  Bipolar = $80;

```

```

Unipolar = $00;

var i : integer;

begin
  For i := 0 to (NumCn - 1) do
    VetG[i] := G1;

    EscreveRegSecundario (SecLimite, $f); { Carrega 15 no Reg. Limite }
    EscreveMemCanaais ( 0, bipolar+VetG[0]+ 0); { mem. 0, cn 0, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais ( 1, bipolar+VetG[1]+ 1); { mem. 1, cn 1, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais ( 2, bipolar+VetG[2]+ 2); { mem. 2, cn 2, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais ( 3, bipolar+VetG[3]+ 3); { mem. 3, cn 3, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais ( 4, bipolar+VetG[4]+ 4); { mem. 4, cn 4, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais ( 5, bipolar+VetG[5]+ 5); { mem. 5, cn 5, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais ( 6, bipolar+VetG[6]+ 6); { mem. 6, cn 6, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais ( 7, bipolar+VetG[7]+ 7); { mem. 7, cn 7, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais ( 8, bipolar+VetG[8]+ 8); { mem. 8, cn 8, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais ( 9, bipolar+VetG[9]+ 9); { mem. 9, cn 9, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais (10, bipolar+VetG[10]+10); { mem.10, cn 10, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais (11, bipolar+VetG[11]+11); { mem.11, cn 11, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais (12, bipolar+VetG[12]+12); { mem.12, cn 12, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais (13, bipolar+VetG[13]+13); { mem.13, cn 13, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais (14, bipolar+VetG[14]+14); { mem.14, cn 14, bip. e G 1 }
    EscreveMemCanaais (15, bipolar+VetG[15]+15); { mem.15, cn 15, bip. e G 1 }
  end;

  { ===== }
  { = Rotina LeConv = }
  { ===== }

  procedure LeConv(var VetLeit : VetorCanal);

  var
    i: integer;

  begin
    For i := 0 to pred(NumCn) do
      Begin
        EscreveRegSecundario (SecComAD, i); { pede conversao a partir de 0 }
        repeat
          until (Port[CADStatus] and 1) <> 0;
          VetLeit[i] := (Port[ByteB] shl 8 + Port[ByteA]);
          { Byte A deve ser lido primeiro }
        End;
      end;
    end;

  Procedure Conv_Temperatura ( var VetTen : VetorTensao);

  {= Converte as tensoes dos canais 0 a 10 para temperatura =}
  {= Admite-se que foram utilizados termopares Tipo J =}
  {= Ferro-Constantan em todos os canais =}

```

```

Var
  i : integer;

Begin
  For i := 0 to 13 do
    VetTen[i] := Busca_Temperatura (VetTen[i], Termopar_J);
  End;

  Procedure Conv_Dif_Pressao ( var VetTen : VetorTensao );

    {= Converte as tensoes dos canais 11 e 12 para o diferencial =}
    {= de pressoes correspondentes                               =}

  Begin
    VetTen[11] := 900;
    VetTen[12] := 500;
  End;

  Procedure Aquisita_Dados ( Var Temp : VetorTemp; Var Vazao : VetorVazao;
                             P_Atm : Real );

  var
    i,
    Code          : integer;
    StringAux      : String;
    Vazao_massa_1  : Real;
    Vazao_massa_2  : Real;
    Temp_placa     : Real;
    Temp_Tubo      : Real;

  begin
    IniciaEnderecoHardware;          { Determina os enderecos de I/O da placa
    CAD12/36 }
    EscreveRegSecundario (SecRM, 0); { Zera Registrador de Modo da CAD12/36
    }
    AutoCalibracao;                  { Comando de Auto-Calibracao do Conversor
    A/D }
    ProgramaMemoriaCanais;           { Programa a memoria de canais
    }

    LimpaFIFO;           { Limpa a memoria FIFO da CAD12/36 }
    LeConv(VetLeit);

    { ===== }
    { = Conversao dos dados para Tensao = }
    { = Formato em Complemento de 2 = }
    { ===== }
    For i := 0 to 13 do
      VetTen[i] := 10*(VetLeit[i]/32768);

    Conv_Temperatura ( VetTen );
    Conv_Dif_Pressao ( VetTen );

    { Calcula umidade do ar para calculo da vazao }

```

```
{ ACESSA Unit Flow }

Temp_Amb := VetTen[2];      { Para salvar o valor no arquivo arg.cnd }
Umid_ar := Calc_Umidade_ar(VetTen[1], VetTen[0], P_Atm);

{ Calcula Vazao em massa no tunel,
  { somando os fluxos das placas 1 e 2 }
  { ACESSA UNIT Flow }

Temp_Placa := VetTen[3]+VetTen[4]+VetTen[5]+VetTen[6];
Temp_Placa := Temp_Placa/4; { Media de temperaturas apos o trocador }

Dens_ar := Calc_Densidade_ar ( P_Atm, Umid_ar, Temp_Placa );

Vazao_Massa_1 := Calc_Vazao( VetTen[11], P_Atm, Temp_placa, Dens_ar );
Vazao_Massa_2 := Calc_Vazao( VetTen[12], P_Atm, Temp_placa, Dens_ar );

Temp_tubo := VetTen[7]+VetTen[8]+VetTen[9]+VetTen[10];
Temp_tubo := Temp_tubo/4;

For i := 0 to 10 do
    Temp[i].Temp := VetTen[i];

Vazao[1].Vaz := Vazao_massa_1;
Vazao[2].Vaz := Vazao_massa_2;
Vazao[1].DP := VetTen[11];
Vazao[2].DP := VetTen[12];

end;

end.
```

```
Program t_control;

{testa unit control }

Uses control, daout, crt;

var

frq : real;
V   : real;
stop : char;
Begin

  Repeat
    ClrScr;
    Writeln ('Waiting for a "S" comand ... ');
    stop := readkey;
  Until upcase(stop) = 'S';

  Repeat
    frq := 10;
  Repeat
    Clrscr;
    Gotoxy ( 30, 12 );
    Write ('RUNNING ...', frq:6:2, ' Hz');

    V := Converte_Freq_Tensao ( 100, 0, Frq );
    Envia_Tensao ( Converte_Tensao_int (V));
    frq := frq +10;
    delay (5000);
  Until frq >= 60;
  Repeat
    Clrscr;
    Gotoxy ( 30, 12 );
    Write ('RUNNING ...', frq:6:2, ' Hz');

    V := Converte_Freq_Tensao ( 100, 0, Frq );
    Envia_Tensao ( Converte_Tensao_int (V));
    frq := frq -10;
    delay (8000);
  Until frq <= 0;
  GotoXY ( 40, 20 );
  Write ('REPEAT ? (S/N) ');
  stop := readkey;

  Until not (upcase(Stop) = 'S') ;

End.
```