



Escola Politécnica
Universidade de São Paulo.

1336731

***DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE
CONTROLE TÉRMICO DE AMBIENTES***

Autores: Hilário Marcos Koyama N° USP: 2 813 902

Jefferson Edward Gizzi N° USP: 2 804 079

PMC 581 - Projeto Mecânico II

Orientador: Profº Dr. Agenor de Toledo Fleury

São Paulo, dezembro de 1996.

AGRADECIMENTOS:

Ao

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

pela coordenação, apoio e constante incentivo para o progresso do projeto

e a

Marcos Ribeiro de Castro

Prof. Dr. José Sotelo Jr.

Prof. Edilson Hiroshi Tamai

Prof. Flávio Buyochi

Prof. Júlio Meneghini

Prof. Jun Okamoto Jr.

Prof. Godoy

Cássio

Técnicos do IPT

Marwal do Brasil Ltda.

Humaitá - Informática e Tecnologia

pelas contribuições nas diversas etapas do projeto.

DEDICATÓRIA:

Ao meu pai, que está junto ao Pai,
pelo amor e dedicação, sempre presentes.

Jefferson

SUMÁRIO

<u>Sumário</u>	4
<u>Lista De Símbolos</u>	7
<u>Resumo</u>	8
<u>I. Introdução</u>	9
I.1. <u>Motivação</u>	9
I.2. <u>Objetivos</u>	11
<u>II. Modelagem do Sistema a Parâmetros Concentrados</u>	12
II.1. <u>Introdução</u>	12
II.2. <u>Equacionamento</u>	14
II.2.1. <u>Balanço de Energia</u>	14
II.2.2. <u>Aquecimento</u>	15
II.2.3. <u>Resfriamento</u>	16
II.2.4. <u>Zona Morta</u>	17
II.3. <u>Modelo Linear</u>	17
<u>III. Simulações</u>	18
III.1. <u>Introdução</u>	18
III.2. <u>Sintonia do Controlador PID</u>	20
III.3. <u>Resfriamento para Degrau na Temperatura de Referência</u>	22
III.4. <u>Aquecimento para Degrau na Temperatura de Referência</u>	23
III.5. <u>Degrau da Temperatura Ambiente</u>	24
III.6. <u>Discussão Dos Resultados</u>	26
<u>IV. Projeto do Sistema</u>	28

IV.1. <u>Parte Estrutural</u>	28
IV.2. <u>Sensores e Atuadores</u>	29
IV.3. <u>Parte Eletrônica</u>	30
IV.3.1. <u>Placa de Aquisição de Dados</u>	31
IV.3.2. <u>Conversores de Temperatura</u>	31
IV.3.3. <u>Filtros passa-baixas</u>	32
IV.3.4. <u>Driver para ventilador</u>	32
IV.3.5. <u>Relés de Estado Sólido</u>	33
IV.4. <u>Software de Controle e Interface Homem-máquina</u>	33
IV.4.1. <u>Interface Homem-máquina</u>	33
IV.4.2. <u>Interface com o meio externo</u>	39
IV.4.3. <u>Sistema de Controle</u>	39
IV.5. <u>Lista de Materiais</u>	39
V. <u>Resultados</u>	43
V.1. <u>Resultados Obtidos</u>	43
V.2. <u>Análise dos Resultados</u>	44
VI. <u>Abordagens Futuras</u>	46
VI.1. <u>Modelo a parâmetros distribuídos</u>	46
VI.1.1. <u>Introdução</u>	46
VI.1.2. <u>Modelagem do Problema Térmico</u>	46
VI.1.3. <u>Utilização de Software de Elementos Finitos</u>	51
VI.2. <u>Controlador de Estados</u>	54
VI.2.1. <u>Análise de Controlabilidade</u>	58

<u>VI.2.2. Análise de Observabilidade</u>	58
<u>VI.2.3. Controlabilidade e Observabilidade do Sistema Real</u>	59
<u>VI.2.4. Projeto do Controlador (Caso para Controle Ótimo)</u>	60
<u>VI.3. Propostas Futuras</u>	61
<u>VII. Conclusões</u>	64
<u>Anexos</u>	66
<u>A - Determinação dos Coeficientes de Película</u>	66
<u>B - Desenho de Montagem</u>	71
<u>C - desenhos de fabricação</u>	73
<u>D - Listagem do Software Desenvolvido</u>	83
<u>Referências Bibliográficas</u>	97
<u>Apêndices</u>	98

LISTA DE SÍMBOLOS

- \dot{Q}_v - variação da quantidade de calor no interior do volume de controle.
- \dot{E}_g - potência gerada num gerador de potência.
- \dot{E}_e - potência que entra no volume de controle.
- \dot{E}_s - potência que sai do volume de controle.
- C_a - capacidade térmica do ar no interior da caixa.
- T_a - Temperatura interna do ar no volume de controle.
- $\frac{\partial T_a}{\partial t}$ - taxa de variação da temperatura do ar com o tempo.
- U - tensão aplicada à resistência.
- R - resistência elétrica do resistor.
- h_i - o coeficiente de transferência de calor por convecção na parte interna da parede.
- A - área superficial da caixa.
- T_c - temperatura do alumínio das paredes.
- h_e - coeficiente de transferência de calor por convecção na parte externa da parede da caixa.
- T_∞ - temperatura ambiente.
- \dot{m} - fluxo em massa de ar pelo ventilador.
- c_{ar} - calor específico do ar.

RESUMO

A unidade térmica é essencialmente uma caixa para controle de temperatura do ar interno onde há dois sistemas de atuação: uma resistência elétrica para aquecimento e um ventilador para o resfriamento. É uma experiência clássica na área de controle e que, aliada a algumas outras, visa equipar um pequeno laboratório de automação e controle onde alunos e pesquisadores possam verificar experimentalmente o desempenho de controladores dos mais diversos e o efeito da medição da resposta no desempenho do sistema de controle. Quer-se verificar também a influência do método de sensoreamento nas curvas de resposta e no objeto de controle. Para isto deve ser possível trocar as posições dos sensores e colocar paredes dentro da caixa, mudando as condições de transferência de calor e de escoamento do ar. O problema será abordado, aqui, de duas maneiras, a primeira utilizando ferramentas do controle clássico e adotando que a temperatura dentro da caixa seja aproximadamente uniforme; a segunda - mais sofisticada - admite gradientes de temperatura dentro da caixa. Será usado o programa de elementos finitos ANSYS para auxiliar na solução do problema. Assim, pode-se comparar os resultados e proceder as análises quanto à eficiência de cada método e do programa de controle.

I. INTRODUÇÃO

I.1. Motivação

O recente crescimento da área de automação e controle na indústria brasileira e mundial fez surgir em nossas universidades cursos voltados especialmente para esta área. Com o desenvolvimento desta nova área de atuação, ressentiu-se pela falta de laboratórios e equipamentos que pudessem dar ao aluno uma formação mais completa no tocante à experimentação e prática das técnicas de controle. Aos moldes de outras universidades do mundo, pretende-se criar aqui um laboratório de automação onde, além da formação acadêmica de profissionais na área, seja possível desenvolver pesquisas e estudos em controle, dando aos nossos cientistas material para trabalho inesgotável, como é esta área.

Um experimento de controle de temperatura fornece subsídios suficientes para o desenvolvimento das técnicas de controle, haja vista a complexidade do problema. Aliada à simplicidade de sua implementação física, este experimento mostra-se bastante satisfatórios para os propósitos de estudos em laboratórios de uma universidade.

O objetivo básico deste experimento não é ser encerrado em si mesmo, mas sim oferecer material para continuadas análises sob os mais diferentes pontos de vista.

O que se pretende é utilizar diferentes formas de tratar o problema do controle de temperatura em um ambiente. Primeiramente será utilizada uma estratégia de controle

clássico com apenas uma variável de entrada e uma de saída. Isto será feito considerando a simplificação de que a temperatura seja aproximadamente uniforme dentro da caixa.

Uma análise posterior através da modelagem por equações de estado (ou seja, multivariável), com auxílio de programas de elementos finitos pretende considerar os gradientes de temperatura do ar dentro da caixa e criar um programa de controle mais sofisticado. A robustez da tática de controle será avaliada pela inserção de chicanas no interior da unidade térmica de modo a alterar o escoamento dentro da mesma.

Estudando o comportamento do sistema de controle em diversos níveis de profundidade, pode-se comparar o desempenho de uma em relação à outra maneira de modelar o sistema. Também será possível concluir sobre a validade de algumas simplificações adotadas no modelo e suas influências no resultado final.

Juntamente com o desenvolvimento deste experimento, outros também estão sendo implementados dentro do grupo PET (Programa Especial de Treinamento - CAPES). Todos eles visam equipar este laboratório de controle.

I.2. Objetivos

Os objetivos deste projeto são:

- Modelagem da unidade térmica a parâmetros concentrados;
- Projeto do sistema de controle pela abordagem clássica (uma entrada e uma saída - SISO);
- Estudo através de simulações da estabilidade do sistema bem como análise da sua resposta a diversos tipos de entrada;
- Implementação estrutural da estufa;
- Instalação de sensores e atuadores;
- Implementação da parte eletrônica do controlador;
- Implementação do software de controle e interface com o usuário;
- Estudo de programas de elementos finitos e escolha do que será utilizado na modelagem;
- Modelagem da estufa utilizando-se elementos finitos;
- Projeto de controlador segundo técnicas de controle moderno;
- Execução de testes experimentais e análise do desempenho e robustez do sistema desenvolvido;
- Servir de base para futuros trabalhos em controle térmico, segundo as mais diversas abordagens do problema;
- Geração da documentação necessária para o subsídio ao prosseguimento do trabalho por outros alunos, no futuro.

II. MODELAGEM DO SISTEMA A PARÂMETROS

CONCENTRADOS

II.1. Introdução

A estufa é essencialmente uma caixa onde há dois sistemas de atuação; uma resistência elétrica para aquecimento e um ventilador para o resfriamento. Assim, a temperatura do ar dentro da caixa deve manter-se constante segundo uma entrada de referência. Tal temperatura não pode estar abaixo da ambiente, haja vista que o ar externo à caixa será utilizado para o resfriamento através do ventilador.

A caixa será de formato paralelepípedico e de material não isolante; tais providências visam generalizar ao máximo o problema, não limitando em demasia suas aplicações.

Foi desenvolvida toda a modelagem do sistema com base nas equações de conservação de energia e transferência de calor e então feita a descrição do problema em diagramas de blocos e a simulação do sistema testando tempo de resposta, estabilidade e variando parâmetros importantes na escolha dos componentes do sistema adquiridos.

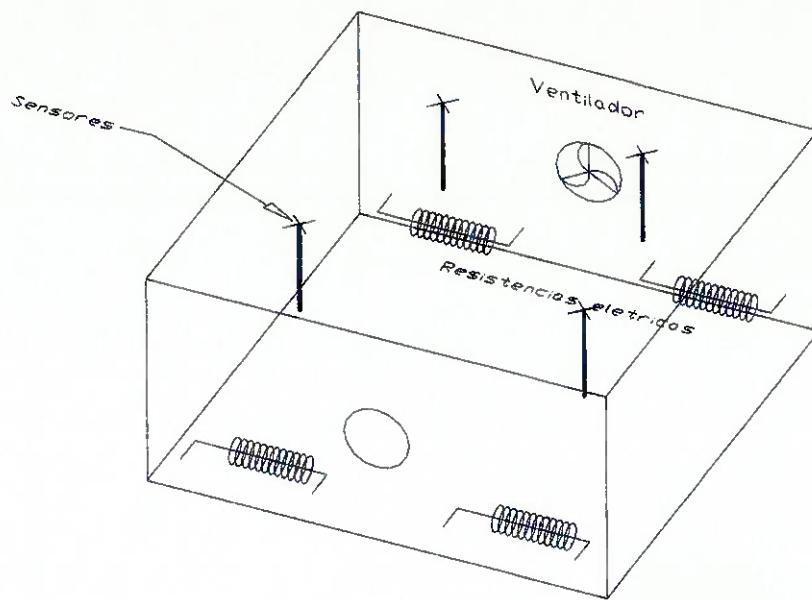


Figura II-1: Esquematização Geral da Unidade Térmica.

Para o modelo a seguir foram desprezados gradientes de temperatura internos à caixa, na superfície e mesmo exteriormente. As temperaturas medidas podem ser consideradas médias de temperatura. Porém, deve ser considerado no modelo o atraso de transporte devido ao sensor de temperatura, assim o controlador enxerga uma temperatura defasada no tempo. O ventilador funciona com vazão constante no sistema de ON/OFF. Como a resposta geral do sistema é muito lenta e o ventilador a ser utilizado é pequeno (do tipo usado em microcomputadores), sua resposta é muito mais rápida que a do restante do sistema, portanto foi desprezada a inércia das pás do ventilador; supõe-se que sua resposta seja instantânea.

Em suma, esta modelagem da estufa, apresentou, apesar da simplificação para uma variável, características de certa complexidade:

- Coeficiente de película (fundamental nas taxas de transferência de calor) altamente variável em função de se haver ou não ventilação (não-linearidade);
- Atraso de transporte na medição (termistores / termopares): pode ser minimizado com o uso de compensadores (que só servem para situações particulares);
- Dinâmicas acopladas: ar externo - paredes - ar interno;
- Combinação de atuadores/controladores: resistência (PID) + ventilador (ON/OFF);
- Problema de sintonização do controlador PID para um sistema altamente não linear.

II.2. Equacionamento

II.2.1. Balanço de Energia

Para o interior da caixa:

$$\dot{Q}_{vc} = \dot{E}_g + (\dot{E}_e - \dot{E}_s), \text{ onde}$$

\dot{Q}_{vc} é a variação da quantidade de calor no interior da caixa;

\dot{E}_g é a potência gerada na resistência;

\dot{E}_e e \dot{E}_s são as potências que entram e saem da caixa por diferenças de temperatura.

II.2.2. Aquecimento

No caso em que a temperatura no interior da caixa é inferior à temperatura de referência, tem-se que o ventilador estará desligado e a resistência está ligada.

O ar pode ser considerado um gás perfeito, portanto obtém-se a capacidade térmica do ar no interior da caixa pelo produto do calor específico à pressão constante do ar pela massa de ar no interior da caixa. Assim, pode-se escrever:

$$\dot{Q}_{vc} = Ca * \frac{\partial Ta}{\partial t}, \text{ onde}$$

Ca é a capacidade térmica do ar no interior da caixa;

$\frac{\partial Ta}{\partial t}$ é a taxa de variação da temperatura do ar com o tempo.

Com a resistência ligada, considerando *U* a tensão aplicada à resistência e *R* a resistência elétrica do resistor, pelas leis da eletricidade:

$$\dot{E}_s = \frac{U^2}{R}$$

Considerando que o ar perde calor para a caixa por convecção:

$$\dot{E}_e = 0$$
$$\dot{E}_e = h_i * A * (Tc - Ta), \text{ onde}$$

h_i é o coeficiente de transferência de calor por convecção natural na parte interna da parede;

A é a área superficial da caixa;

Tc é a temperatura do alumínio das paredes;

Ta é a temperatura interna do ar.

Assim, na equação da energia, temos:

$$Ca * \frac{\partial Ta}{\partial t} = \frac{U^2}{R} + h_i * A * (Tc - Ta) \quad (1)$$

Para avaliar Tc , aplica-se a primeira lei da Termodinâmica na parede da caixa.

Considerando h_e como o coeficiente de transferência de calor por convecção na parte externa da parede da caixa e $T\infty$ como a temperatura ambiente:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{vc} &= \dot{E}_g + \dot{E}_e - \dot{E}_s \\ C_{Al} * \frac{\partial Tc}{\partial t} &= h_e * A * (T\infty - Tc) - h_i * A * (Tc - Ta) \end{aligned} \quad (2)$$

II.2.3. Resfriamento

No caso da temperatura no interior da caixa ser superior à temperatura de “set point”, deve-se ligar o ventilador e a resistência deve estar desligada.

$$\dot{Q}_{vc} = Ca * \frac{\partial Ta}{\partial t}$$

O fluxo de calor entrando no volume de controle se deve ao fluxo de entalpia devido à ação do ventilador. Considerando \dot{m} o fluxo em massa de ar pelo ventilador e c_{ar} o calor específico do ar:

$$\dot{E}_e = \dot{m} * c_{ar} * (T\infty - Ta)$$

$$\dot{E}_s = h_i * A * (Tc - Ta),$$

calor perdido por convecção para a caixa - pode ser negativo. É importante observar que, neste caso, h_i é o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada na parte interna da parede, portanto h_i assume um valor mais elevado do que no caso anterior (Aquecimento).

Portanto, obtém-se:

$$Ca * \frac{\partial Ta}{\partial t} = \dot{m} * c_{ar} * (T_{\infty} - Ta) - h_i * A * (T_c - Ta) \quad (3)$$

II.2.4. Zona Morta

Se a temperatura interior estiver dentro da tolerância aceitável da temperatura de referência, resistência e ventilador devem estar desligados. Como nesta situação não há necessidade de controle, despreza-se este caso de modo que se modela somente a obtenção do equilíbrio às custas do funcionamento de um dos dois atuadores (resistência ou ventilador).

II.3. Modelo Linear

Aplicando a transformada de Laplace [3] nas equações (1), (2) e (3) e desprezando as condições iniciais para inserir no diagrama de blocos, obtém-se:

$$Ca * s * ta = \frac{u}{R} + h_i * A * (T_c - Ta), \text{ onde } u = U^2$$

$$C_{Al} * s * T_c = h_e * A * (T_{\infty} - T_c) - h_i * A * (T_c - Ta)$$

$$Ca * s * Ta = \dot{m} * c_{ar} * (T_{\infty} - Ta) + h_i * A * (T_c - Ta)$$

A partir destas equações foram construídos os diagramas de blocos e realizadas várias simulações no software MATLAB, cujos resultados podem ser vistos a seguir.

III. SIMULAÇÕES

III.1. Introdução

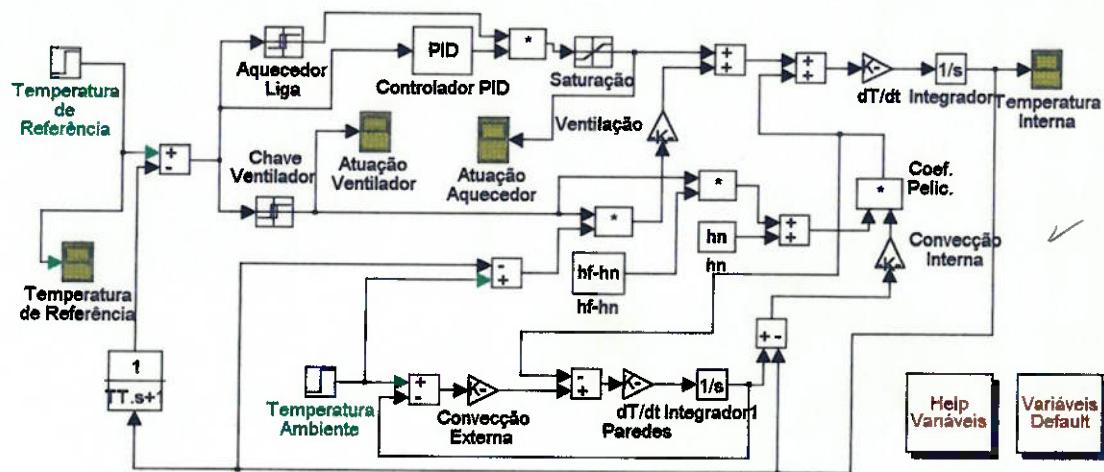


Figura III-1: Diagrama de Blocos da Estufa.

Para a simulação a partir do diagrama de blocos acima, foram utilizados os seguintes valores para as constantes geométricas e de propriedades:

- Massa específica do ar: 1.1774 kg/m^3
- Coeficiente de película para convecção natural: $4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
- Coeficiente de película para convecção forçada: $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
- Calor específico a pressão constante do ar: $1005.7 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
- Vazão em volume do ventilador: $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$
- Comprimento da caixa: 0.7 m
- Largura da caixa: 0.7 m
- Altura da caixa: 0.35 m

- Espessura das paredes da caixa: 0.001 m
- Massa específica do alumínio: 2707 kg/m³
- Calor específico do alumínio: 896 J/kg.°C
- Potência máxima do Aquecedor: 1200 W.

Deve-se ressaltar aqui, com o propósito de permitir a reprodução das simulações, um aspecto muito importante: como o MatLab não permite definir um valor de saída inicial para o bloco de 1.^a ordem ($\frac{1}{TTs+1}$), sendo obrigatoriamente zero, foi necessário fazer algumas modificações no diagrama de blocos anterior (modificações não presentes no diagrama aqui apresentado por serem decorrentes dessa “falha” do MatLab, portanto não fazendo parte, conceitualmente, do modelo): todos os valores iniciais dos integradores ($\frac{1}{s}$, em que o MatLab permite definir saída inicial) foram colocados em zero; os valores iniciais das temperaturas de referência foram colocados em zero e os da temperatura ambiente foram colocados de modo a manter a mesma diferença em relação à de referência, para cada caso; os sinais lidos de todas as temperaturas, para monitoração (*scopes*), foram somados com as constantes de correção, antes da *plotagem*, a fim de mostrar as temperaturas reais de simulação. A histerese de liga/desliga do aquecedor vai de -2°C a 2°C; a do ventilador, de -2°C a 0°C (para evitar que, no início da simulação, o ventilador ligue mesmo com erro nulo). A integração é feita pelo algoritmo Runge-Kutta de 5.^a ordem com correção de passo, e os resultados foram checados com o método de Adams-Gear.

III.2. Sintonia do Controlador PID

Como o sistema é não-linear, não se pode usar a teoria de controle clássico (alocação de pólos, requisitos de resposta em freqüência). A abordagem adotada foi a de utilizar as simulações para verificar as influências dos diversos ganhos e determiná-los, ainda através de simulações, a fim de garantir estabilidade para os casos críticos, com a melhor resposta (rapidez) possível.

Influência dos Ganhos:

- Se ganhos proporcional (P) for pequeno e integrativo (I) for grande, a integral do erro acumulado (devido ao atraso de transporte) causa instabilidade.
- Se ganho P for grande, ganho I pode ser maior. Porém, ganho P muito elevado causa instabilidade (conforme previsto na teoria de controle mesmo para sistemas lineares).
- Ganho derivativo, embora ajude a causar grandes picos no início da atuação (se o erro estiver aumentando), suaviza a resposta no restante da atuação (quando o erro estiver diminuindo), podendo eliminar a instabilidade que o ganho integrativo elevado induz. É o efeito preditivo do derivador se opondo ao integrador.

A metodologia adotada para a sintonia foi:

1. Com $I=0$ e $D=0$, acha P máximo que mantenha sistema estável (por simulação);
2. Coloca-se $P=P_{\max}/f_s$ (fator de segurança);
3. Acha I máximo que mantenha sistema estável;
4. Coloca-se $I=I_{\max}/f_s$;

5. Acha novos P_{\max} e P_{\min} com estabilidade;
6. Coloca-se $P = P_{\min} + (P_{\max} - P_{\min})/f_s$;
7. Acha-se o ganho D de modo a manter estabilidade mesmo para um ganho I que cause instabilidade, por exemplo $I = I_{\max} \cdot f_s$

Utilizando-se este método, o controlador foi sintonizado com: $P=90$

$I=0.1$

$D=2000$

Note que o fato de ocorrer $D \gg P \gg I$ se deve à dinâmica do sistema:

- como ele é muito lento, a integração do erro atinge valores muito elevados (pois é integrado ao longo de um grande intervalo de tempo antes do sistema responder à atuação), portanto deve-se ter I pequeno para contrabalançar este efeito;
- analogamente, o fato de ser lento fornece pequenos valores da derivada do erro, portanto deve-se ter D elevado para que a atuação devida ao fator derivativo seja significante.

Foram realizadas simulações para quatro casos: a temperatura de referência variando segundo um degrau para simulação de resfriamento; a temperatura de referência variando segundo um degrau, para simulação do aquecimento; a temperatura ambiente variando segundo degraus para aquecimento e resfriamento.

III.3. Resfriamento para Degrau na Temperatura de Referência

Aplicando um degrau na temperatura de referência observa-se o comportamento do sistema para uma situação em que é preciso resfriamento.

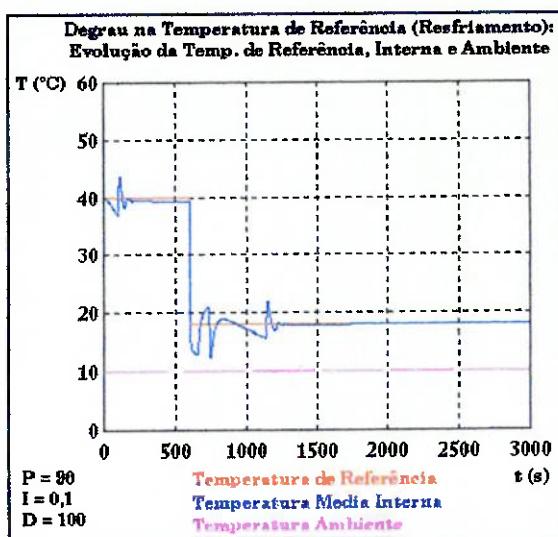


Figura III-2

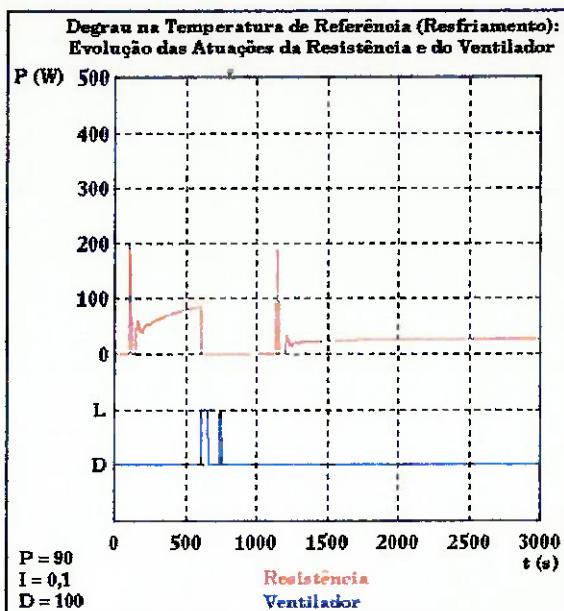


Figura III-3

**III.4. Aquecimento para Degrau na
 Temperatura de Referência**

Aplicando um degrau na temperatura de referência observa-se o comportamento do sistema para uma situação em que é preciso aquecimento.

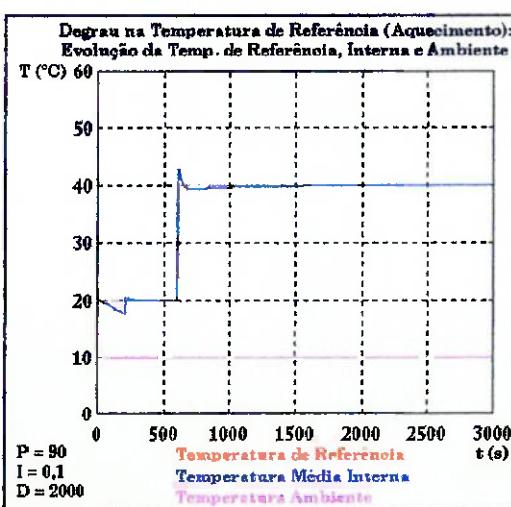


Figura III-4

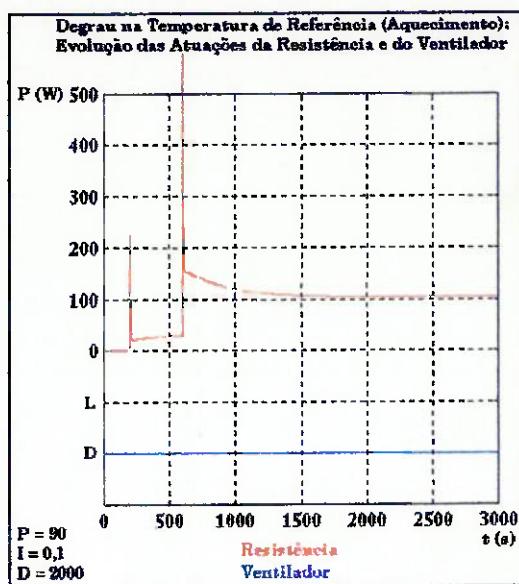
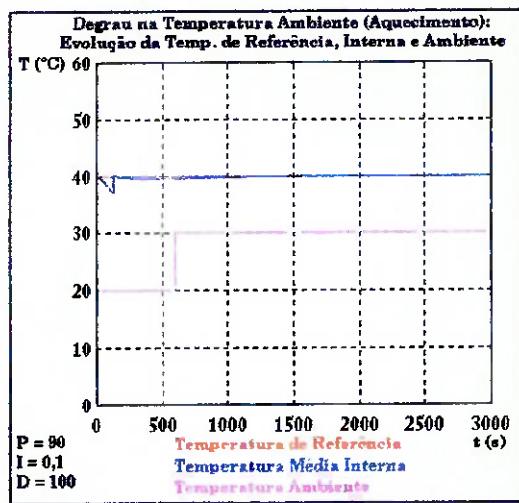
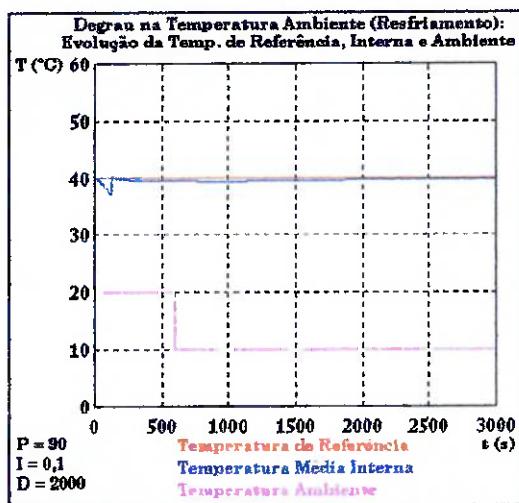


Figura III-5

III.5. Degrau da Temperatura Ambiente

Aplicando-se uma entrada em degrau na temperatura ambiente:



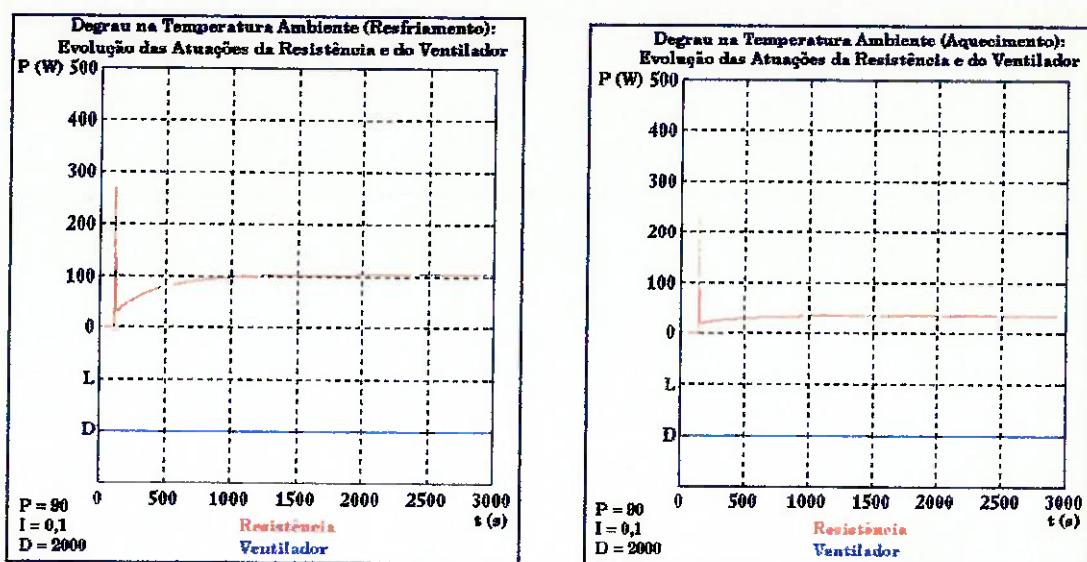


Figura III.6

III.6. Discussão Dos Resultados

Como se pode notar pelos gráficos de resposta do sistema, o caso crítico de estabilização da temperatura ocorre para o caso do resfriamento, que leva mais tempo para entrar em regime. Devido à característica *on-off* do ventilador, não há muito o que fazer para reduzir este tempo. Essa característica *on-off*, além de aumentar o tempo de estabilização para o resfriamento, também influí de maneira negativa no aquecimento, pois, para evitar instabilidade do sistema (como prevê a teoria de controle, ganhos elevados costumam desestabilizar os sistemas, enquanto ganhos pequenos deixam sua resposta muito lenta), é necessário reduzir os ganhos do controlador PID (resistência), principalmente da parcela integrativa. Cabe aqui ressaltar que não se incluiu todas as simulações feitas por dois motivos principais: isto iria estender muito o presente relatório, sendo que quaisquer simulações podem ser repetidas montando-se num software apropriado (como o Simulink do MatLab) o diagrama de blocos aqui apresentados; além disso, o objetivo do presente trabalho não é esgotar a análise da estufa, mas demonstrar que a estufa é uma rica fonte de experimentação para estudantes de controle.

Já os processos de aquecimento em geral, como se pode notar das simulações, não apresentaram grandes problemas, visto que o controlador PID é suficientemente robusto para permitir um controle satisfatório da temperatura média da estufa. A única ressalva, como discutido anteriormente, é que não se pode aumentar muito os ganhos do controlador PID, ainda que não cause problemas (apenas melhorando o desempenho) no

aquecimento, pois isso traz consequências catastróficas para alguns casos de resfriamento, desestabilizando completamente o sistema.

IV. PROJETO DO SISTEMA

O projeto da estufa pode ser dividido em quatro partes:

- Parte estrutural;
- Sensores e atuadores;
- Parte eletrônica;
- Software de controle e interface com o usuário.

IV. 1. Parte Estrutural

As dimensões da estufa foram definidas arbitrariamente, pois se pretende projetar um controlador para um ambiente definido a priori; ou seja, o controlador deve se adequar ao ambiente que se quer controlar e não o contrário.

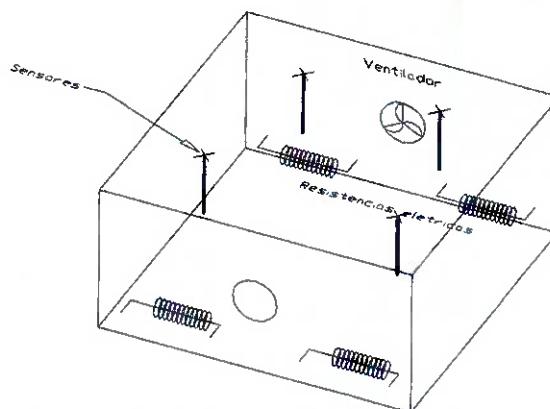


Figura IV-1: Representação Esquemática da Estufa

Além disso, escolheu-se como material para a fabricação da estufa o alumínio, que, por ser um bom condutor, dificulta o controle de temperatura.

Todo o projeto da parte estrutural se encontra documentado e os desenhos de fabricação e montagem se encontram anexos ao presente trabalho.

A estufa foi construída utilizando-se as instalações do Laboratório de Máquinas Operatrizes do Departamento de Engenharia Mecânica.

IV.2. Sensores e Atuadores

A) Seleção

Para o sensoreamento, pensou-se inicialmente no uso de termopares; contudo, devido à sua menor precisão de medida da temperatura e seu maior tempo de resposta, quando comparado com termorresistências, preferiu-se o uso destas; mais especificamente, foram escolhidos sensores do tipo PT100 (100 ohms a 0°C). A faixa de temperaturas de trabalho muito estreita também foi um dos fatores que contribuíram na escolha das termorresistências.

Os atuadores foram definidos em função dos resultados da simulação, de modo a evitar saturação dos mesmos. Deste modo, escolheu-se para realizar o aquecimento 4 Resistências da marca Dennex, modelo BCAF-310 de 220VAC, 300W cada; para o resfriamento, 1 ventilador para fonte de microcomputador DFB0812H da Delta Electronic Ind. Co. Ltd. (DC Brushless, ϕ 75 mm, 12 V, 220 mA).

B) Instalação

Foram feitos diversos orifícios de 6.0 mm na tampa de acrílico da estufa de modo a se poder introduzir os sensores na configuração desejada.

O ventilador foi fixado na Parede Lateral Anterior (UT002) num dos orifícios de 75.0 mm, por 4 parafusos M3 x 10 através dos orifícios menores ao redor daquele.

Na instalação das resistências, é importante observar que as mesmas não devem entrar em contato com as paredes (para que a planta seja o mais genérica possível), pois neste caso ocorreria a condução de calor pelas mesmas e uma distribuição de temperaturas mais uniforme. Note que se quer maximizar os gradientes de temperatura devido à estrutura da planta, de modo a se poder verificar se um controlador a parâmetros distribuídos consegue reduzir satisfatoriamente estes gradientes.

Assim, foram fabricados 8 cubos de madeira de 40 mm de aresta (peça de número UT007). Tais cubos foram parafusados nas paredes da estufa por parafusos auto-atarroxantes de 5 x 30 mm através dos furos existentes nas paredes das mesmas.

Para mais detalhes sobre a instalação dos sensores e atuadores, vide desenho de montagem (UT000) no Anexo B.

IV.3. Parte Eletrônica

A parte eletrônica pode ser visualizada pelo seguinte diagrama de blocos (a ser detalhado a seguir):

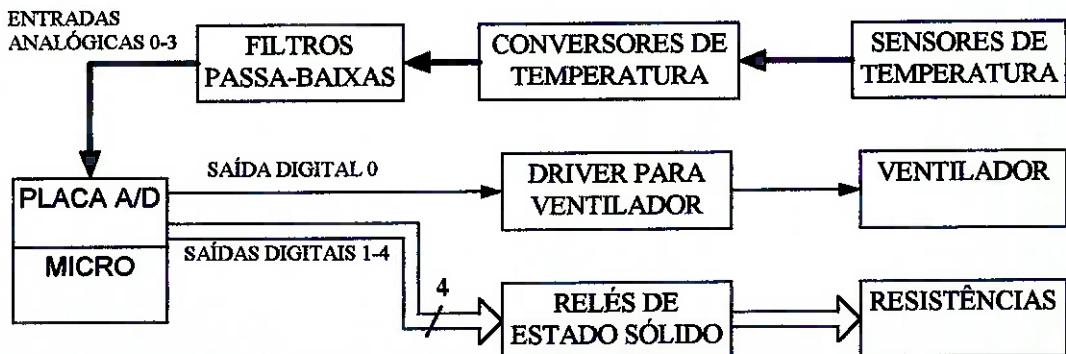


Figura IV-2: Diagrama de Blocos da Parte Eletrônica

IV.3.1. Placa de Aquisição de Dados

A placa de aquisição de dados foi definida em conjunto com outros grupos de estudantes do PET, por ser utilizada em outros experimentos que também visam equipar o laboratório de automação e controle. A placa que melhor atendeu aos requisitos do conjunto de experimentos foi a CAD 1236 fabricada pela Lynx Tecnologia Eletrônica.

A ligação com a placa A/D é feita através de conectores DB37 (entradas analógicas) e DB25 (saídas digitais).

IV.3.2. Conversores de Temperatura

Os condicionadores de sinal para os sensores foram definidos em função dos sensores utilizados (PT100) e da placa de aquisição utilizada (que recebe sinais em tensão). Foram utilizados os conversores Markare MTT-100-DIN (conversores de temperatura para PT100, entrada de 0°C a 100°C, saída de 0.0V a 10.0V, alimentação 12-24V).

Como o sinal fornecido pelos conversores não é DC (sinal de freqüência de ~9kHz cuja média, ou componente DC, é a tensão correspondente à temperatura monitorada), é necessário convertê-lo através de um filtro passa-baixas (no caso, foi usada freqüência de corte de 1Hz), para que a aquisição possa ser feita pela placa A/D:

IV.3.3. Filtros passa-baixas

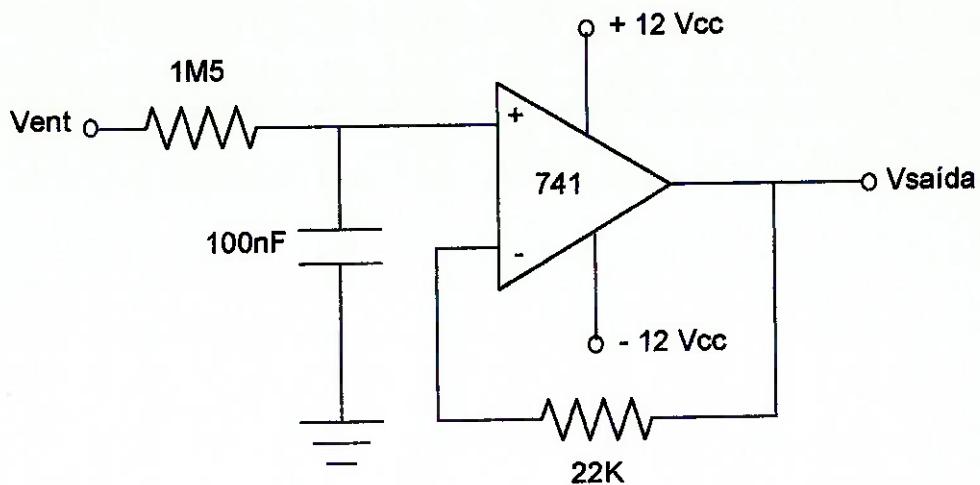


Figura IV-3: Diagrama eletrônico do Filtro Passa-Baixas

IV.3.4. Driver para ventilador

Como o circuito de saída digital da placa A/D não suporta a potência exigida para o acionamento do ventilador, é necessário utilizar-se um driver:

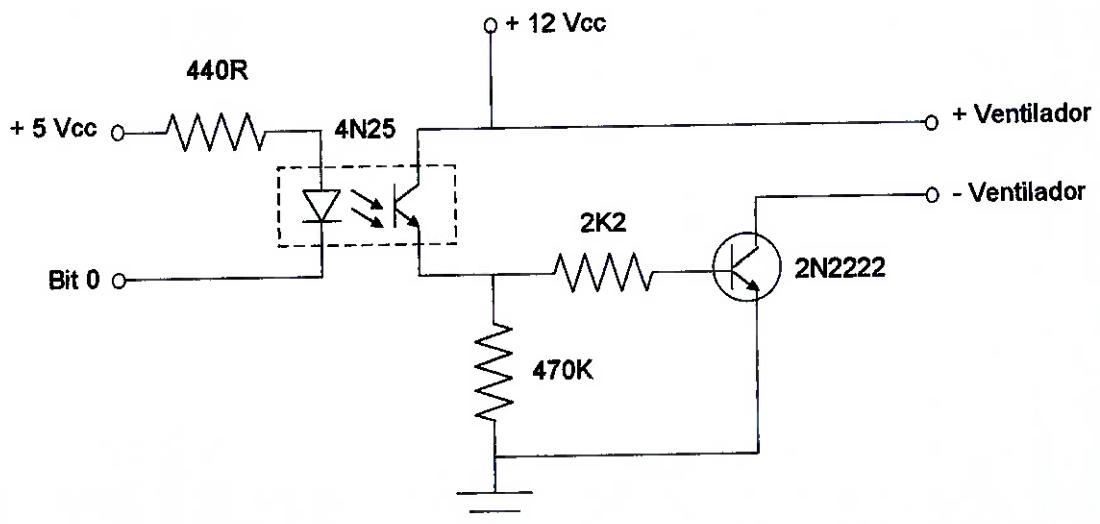


Figura IV-4: Diagrama eletrônico do Driver do Ventilador

IV.3.5. Relés de Estado Sólido

A interface de potência foi escolhida de modo a permitir que se tivesse uma atuação com ampla gama de valores sem a necessidade de se utilizar circuitos analógicos de potência, que seriam de difícil obtenção; assim, o relé de estado sólido escolhido (marca LOTI mod. D125ZXF, 10A, 250VAC), devido à grande velocidade de comutação, permite o uso de técnicas de PWM (pulse width modulation).

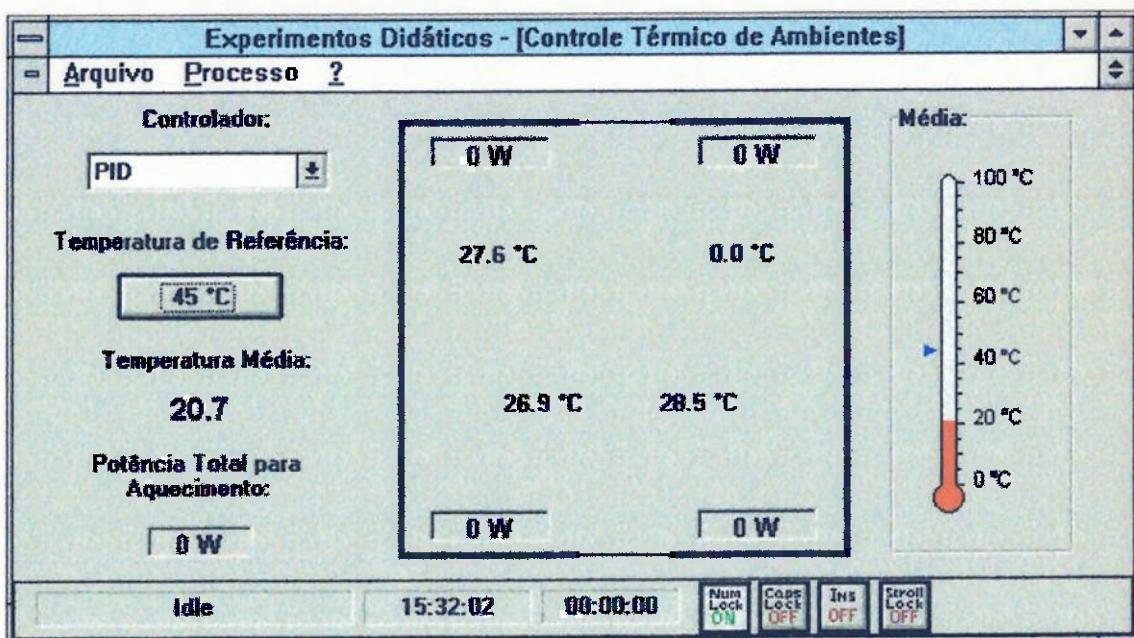
IV.4. Software de Controle e Interface Homem-máquina

Para viabilizar o controle do processo via microcomputador, foi necessária a implementação de uma aplicação de gerenciamento e interface.

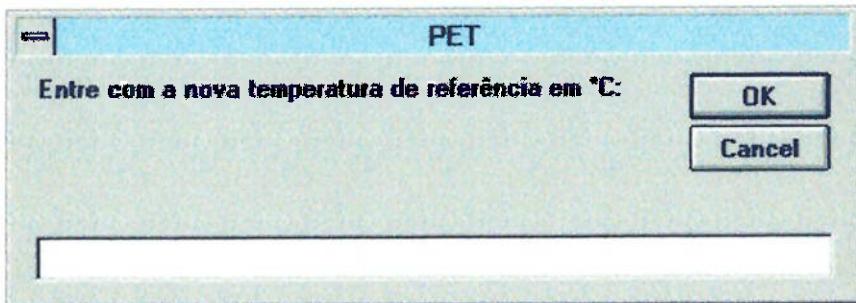
Para o interfaceamento homem-máquina, a ferramenta de programação utilizada foi o Microsoft Visual Basic V.4.0. A interface entre o microcomputador e a placa conversora A/D e D/A, que fazia a comunicação do controlador com os sensores e atuadores do sistema, foi implementada com o auxílio do Borland C++ for Windows V.4.0.

IV.4.1. Interface Homem-máquina

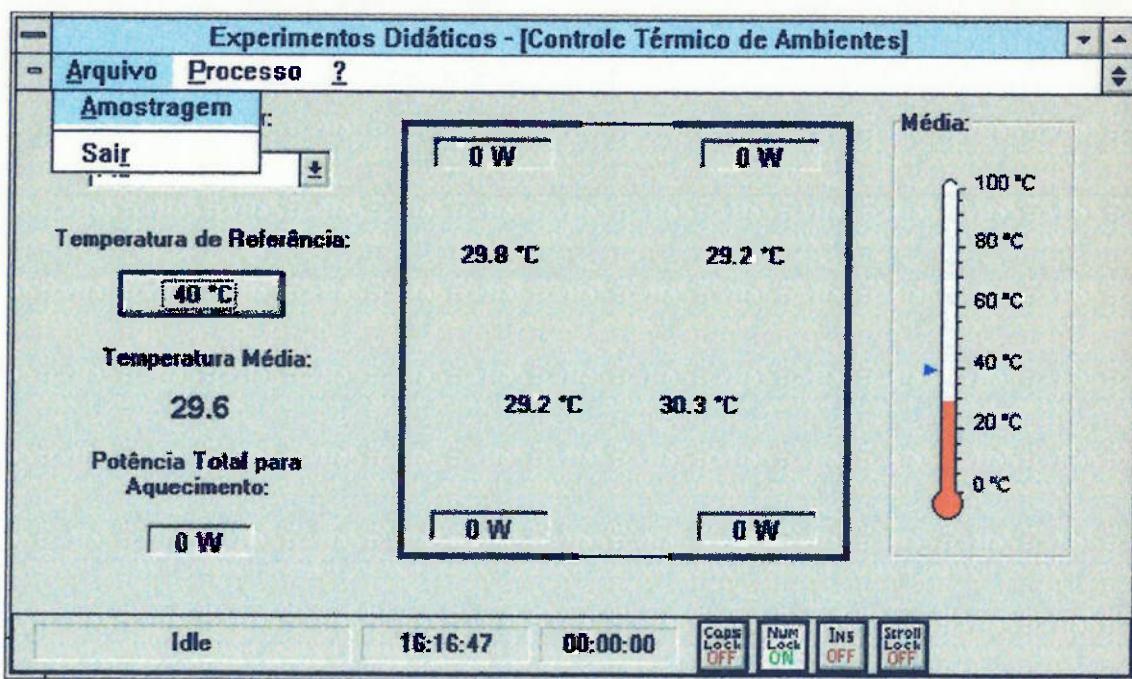
A tela principal da aplicação, vista a seguir, mostra os dados vindos dos quatro sensores de temperatura (PT100) e os sinais de comando que são enviados aos atuadores (ventilador e resistências).



Além destes dados, é possível, nesta tela, verificar o tempo decorrido do processo de controle, o estado do sistema e modificar a temperatura de referência.



Através do menu principal, é possível ter acesso a outras funções do sistema, como exemplificado a seguir:



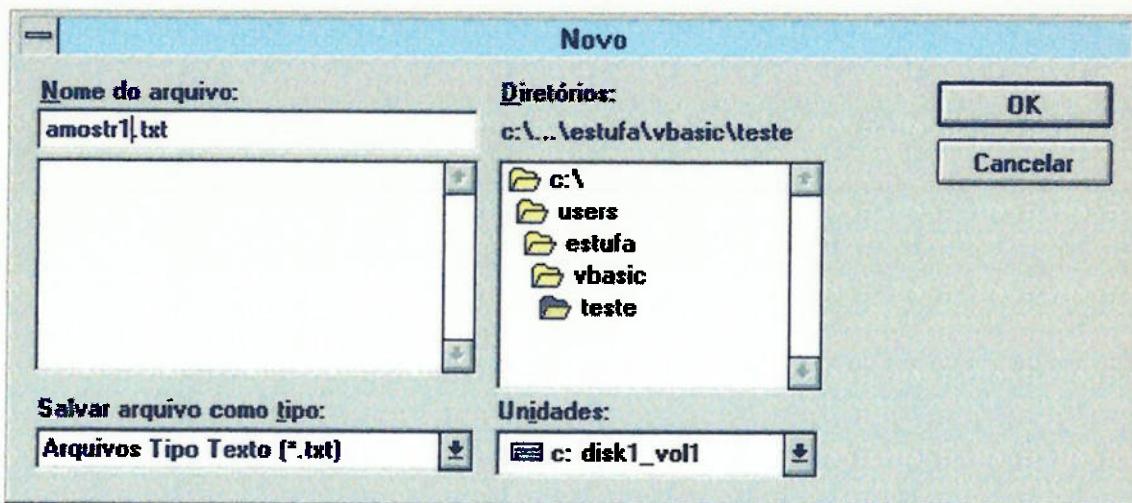
Funções do menu Arquivo:

- Amostragem: inicia um arquivo de amostragem onde todos os pontos serão armazenados de modo que possam ser exportados para um outro aplicativo qualquer - como por exemplo MatLab -, e serem tratados.

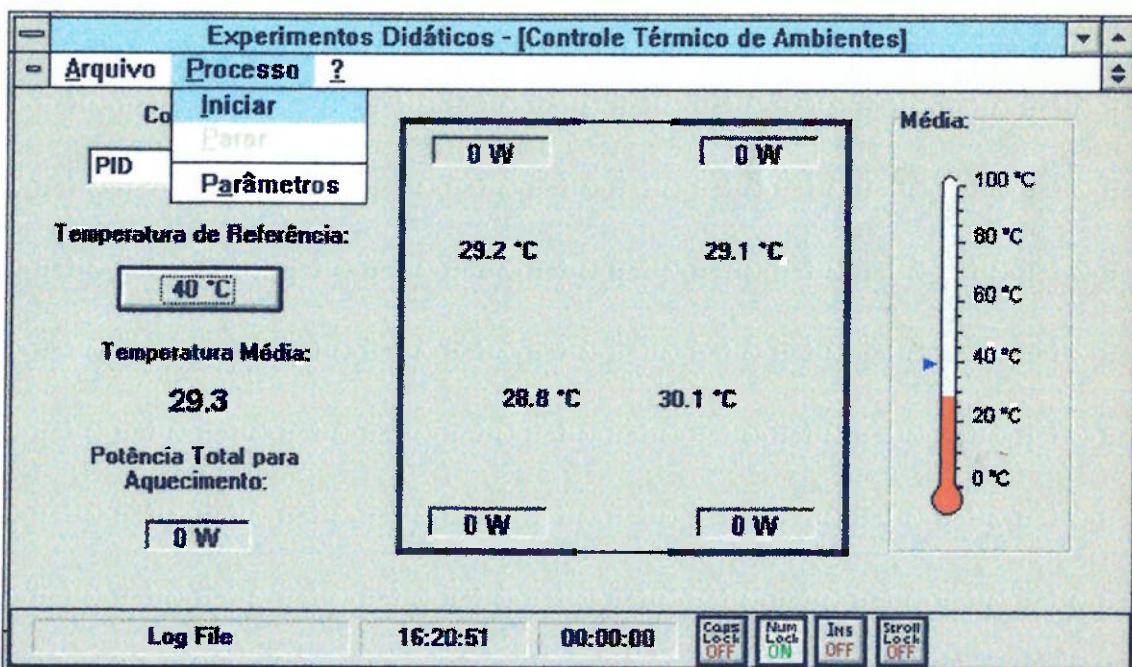
O arquivo de amostragem é um arquivo do tipo texto e tem um formato padrão.

Os dados estão dispostos em colunas com os dados a seguir:

Passo	Tempo	Temperatura de Referência	Temperatura Média	Saída do PID	Saída do PWM	Estado do ventilador
-------	-------	---------------------------	-------------------	--------------	--------------	----------------------

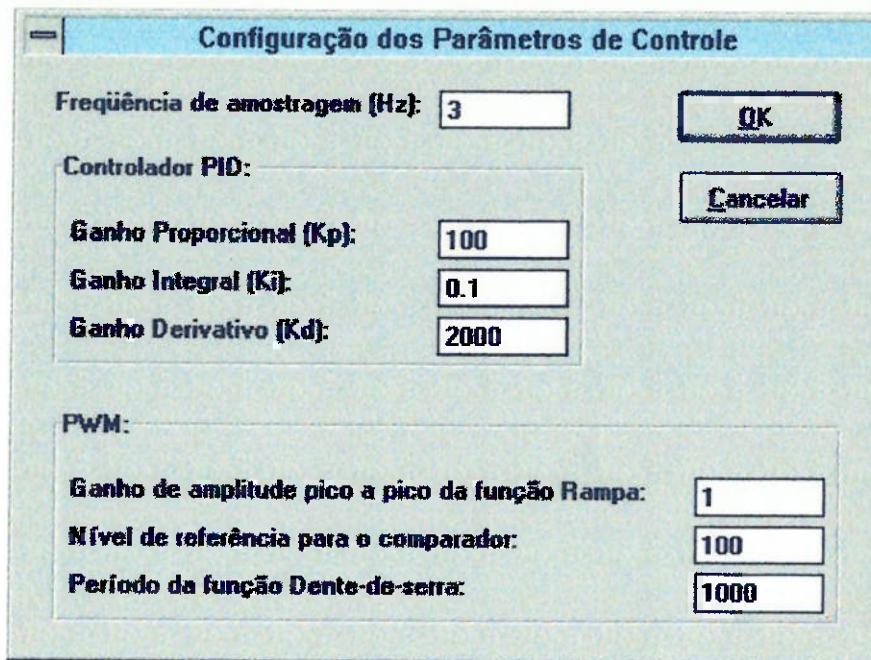


- Sair: abandona o aplicativo.

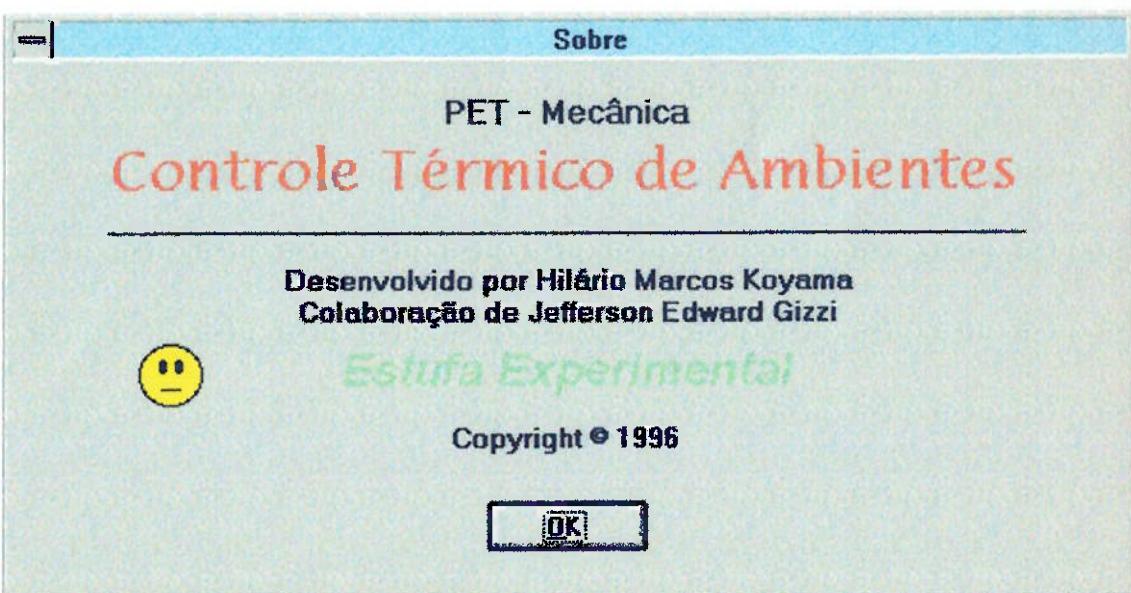
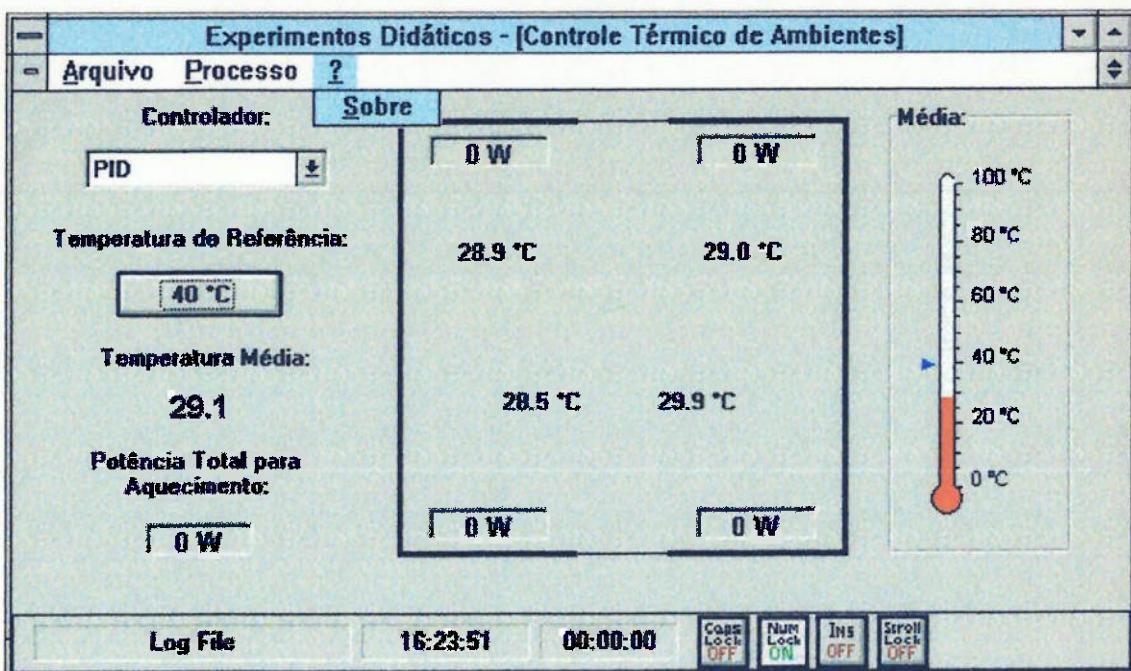


- Iniciar: inicia o processo de controle da temperatura interna.
- Parar: pára o processo de controle da temperatura interna.

- Parâmetros: permite a edição dos parâmetros tanto do controlador PID, quanto do PWM de controle da atuação das resistências.



Não existe, ainda, uma janela de ajuda para o aplicativo.



IV.4.2. Interface com o meio externo

Como foi visto, a interface do controlador com o meio externo foi implementado em linguagem C. O aplicativo Visual Basic utiliza-se das rotinas de comunicação que estão disponíveis em uma DLL (Dynamic-Link Library).

A listagem do código fonte (em Borland C++) da DLL consta dos anexos.

IV.4.3. Sistema de Controle

O controlador funciona basicamente através de um temporizador de varredura. Ou seja, fixada uma freqüência de amostragem, uma sub-rotina de controle é acionada com o período determinado por esta freqüência.

A listagem do código fonte (em Visual Basic) das rotinas de controle encontram-se em anexo.

IV.5. Lista de Materiais

Para a implementação física da estufa, são necessários os seguintes itens:

a) Parte Estrutural (vide desenhos de fabricação e montagem nos Anexos B e C):

- 1 Parede Principal UT001;
- 1 Parede Lateral Anterior UT002;
- 1 Parede Lateral Posterior UT003;
- 1 Chicana Principal UT004;
- 2 Chicanas Laterais UT005;
- 14 Suportes para as Chicanas UT006;
- 8 Suportes para as Resistências UT007;
- 1 Tampa UT008;

- 4 Pezinhos UT009;
- 50 Parafusos M3x10 cabeça philips abaulada;
- 4 Parafusos M3x15 cabeça philips escareada;
- 108 Porcas M3;
- 54 Arruelas para parafuso M3;
- 12 Parafusos M3x20 cabeça philips abaulada;
- 16 Parafusos auto-atarraxantes de 5x30 mm, cabeça sextavada;

b) Sensores e Atuadores:

- 1 Ventilador DC Brushless, ϕ 75 mm, 12 V, 220 mA;

(exemplo: ventilador para fonte de micro computador DFB0812H da Delta Electronic
Ind. Co. Ltd.)

- 1 Grade para o Ventilador acima;
- 4 Resistências Elétricas Dennex BCAF-310 de 220VAC, 300W;
- 4 Sensores de temperatura PT100 de três fios.

c) Parte Eletrônica (ver diagramas no tópico anterior, tratando desta parte):

- 4 relés de estado sólido alimentação TTL (5V, 9mA), carga 220V, 10A;

(exemplo: relé de estado sólido LOTI mod. D125ZXF)

- 4 condicionadores de sinal para PT100: termotransmissores com saída em tensão de 0 a 10V;

(exemplo: conversor de temperatura Markare MTT-100-DIN)

- 4 filtros passa-baixa de freqüência de corte 0.1 Hz, ganho unitário:

- χ 1 placa de circuito impresso universal;
- χ 4 amplificadores operacionais 741;
- χ 4 resistores de $1,5M\Omega \pm 10\%$ x 0,25W;
- χ 4 resistores de $22K\Omega \pm 10\%$ x 0,25W;
- χ 4 capacitores de poliéster de $100nF \pm 20\%$.
- 1 circuito de driver para o ventilador, alimentação TTL, carga 12V, 1A;
 - χ 1 placa de circuito impresso para circuito integrado de 16 pinos;
 - χ 1 acoplador óptico 4N25;
 - χ 1 transístor 2N2222;
 - χ 1 resistor de $440\Omega \pm 10\%$ x 0,25W;
 - χ 1 resistor de $2,2K\Omega \pm 10\%$ x 0,25W;
 - χ 1 resistor de $470K\Omega \pm 10\%$ x 0,25W.
- 1 placa de aquisição de dados Lynx CAD1236 de 60kHz, 12 bits, 16 entradas analógicas simples (8 diferenciais) e 16 entradas/saídas digitais;
- 20m de cabos coaxial para microfone;
- 15m de duplo cabo de força 250VAC, 10A;
- 1 plug para tomada doméstico;
- 1 Conector DB37 macho;
- 1 Conector DB25 macho;
- 1 Conector DB25 fêmea;
- 2 Conectores RCA machos de cor preta;
- 1 Conector RCA macho de cor vermelha;
- 1 par de Conectores RCA fêmeas de cores preta e vermelha;

- 1 Conector RCA fêmea de cor preta;
- 50 Terminais olhal $\phi 6,0$ mm;
- 100 Terminais olhal $\phi 3,0$ mm;
- 1 Microcomputador padrão PC 386 ou superior;

c) Software:

- Sistema Operacional Windows versão 3.1 ou mais recente;
- Software de controle e interface com o usuário “Unidade Térmica”.

V. RESULTADOS

V.1. Resultados Obtidos

O processo controlado foi amostrado em arquivos de dados conforme descrito no item Software de Controle e Interface Homem-máquina. Os resultados obtidos podem ser visualizados nos gráficos a seguir.

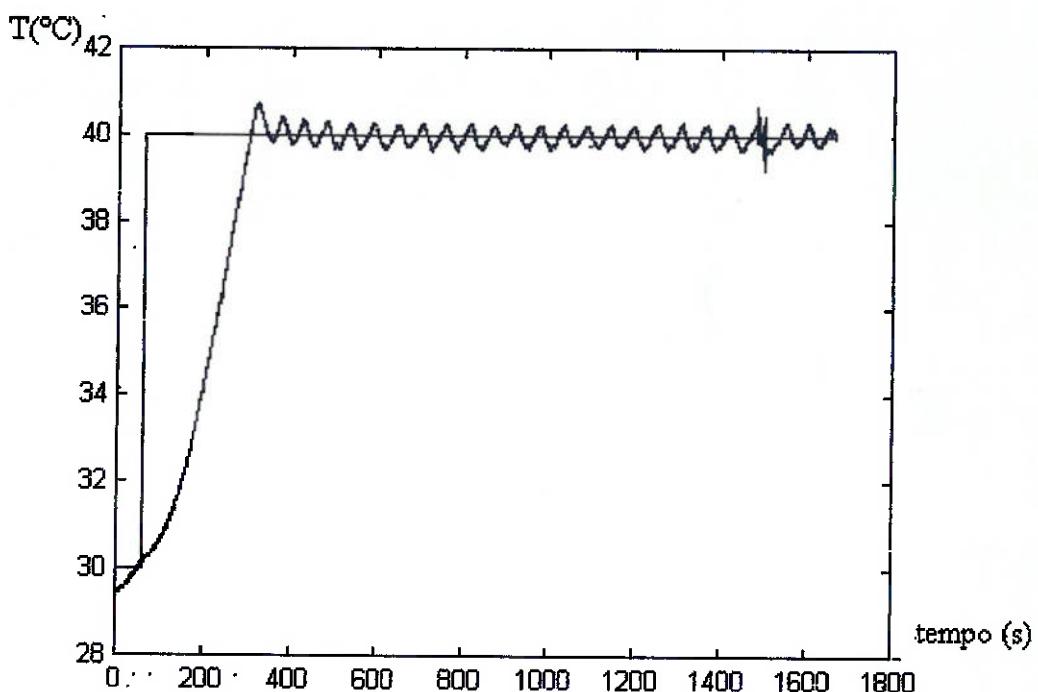


Figura V-1: Aquecimento para degrau na temperatura de referência.

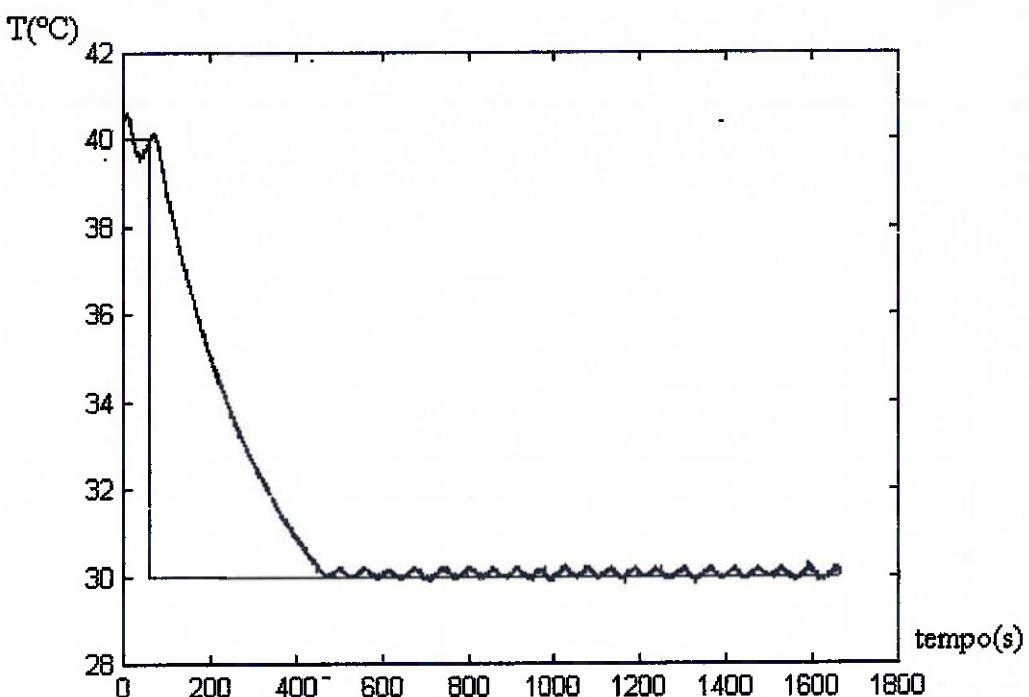


Figura V-2: Resfriamento para degrau na temperatura de referência.

V.2. Análise dos Resultados

Quanto ao desenrolar do processo apresentado, nota-se que em regime (*Steady-state*) permanece uma pequena oscilação na temperatura média controlada da estufa. Esta oscilação gira em torno de 0,2 °C e é devida a três fatores:

1. O caráter on/off do controlador que considera separadamente aquecimento e resfriamento.
2. A zona morta de 0,1 °C entre o acionamento de um ou outro atuador dentro da parte on/off do controlador.
3. O uso de um PWM para modular a saída do controlador PID das resistências elétricas.

Neste contexto, pode-se considerar os resultados bastante satisfatórios se levarmos em consideração o caráter didático do experimento. Ou seja, a sintonia dos controladores (PID e PWM) pelos alunos de laboratório e a análise da planta poderão levá-los a conclusões importantes a respeito do sistema baseados na teoria de controle.

VI. ABORDAGENS FUTURAS

VI.1. Modelo a parâmetros distribuídos

VI.1.1. Introdução

A idéia de controle de temperatura distribuído surge quando se tem em mente grandes sistemas de controle térmico, como por exemplo sistemas de ar-condicionado de grandes edifícios.

O que se deseja é que não mais seja controlada apenas uma temperatura média, mas a temperatura ponto a ponto de modo a minimizar os gradientes de temperatura dentro do recinto.

É importante observar a importância dos pontos em que são tomadas as temperaturas (pontos de sensoreamento) e os locais onde são colocados os atuadores. Tais locais devem ser determinados pela modelagem, de modo a otimizar fatores como mínimos gradientes de temperatura, consumo mínimo de potência pelos atuadores, estabilidade do sistema, ou outros que se julgar necessários - Controle Ótimo.

A seguir será apresentada uma das pesquisas que podem ser feitas neste sentido. Os procedimentos incluem a utilização de algum software de elementos finitos e a aplicação da Teoria de Controle Moderno com múltiplas entradas e múltiplas saídas (sistema MIMO - multiple input, multiple output) e variáveis de estado.

VI.1.2. Modelagem do Problema Térmico

A 1^a Lei da Termodinâmica para um volume de controle diferencial é da forma:

$$\rho \cdot C \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{V\}^T \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot \{q\} = q'' \quad , \text{ ou}$$

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot C \cdot \{Vx \quad Vy \quad Vz\} \cdot \begin{bmatrix} \partial / \partial x \\ \partial / \partial y \\ \partial / \partial z \end{bmatrix} \cdot T + \{\partial / \partial x \quad \partial / \partial y \quad \partial / \partial z\} \cdot \begin{bmatrix} qx \\ qy \\ qz \end{bmatrix} = q'' \quad (I)$$

onde

$$T = T(x, y, z, t) \quad = \text{temperatura no volume de controle.}$$

$$\{V\} = \begin{bmatrix} Vx \\ Vy \\ Vz \end{bmatrix} \quad = \text{vetor de velocidades para transferência de calor por transporte de massa.}$$

$$\{q\} = \begin{bmatrix} qx \\ qy \\ qz \end{bmatrix} \quad = \text{vetor dos fluxos de calor.}$$

$$q'' \quad = \text{taxa volumétrica de geração de calor.}$$

$$\begin{bmatrix} \partial / \partial x \\ \partial / \partial y \\ \partial / \partial z \end{bmatrix} = L = \nabla \quad = \text{vetor gradiente.}$$

$$\{\partial / \partial x \quad \partial / \partial y \quad \partial / \partial z\} = L^T = \nabla \cdot \quad = \text{divergente.}$$

A Lei da Condução (Lei de Fourier), relaciona o fluxo de calor ao gradiente térmico:

$$\begin{bmatrix} qx \\ qy \\ qz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \partial / \partial x \\ \partial / \partial y \\ \partial / \partial z \end{bmatrix} \cdot T$$

$$\text{ou } \{q\} = -[D] \cdot \{L\} T = -[D] \cdot \nabla T, \text{ onde} \quad (II)$$

$[D] = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix}$ é a matriz de condutividade térmica,

e k_{xx} , k_{yy} e k_{zz} são as condutividades térmicas nas direções x, y e z respectivamente do elemento.

Combinando as equações decorrentes dos 2 princípios citados acima, temos:

$$\rho \cdot C \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial} + \{V\}^T \cdot \{L\} \cdot T \right) = \{L\}^T ([D] \{L\} T) + q''' \quad (\text{III})$$

ou $\rho \cdot C \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial} + \{V\}^T \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot ([D] \cdot \nabla T) + q'''$

ou, expandindo:

$$\rho \cdot C \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial} + V_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q''' + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Condições de contorno nos elementos:

1. Temperatura especificada em uma superfície do elemento $T = T^*$.
2. Fluxo de calor especificado atuando em um superfície do elemento

$$\{q\} \{T\} \{\eta\} = -q^* \text{ ou } \{q_x \quad q_y \quad q_z\} \begin{Bmatrix} \eta_x \\ \eta_y \\ \eta_z \end{Bmatrix} = -q^*, \text{ onde aplicando a eq. (II),}$$

$$\{\eta\} T [D] \{L\} T = q^*, \text{ onde} \quad (\text{IV})$$

$\{\eta\}$ é o versor normal à superfície considerada

e q^* é o fluxo de calor especificado.

3. Convecções especificadas atuando sobre uma superfície do elemento, segundo a lei do resfriamento de Newton:

$\{q\}'\{T\}\{\eta\} = -hf(T_B - T)$, onde hf é o coeficiente de transferência de calor por convecção (coeficiente de película), e T_B é a temperatura do fluido adjacente.

Aplicando a eq. (II), temos:

$$\{\eta\}^T [D]\{L\}T = hf \cdot (T_B - T) \quad (V)$$

Pré-multiplicando a eq. (III) por uma mudança virtual de temperatur (ST), integrando sobre o volume do elemento, chega-se a:

$$\begin{aligned} & \int_{Vol} \left[\rho \cdot C \cdot \delta T \left(\partial T / \partial x + \{V\}^T \{L\}T \right) + \{L\}^T \cdot \delta T \cdot [D]\{L\}T \right] dVol = \\ & = \int_{Si} \delta T \cdot q^* \cdot dSi + \int_{Sj} \delta T \cdot hf \cdot (T_B - T) dSj + \int_{Vol} \delta T \cdot q''' dVol = \end{aligned} \quad (VI)$$

Como descrito acima, T varia com o espaço e tempo. Usando a idéia de superposição, as variáveis podem ser separadas por:

$$T = \{N\}^T \{Te(t)\}$$

Derivando, temos:

$$T = \frac{\partial T}{\partial x} = \{N\}^T \{Te'\} \quad (VII)$$

$$\partial T \text{ tem a mesma forma de } T: \partial T = \{\partial Te\}^T \{N\} \quad (VIII)$$

A combinação $\{L\}T$, da eq. (VI), pode ser escrita como:

$$\{L\}T = \{L\}\{N\}^T \{Te\} \text{ ou}$$

$$\{L\}T = [B]\{Te\}, \text{ onde} \quad (IX)$$

$$[B] = \{L\}\{N\}^T = \nabla \cdot \{N\}^T$$

2x4 2x1 1x4

Substituindo as eqs. (VII) a (IX) na eq. (VI), temos:

$$\int_{Vol} \rho \cdot C \{Te\}^T \{N\} \{N\}^T \{Te\} dVol + \int_{Vol} \rho \cdot C \{Te\}^T \{N\} \{V\}^T [B] \{Te\} dVol + \\ + \int_{Vol} \{\delta Te\}^T [B]^T [D][B] \{Te\} dVol = \int_{Vol} \{\delta Te\}^T \{N\} q^* ds + \int_{Si} \{\delta Te\}^T \{N\} hf \left(T_B - \{N\}^T \{Te\} \right) dSi + \\ + \int_{Vol} \{\delta Te\}^T \{N\} q''' dVol$$

ρ é assumido constante ao longo do elemento. Por sua vez, C e q podem variar ao longo do elemento. Por fim, $\{Te\}$, $\{Te'\}$ e $\{\delta Te\}$ são quantidades nodais, não variam ao longo do elemento, e portanto podem ser removidos das integrais. Nota-se que todos os termos da equação acima estão multiplicados por $\{\delta T\}$, que pode ser então cancelada. A equação (X) pode ser então reescrita como:

$$[Ce'] \cdot \{Te'\} + ([ke^{tm}] + [ke^{tb}] + [ke^{tc}]) \cdot \{Te\} = \{Qe\} + \{Qe^c\} + \{Qc^s\} \quad (XI)$$

onde

$$[Ce'] = \rho \int_{Vol} c \{N\} \{N\}^T dVol \quad = \text{matriz de calor específico do elemento.}$$

$$[ke^{tm}] = \rho \int_{Vol} c \{N\} \{V\}^T [B] dVol \quad = \text{matriz de condutividade devido ao transporte de massa.}$$

$$[ke^{tb}] = \int_{Vol} [B]^T [D][B] dVol \quad = \text{matriz de condutividade propriamente dita.}$$

$$[ke^{tc}] = \int_S hf \{N\} \{N\}^T dS \quad = \text{matriz de condutividade devido à convecção.}$$

$$\{Qe^f\} = \int_{S2} \{N\} q^* dS \quad = \text{vetor de carga aplicada através de fluxo de calor especificado.}$$

$$\{Qe^c\} = \int_{S3} T_B \cdot hf \cdot \{N\} dS \quad = \text{vetor de carga aplicada através de convecção especificada.}$$

$$\{Qe^g\} = \int_{Vol} q''' \{N\} dVol = \text{vetor de carga aplicada através de geração volumétrica de calor.}$$

Observações:

- $[kc^t]$ na verdade, é diagonal, com os elementos de sua diagonal principal iguais aos elementos das linhas correspondentes do vetor $\int_S hf \{N\} dS$.
- $[Ce^t]$ é diagonalizada para cada elemento.
- Pode ser utilizado um valor de C constante, desta forma C sai da integral na equação (XI).

Desta forma, chega-se à equação típica de um sistema de primeira ordem que pode ser utilizado para controle por variáveis de estado:

$$\dot{\{x\}} = [A]\{x\} + [B]\{u\}$$

onde a variável a ser controlada x é a temperatura no elemento.

VI.1.3. Utilização de Software de Elementos Finitos

Para a abordagem realizada neste trabalho, utilizou-se o software ANSYS V.5.1 para a análise por elementos finitos. Foi construído o seguinte modelo (considerado "real", como pode ser visto nas definições a seguir):

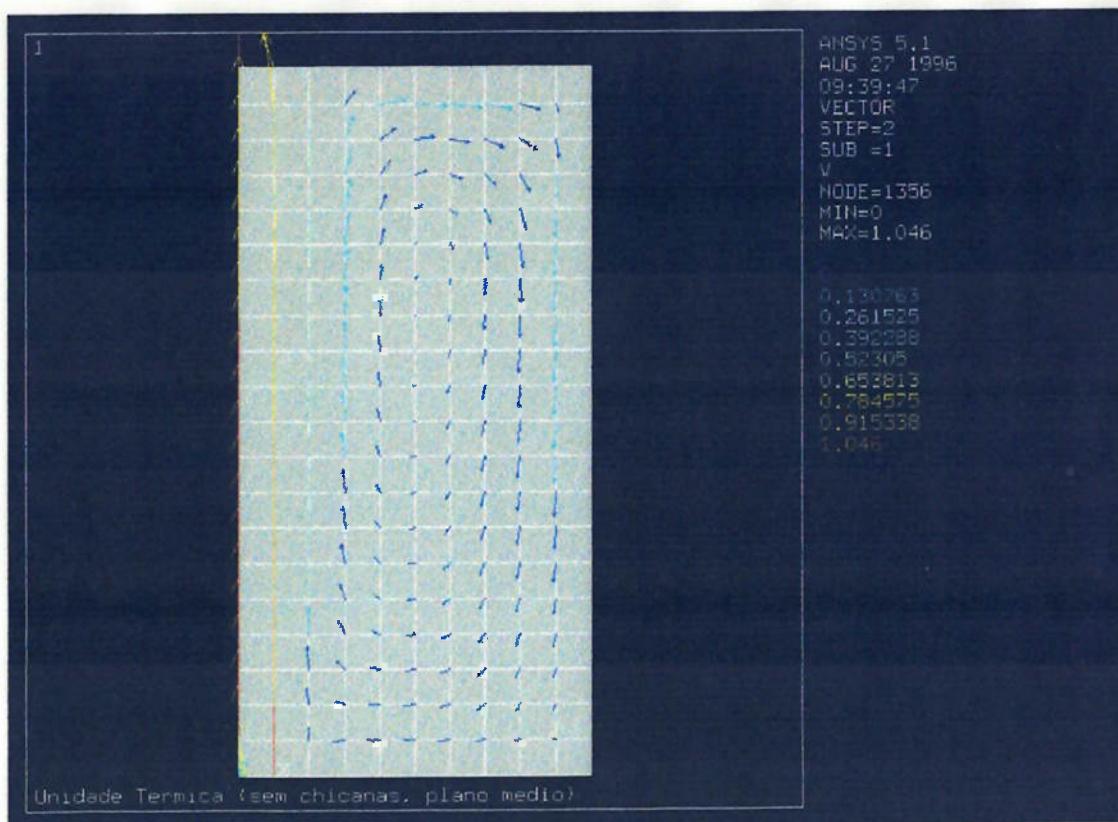


Figura VI-1: Escoamento de ar em modelo de meia-estufa

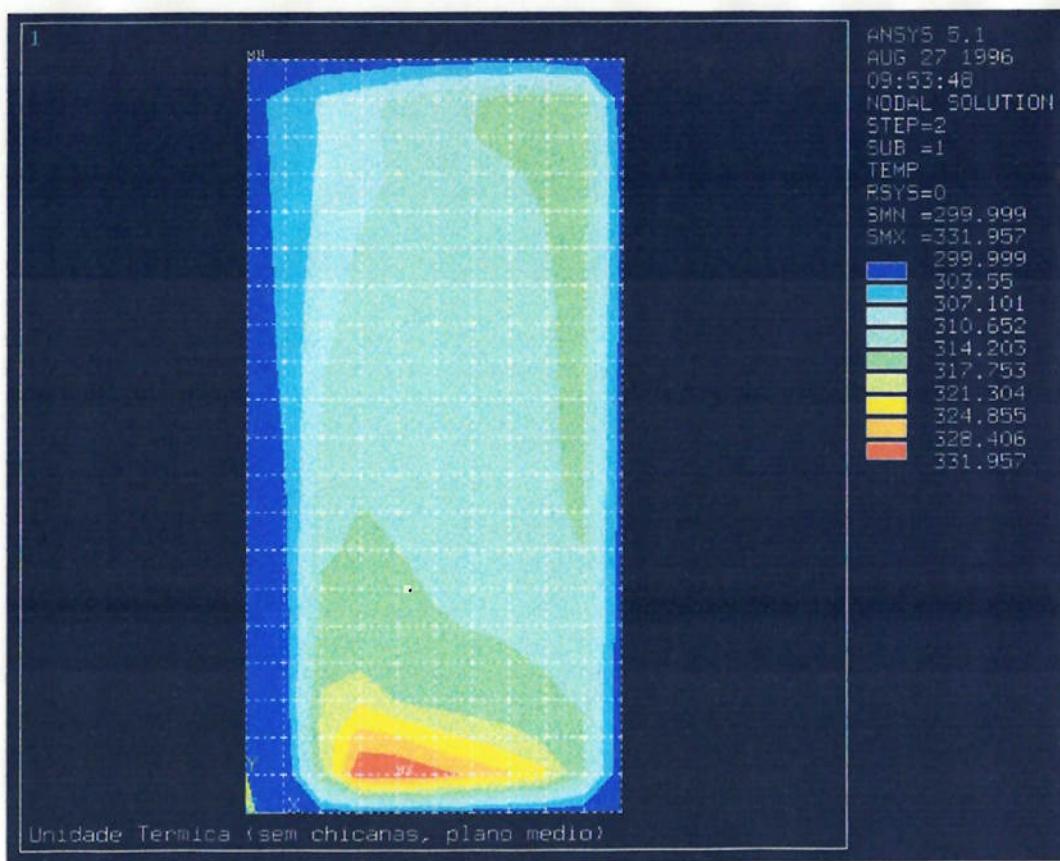


Figura VI-2: Distribuição de temperaturas em modelo de meia-estufa

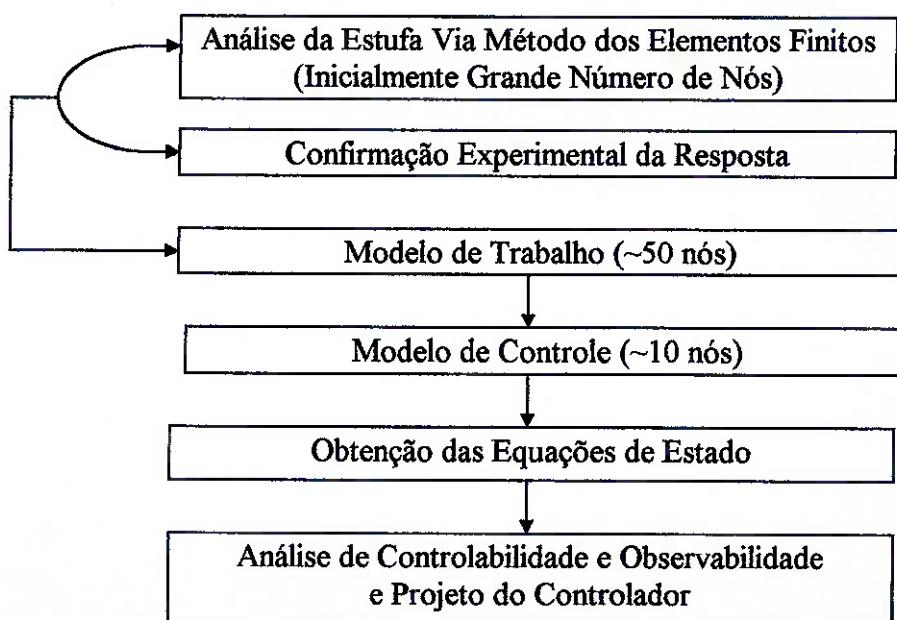
A idéia básica é a contrução de três modelos:

1. Modelo real: um modelo que represente o sistema da maneira mais fiel possível, considerando, é claro, até que ponto é necessário um refinamento muito acentuado. Para este modelo, uma estimativa inicial seria em torno de 200 nós (ou elementos).
2. Modelo de trabalho: devido à dificuldade de lidar com este modelo muito grande em softwares de análise (como por exemplo o MATLAB) seria necessário reduzir o sistema utilizando técnicas de Análise Modal. Por exemplo, pode-se escolher os modos de resposta mais lentos ou de amplitude maior, escolhendo-se adequadamente os autovalores das matrizes do sistema. Este modelo de simulação pode ter em torno de 50 nós e será utilizado nas simulações no MATLAB.

3. Modelo de controle: reduzindo o sistema para em torno de 10 variáveis de estado, o controle se torna possível. Com estas novas matrizes é preciso verificar o sistema quanto à Observabilidade e Controlabilidade.

VI.2. Controlador de Estados

Como visto, uma das possíveis abordagens para se fazer o controle da temperatura no interior da unidade térmica considerando-se inclusive os gradientes de temperatura, é considerar a estufa como um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), modelando-o segundo variáveis de estado. Aplicam-se então as técnicas de Controle Moderno (análise de observabilidade e controlabilidade, realimentação de estados) de modo a se projetar um controlador que minimize tais gradientes. Isto pode ser feito aplicando-se a seguinte metodologia:



**Figura VI-3: Metodologia para Obtenção de Controlador de Estados
via Método dos Elementos Finitos**

O modelo por elementos finitos é obtido conforme visto no item anterior; então, o próprio software de elementos finitos fornece as matrizes (A, B e C) que representam o sistema:

$$\begin{cases} \dot{\underline{X}} = \underline{\underline{A}}\underline{X} + \underline{\underline{B}}\underline{U} \\ \underline{Y} = \underline{\underline{C}}\underline{X} \end{cases}$$

Onde \underline{X} é o vetor de estados do sistema, \underline{Y} é o vetor de saídas do sistema (definido, enquanto modelo, no processo de subestruturação, e no sistema físico, pela quantidade e posicionamento dos sensores), \underline{U} é o vetor de entradas do sistema (definido pelos atuadores), $\underline{\underline{A}}$ é a matriz dinâmica, $\underline{\underline{B}}$ é a matriz de controle e $\underline{\underline{C}}$ é a matriz de observação do sistema.

Para se obter tais matrizes, que definem as equações de estado, é utilizado o processo de subestruturação, conforme visto no item anterior.

Durante o presente trabalho, foram estudados diversos softwares de elementos finitos (Ansys, Algor, Flotran, Cosmos/M), visando selecionar um que permitisse modelar conjuntamente fenômenos de troca de calor e escoamento de fluido, bem como fluxos de entalpia devido ao último. Dentre os softwares citados, o único capaz de fazer tal análise é o Flotran (módulo do Ansys), que foi então utilizado para se fazer o modelo do sistema.

O modelo foi gerado no Flotran e então estudado, simulando-se o comportamento do sistema para diversas situações. Porém, não foi possível extrair as matrizes representativas do sistema, pois o Flotran, ao contrário dos outros módulos do Ansys, não é capaz de realizar a subestruturação. Tal fato ocorre devido às referidas

matrizes serem variantes no tempo, sendo calculadas pelo software, a cada passo da simulação, segundo duas etapas:

- Resolução das equações de escoamento para o dado instante do tempo;
- A partir do resultado acima, são geradas as matrizes que permitem resolver as trocas de calor (e fluxos de entalpia) naquele instante do tempo.

Note que o fato de não poder ser gerada uma matriz dinâmica para o sistema, na forma de variáveis de estado, não é um erro do programa utilizado, mas inerente à própria natureza do fenômeno de ventilação, que possui uma não linearidade (produto de um estado pela entrada):

O calor trocado num intervalo dt , por um fluxo de ar a uma temperatura T_a , para um recipiente a temperatura T é igual à massa de ar trocada multiplicada pelo seu calor específico, multiplicado pela diferença de temperaturas:

$$\dot{Q}.dt = dm.c.(T_a - T) \Rightarrow \dot{Q}.dt = \rho.c.(T_a - T).dV \Rightarrow \dot{Q} = \rho.c.(T_a - T) \cdot \frac{dV}{dt}$$

Porém, a temperatura T é a variável de estado x , e dV/dt é a entrada u (vazão do ventilador). Chamando C a capacidade térmica do elemento e V o seu volume, temos:

$$C.\dot{T} = \rho.c.(T_a - T) \cdot \frac{dV}{dt} \Rightarrow \dot{x} = \frac{\rho.c}{C} \cdot (T_a - x) \cdot u \Rightarrow \dot{x} = \frac{T_a}{V} \cdot u - \frac{1}{V} \cdot x \cdot u$$

Assim, tem-se na equação de estados o produto da variável de estado pela entrada, que foge do modelo linear de estados ($\begin{cases} \dot{X} = \underline{\underline{A}}X + \underline{\underline{B}}U \\ Y = \underline{\underline{C}}X \end{cases}$).

Sem uma matriz \underline{A} (nem \underline{B}) que fosse representativa do sistema, é inviável se obter o controlador de estados. Partiu-se então para uma nova abordagem, visando obter as matrizes do sistema, ainda que para um modelo mais simplificado do mesmo.

Passou-se então a utilizar-se o módulo térmico comum do Ansys, o que permitiu gerar um modelo aproximado válido apenas para o aquecimento da estufa (o que já é considerável, já que é a situação de regime da mesma), sem escoamento de ar em seu interior.

Assim, foi gerado um novo modelo no Ansys, inclusive com confirmação experimental da resposta (visto que, a esta altura, o protótipo do experimento estava completamente terminado e funcional, pois se tratava já do último mês de trabalho). Procedeu-se então à subestruturação deste modelo. Porém, novamente não foi possível de se extrair as matrizes representativas do sistema, desta vez por problemas com o software. A cópia utilizada do programa apresentava uma série de problemas, não estando completa, e as funções relacionadas à extração das matrizes estavam ausentes, não sendo reconhecidas pelo programa.

Não foi possível obter acesso a outra cópia do Ansys, nem recomeçar as modelagens com outro programa de elementos finitos (o que exigiria o estudo aprofundado dos mesmos, como havia sido feito com o Ansys), devido à proximidade do prazo final de conclusão do presente trabalho. Além disso, tal abordagem do trabalho (Projeto de Controlador de Estados com Auxílio de Elementos Finitos) estava além do escopo de um trabalho de graduação, conforme exposto na apresentação parcial do projeto (1º semestre).

Todavia, como se notou que a última abordagem era viável (só tendo sido impossibilitada por problemas no software), optou-se por desenvolver no presente trabalho toda a metodologia que deve ser seguida para o prosseguimento da mesma, bem como a exposição da teoria relacionada. Assim, pode-se utilizar este trabalho como base para pesquisas a nível de pós-graduação ou mesmo para trabalhos de graduação em anos posteriores. Segue então o desenvolvimento dos passos necessários à obtenção do Controlador de Estados.

VI.2.1. Análise de Controlabilidade

A análise de controlabilidade visa determinar se as entradas afetam todas as variáveis de estado.

A matriz de Controlabilidade é definida como:

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} \underline{B} & \underline{AB} & \underline{A^2B} & \dots & \underline{A^{N-1}B} \end{bmatrix}$$

onde N é a ordem de A.

O sistema é controlável se o posto de \underline{C} é N. Os atuadores devem ser selecionados de modo que o sistema seja controlável.

VI.2.2. Análise de Observabilidade

A análise de observabilidade visa determinar se as saídas reproduzem todas as variáveis de estado.

A matriz de Observabilidade é definida como:

$$\underline{0} = \begin{bmatrix} \underline{C}^T & \underline{A}^T \underline{C}^T & (\underline{A}^T)^2 \underline{C}^T & \dots & (\underline{A}^T)^{N-1} \underline{C}^T \end{bmatrix}$$

onde N é a ordem de A .

O sistema é observável se o posto de $\underline{0}$ é N . Os sensores devem ser selecionados de modo que o sistema seja observável. Assim, pode-se projetar um observador de estados que gere \underline{X} a partir de \underline{Y} , o que permitirá fazer a realimentação de estados (ver “Projeto do Controlador” a seguir).

VI.2.3. Controlabilidade e Observabilidade do Sistema Real

Note que os conceitos de Controlabilidade e Observabilidade referem-se apenas ao modelo matemático em questão, e não ao sistema físico real, que sempre tem parcelas não controláveis e não observáveis:

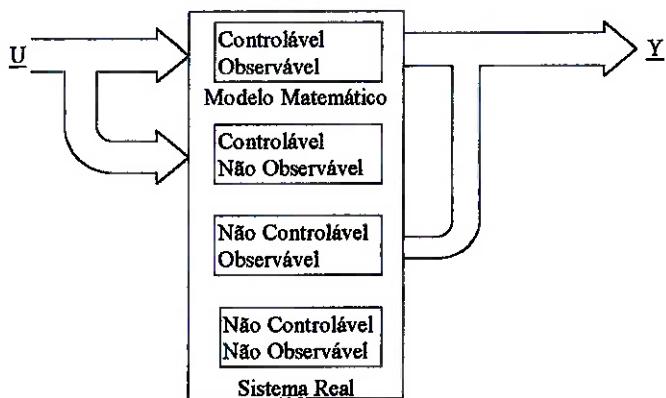


Figura VI-4: Controlabilidade e Observabilidade de um Sistema Real

Isto significa que sempre há estados não modelados, ou sobre os quais não se pode atuar, influenciando nas variáveis medidas; além disso, sempre se está atuando sobre estados não modelados ou que não podem ser medidos.

VI.2.4. Projeto do Controlador (Caso para Controle Ótimo)

Obtidas as matrizes que definem o sistema, bem como sua controlabilidade e observabilidade, pode-se então fazer o projeto do controlador de estados, o que pode ser feito por vários métodos, como Alocação de Pólos (que são os autovalores de $\underline{\underline{A}}$) ou pelo Controlador Linear Quadrático (Controle Ótimo).

Para o caso do Controlador Linear Quadrático, quer-se minimizar a função IP , que representa a ponderação entre os erros dos diversos estados e os valores da atuação (índice de otimização do sistema), sendo definida da seguinte forma:

$$IP = \int_0^{\infty} (\underline{\underline{X}}^T \underline{\underline{Q}} \underline{\underline{X}} + \underline{\underline{U}}^T \underline{\underline{R}} \underline{\underline{U}}) dt$$

Onde $\underline{\underline{Q}}$ pondera os erros dos estados e $\underline{\underline{R}}$, as atuações.

Quer-se obter a matriz de realimentação de estados $\underline{\underline{K}}$ (de modo a obter a atuação $\underline{\underline{U}} = -\underline{\underline{K}} \underline{\underline{X}}$) que minimize IP , que é obtida a partir da solução da equação de Riccati:

$$\begin{cases} \underline{\underline{K}} = \underline{\underline{B}} \underline{\underline{R}}^{-1} \underline{\underline{P}} \\ \underline{\underline{P}} \underline{\underline{A}} + \underline{\underline{A}}^T \underline{\underline{P}} + \underline{\underline{Q}} - \underline{\underline{P}} \underline{\underline{B}} \underline{\underline{R}}^{-1} \underline{\underline{B}} \underline{\underline{P}} = \underline{\underline{0}} \end{cases}$$

Definido $\underline{\underline{K}}$ e o observador de estados, pode-se então determinar as atuações $\underline{\underline{U}}$ a partir das leitura $\underline{\underline{Y}}$ dos sensores (sendo este cálculo feito pelo software de controle), o que permite fechar a malha de controle do sistema.

VI.3. Propostas Futuras

O presente trabalho não é uma proposta “fechada”. Pelo contrário: conforme exposto nos objetivos do mesmo, é uma rica fonte de projetos e trabalhos de pesquisa, devido à sua grande versatilidade e também devido ao fato de ser “tão complexo quanto se queira” pois, como visto, permite tanto obter um controlador por métodos clássicos, considerando temperatura uniforme (parâmetros concentrados), como por controle moderno, considerando gradientes de temperatura (parâmetros distribuídos), incluindo modelagem por elementos finitos, e ainda mais, como será exposto a seguir.

Abordagens futuras de “Controle Térmico de Ambientes”, além do uso da estufa como experimento didático para auxílio do ensino do controle clássico em um laboratório de controle, incluem:

- **Projeto de Controlador Fuzzy:** a partir de regras inferidas sobre a distribuição de temperaturas e mesmo atuação, pode-se utilizar as técnicas de controle difuso para se ponderar as mesmas e obter um controlador de temperatura para a estufa, verificando-se então o seu desempenho.
- **Projeto de Controlador por Redes Neurais:** pode-se utilizar a estufa para se desenvolver um controlador que, baseado nas temperaturas medidas, passe esses dados por uma rede contendo funções em seus nós (neurônios) que, através de um processo de treinamento, possa controlar a temperatura no interior da estufa.
- **Projeto de Controlador Adaptativo:** uma vez que o sistema a ser controlado é bastante complexo, tendo que ser feitas muitas simplificações para se obter

um modelo, tem-se que aspectos não modelados podem influir na resposta do sistema; além disso, o sistema é muito suscetível a influências do ambiente externo (temperatura externa, ventos, irradiação solar, etc.), que alteram sua resposta, dependendo das condições a que o sistema é submetido. Tais efeitos podem ser minimizados (obtendo-se um controlador mais robusto) através do Controle Adaptativo, que modifica o controlador do sistema conforme as variações de sua resposta:

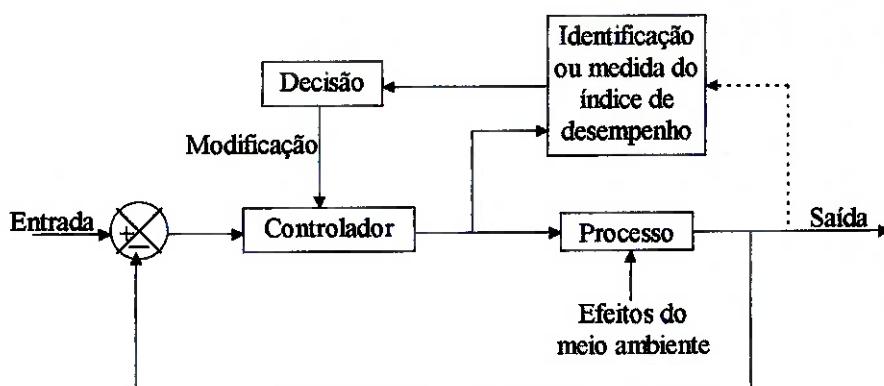


Figura VI-5: Sistema de Controle Adaptativo

- **Estudo dos Efeitos da Variação do Escoamento na Resposta do Sistema:** pode ser facilmente conseguida (experimentalmente) através da mudança das chicanas que podem ser colocadas ou retiradas na estufa, podendo ser explicadas, por exemplo, através de modelagens por elementos finitos.
- **Estudo dos Efeitos do Posicionamento dos Sensores no Desempenho do Controlador:** sua verificação experimental pode ser facilmente conseguida movendo-se os termistores entre os diversos orifícios a ele destinados; sua explicação teórica pode ser conseguida, por exemplo, via análise modal.

- **Outros Estudos** aqui não descritos, envolvendo aspectos específicos ou gerais de Controle ou Dinâmica de Sistemas.

VII. CONCLUSÕES

Através deste trabalho foi possível:

- Obtenção de um modelo com um grau de liberdade, para um ambiente de temperatura controlada.
- Projetar um sistema de controle pela abordagem clássica (uma entrada e uma saída - SISO);
- Verificar através de simulação que o sistema é estável para os parâmetros adotados ou calculados.
- Implementar completamente a estufa, incluído as partes estrutural, de sensoreamento, atuação, eletrônica e software de controle e interface com o usuário (que pode servir de base para controladores posteriormente desenvolvidos);
- Estudar diferentes programas de elementos finitos, determinar suas capacidades e limitações e escolher o que foi utilizado na modelagem;
- Modelar a estufa utilizando-se elementos finitos, incluindo os fenômenos de aquecimento e resfriamento por ventilação;
- Verificar que não se pode gerar um modelo a variáveis de estado a partir do modelo a elementos finitos, quando se considera o caso genérico de resfriamento por ventilação. Tal abordagem só é eficaz para o caso do aquecimento;
- Executar testes experimentais e analisar o desempenho do sistema desenvolvido, tendo-se concluído que o mesmo segue aproximadamente o previsto nas simulações, controlando satisfatoriamente a temperatura no interior da estufa, conforme se pode observar nos resultados apresentados;

- Construir o protótipo de um sistema térmico que pode servir de base para futuros trabalhos em controle térmico, segundo as mais diversas abordagens do problema, tanto em nível didático quanto em nível de pesquisa;
- Gerar a documentação de suporte para o prosseguimento do trabalho por outros alunos, no futuro.

ANEXOS

A - DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE PELÍCULA

A.1 - Convecção Natural

Na modelagem do sistema para aquecimento estão presentes dois coeficientes de película para convecção natural: h_t e h_l . Para a determinação dos valores destes coeficientes foram utilizadas as seguintes relações, obtidas na Ref. [3]:

- **Convecção natural em placa plana vertical**

$$(\bar{N}u)^{\frac{1}{2}} = 0.825 + \frac{0.387 Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \quad \text{válida para } 10^{-1} < Ra < 10^{12}$$

onde $\bar{N}u = \frac{\bar{h} \cdot x}{k}$;

$$Ra = Gr \cdot Pr;$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_p - T_\infty) \cdot x^3}{\nu^2};$$

x é a altura da placa,

g é a aceleração da gravidade,

T_p é a temperatura na parede da estufa,

T_∞ é a temperatura do ar,

\bar{h} é o coeficiente de película médio,

β é o coeficiente de expansão volumétrica, igual a $1/T$ para gases ideais,

ν é a viscosidade cinemática do ar

Pr é o nº de Prandt

e k é a condutividade térmica do ar.

As propriedades do ar (β , ν , Pr e k) são avaliadas à temperatura de película

$$(T_f = \frac{T_\infty + T_p}{2}).$$

- **Convecção natural em placa plana horizontal**

$$\overline{Nu} = C \cdot (Gr \cdot Pr)^m$$

Valores de C e m para superfície superior de placa aquecida ou superfície inferior de placa resfriada:

<i>Gr.Pr</i>	<i>C</i>	<i>m</i>
$2 \cdot 10^4$ a $8 \cdot 10^6$	0.54	1/4
$8 \cdot 10^6$ a 10^{11}	0.15	1/3

A dimensão característica x é, neste caso, a média das duas dimensões da placa.

De posse destas relações, é possível calcular os coeficientes de película nas paredes laterais e superior da estufa (assume-se que não há transferência de calor pela parede inferior da estufa). Calculados estes coeficientes, determina-se a quantidade de calor transferida por convecção e desta o coeficiente de película global.

$$Q = (T_p - T_\infty) \cdot (A_{sup} \cdot h_{sup} + A_{lat} \cdot h_{lat})$$

onde Q é a taxa de transferência de calor,

A_{sup} e A_{lat} são as áreas da parede superior e das paredes laterais, respectivamente,

e h_{sup} e h_{lat} são os coeficientes de película nas paredes superior e laterais, respectivamente.

Para a determinação dos valores de h_i e h_l , desenvolveu-se um programa em Pascal (listado em anexo) que, utilizando as relações acima, calcula, para diferentes valores de T_p e T_∞ , os coeficientes de película de convecção natural.

Os resultados obtidos pelo programa, para valores diversos de temperaturas T_a , T_c e T_∞ são dados na tabela abaixo:

Caso	T_a (°C)	T_c (°C)	T_∞ (°C)	h_i (W/m ² .°C)	h_l (W/m ² .°C)
I	10	15	20	2.961	2.902
II	10	17.5	25	3.334	3.237
III	20	30	40	3.488	3.433
IV	10	25	40	4.066	3.899
V	10	30	50	4.401	4.227
VI	20	40	60	4.273	4.185
VII	10	35	60	4.672	4.495

A observação dos dados acima mostra uma clara dependência dos valores de h_i e de h_l com as temperaturas da parede e do ar. Entretanto, para que se consiga um modelo linear do sistema, é preciso que se faça uma aproximação, admitindo os valores de h_i e h_l constantes com a temperatura. Dos dados das tabelas acima, considerou-se razoável fazer a aproximação:

$$h_i = h_l = 4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

A.2 - Convecção Forçada

Modelo: Escoamento sobre placa plana, segundo Ref. [3]:

A velocidade ao longe (v_∞) pode ser aproximada pela velocidade média nas seções de entrada e saída, com a correção de que não vale para as placas que contém estas seções.

Para o ventilador utilizado:

$$Q = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S = \pi \cdot (50 \cdot 10^{-3})^2 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow v_\infty \approx Q/S = 6,37 \text{ m/s}$$

Considerando-se que $Re_L = \frac{V_\infty L}{\nu}$ (Ref. [3], p. 186, eq. 5-2):

$$\Rightarrow Re_L = 2,64 \cdot 10^5$$

ou, corrigindo:

$$\Rightarrow v_{corr} \approx \frac{2.70.70 + 2.35.70}{2.70.70 + 4.35.70} V_\infty \approx 4,77 \text{ m/s} \Rightarrow Re_L = 1,98 \cdot 10^5$$

Portanto, $Re_L < 5 \cdot 10^5$, o que significa que a camada limite é laminar (Ref. [3], p. 185) podendo-se usar a seguinte análise:
(Ref. [3], p. 198, eqs. 5-42, 5-44 e 5-45)

$$(5-45): \bar{h} = 2h_{x=L}$$

$$(5-42): Nu_x = \frac{h_x x}{k}$$

$$(5-44): Nu_x = 0,332 \Pr^{\frac{1}{3}} \text{Re}_x^{\frac{1}{2}}$$

$$\Rightarrow \bar{h} = \frac{2k}{L} 0,332 \Pr^{\frac{1}{3}} \text{Re}_L^{\frac{1}{2}} (*)$$

onde $L=0,700 \text{ m}$

Sendo que $\Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ (Ref. [3], p.209, eq. 5-39) e $\text{Re}_L = \frac{V_\infty L}{\nu}$ (Ref. [3], p.186, eq. 5-2)

As propriedades devem ser avaliadas à temperatura de filme:

(Para o caso típico, $T_\infty=20^\circ\text{C}$ e $T_p=35^\circ\text{C} \Rightarrow T_f=27,5^\circ\text{C}=300,65\text{K}$)

Para o ar a $T_f=27,5^\circ\text{C}$ e pressão atmosférica (Ref. [3], p. 614, tab. A-5):

$\nu=16,89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $\alpha=22,260 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $k=26,29 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (valores interpolados linearmente).

$$(*) \Rightarrow \bar{h} = \frac{2 \cdot 26,29 \cdot 10^{-3}}{0,700} \cdot 0,332 \cdot \left(\frac{16,89 \cdot 10^{-6}}{22,260 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{4,77 \cdot 0,700}{16,89 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\Rightarrow \bar{h} = 10,1 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Assim, tem-se que: $h_f=10 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

B - DESENHO DE MONTAGEM