Paulo Renato Orlandi Lasso

UMA NOVA TÉCNICA PARA CONSERVAÇÃO
DE ALIMENTOS FRESCOS BASEADA EM
INSTRUMENTAÇÃO ELETROELETRÔNICA
AUTOMATIZADA

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do Título
de Mestre em Engenharia Elétrica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Murilo Araújo Romero

São Carlos
2003

DEDICATÓRIA

Em primeiro lugar e acima de tudo, a DEUS,
criador de todo o universo, meu criador, e a Jesus Cristo,
meu Senhor e Salvador.

À minha amada esposa Katia,
fiel companheira e incentivadora.

Aos meus amados filhos,
Jemima, Débora e Calebe.

Aos meus amados pais e primeiros professores
Renato e Olga.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar e acima de tudo, a DEUS, meu Senhor e Pai, que efetua em todos nós tanto o querer como o realizar. (Filipenses 2.13)

Aos Professores Drs. Paulo Estevão Cruvinel, José Dalton Cruz Pessoa e Murilo Araújo Romero pelo incentivo, pelos conselhos, pela amizade e excelente orientação fornecida para elaboração deste trabalho.

Ao Dr. Adonai Gimenes Calbo, pela inspiração da idéia principal deste trabalho e colaboração.

À minha amiga e Professora Dra. Vilma Alves de Oliveira pela colaboração e incentivo.

Ao meu amigo e colega, MSc. Rafael Vieira de Sousa, pelo apoio nas questões de LabView e Matlab.

À minha mãe, Professora de Português, Maria Olga Orlandi Lasso, pela correção ortográfica e gramatical do texto deste trabalho, pelo grande incentivo e torcida.

A todos os amigos e colegas da Embrapa Instrumentação Agropecuária que, de forma direta ou indireta, colaboraram, em especial aos pesquisadores Ladislau Marcelino Rabello, pelo apoio nas questões de refrigeração, Victor Bertucci Neto, pelo apoio nas questões de controle, ao Chefe Geral Dr.

Ladislau Martin Neto e Chefes de Apoio Dr. Luiz Alberto Capparelli Mattoso e Dr. Álvaro Macedo da Silva, pelo suporte dado, ao Moacyr José Vaz de Sousa (meu caro Formiga) e Valentim Monzane, pelo apoio na arte final das figuras e impressão do trabalho e à Janis Aparecida Baldovinotti, pelo apoio na correção e adequação à norma das referências bibliográficas.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio institucional e financeiro.

RESUMO

LASSO, P. R. O. (2003). *Uma nova técnica para conservação de alimentos frescos baseada em instrumentação eletroeletrônica automatizada*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

Neste trabalho é apresentado um sistema automatizado para armazenamento e conservação de alimentos vegetais frescos baseado em instrumentação eletroeletrônica e *software* de controle desenvolvido em *LabView*. Para a conservação, os produtos (já embalados) são armazenados imersos em uma solução aquosa preparada com água e um anticongelante como o etileno glicol (2%). Esta metodologia de armazenamento permite aumentar o tempo de prateleira através da redução da temperatura, sem o perigo de congelar os produtos armazenados. Os resultados mostram que a metodologia permite armazenar produtos frescos com segurança a apenas 0,4°C acima do ponto de congelamento, enquanto que em câmaras convencionais esses devem ser armazenados a, pelo menos, 2,0°C acima do ponto de congelamento. Essas condições proporcionam ao sistema de hidroconservação maior imunidade a perturbações de carga térmica e abertura de porta e velocidade adequada para um rápido resfriamento de produtos frescos.

Palavras-chave: Instrumentação Agropecuária; controle e automação; controle térmico; hidroconservação; alimentos frescos; minimamente processados; temperatura; agricultura familiar.

ABSTRACT

LASSO, P. R. O. (2003). *A new technique for fresh food conservation based on automated electronics instrumentation*. M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

This work presents an automated system for fresh vegetable food conservation based on electronic instrumentation, a storage chamber, and software for system control, whose procedures were developed in LabView. For conservation the fresh packaged products are stored into a controlled temperature liquid volume (55.3 liters), i.e., an aqueous solution prepared with water and ethylene glycol (2%). This conservation methodology allows to increase shelf time of fresh vegetables by means of reducing the storage temperature range to a safe operating condition without freezing the products. Results have shown the suitability of the developed system, which enables to store fresh products with safety and preserving quality as close as 0.4°C of the freezing point. In a conventional chamber fresh products must be stored considering at least a safety range of 2.0°C, which is much farther from the freezing point. Therefore, these conditions give to the hydro-conservation system large immunity regarding thermal load perturbation as well during door operation and adequate speed for fast cooling processes for fresh products.

Keywords: Agricultural instrumentation; control and automation; thermal control; hydro-conservation; fresh food; fresh cut; temperature; family agriculture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Relação entre o coeficiente $Q_{10}(\theta)$ e a temperatura de um produto hipotético (WILLS <i>et al</i> , 1998).....	5
Figura 2.1: Arquitetura do sistema de controle automático construído	18
Figura 2.2: Diagrama elétrico para a conexão do sensor de temperatura a três fios para a compensação dos efeitos da resistência R_c do cabo de conexão	20
Figura 2.3 (a) Transformada de Fourier de um sinal contínuo no tempo.	23
Figura 2.3 (b) Transformada de Fourier do sinal discreto no tempo obtido por amostragem periódica. O período de amostragem é grande, de forma que as repetições periódicas da transformada contínua no tempo se sobrepõem.	23
Figura 2.3 (c) O mesmo que (b), mas com o período de amostragem pequeno o suficiente para que as repetições periódicas da transformada contínua no tempo não se sobreponham.....	24
Figura 2.4: Diagrama de blocos para um sistema de controle do tipo liga-desliga	27
Figura 2.5: Curva característica para o controlador liga-desliga com histerese ..	28
Figura 2.6: Sinal de saída $y(t)$ e de controle $u(t)$ para o controlador liga-desliga com histerese.	29
Figura 2.7: Diagrama termodinâmico esquemático da câmara de armazenamento.....	30
Figura 2.8: Circuito elétrico RC.	31
Figura 2.9: Comportamento da evolução temporal de $v_c(t)$ durante a carga do capacitor.	33
Figura 2.10: Resposta do sistema a um sinal de entrada tipo degrau de temperatura com a magnitude de $25,00^\circ\text{C}$	35
Figura 2.11: Curvas de resfriamento da câmara baseada em hidroconservação para vários intervalos de tempo Δt de permanência da unidade de refrigeração ligada.	36
Figura 2.12: Relação entre a variação de temperatura $\Delta\theta$ e o intervalo de tempo Δt de permanência da unidade de refrigeração ligada. O coeficiente R^2 para aproximação desta relação por uma reta é de 0,99.....	37

Figura 2.13: Relação entre energia total $E_T(t)$ retirada da câmara baseada em hidroconservação e o intervalo de tempo Δt de permanência da unidade de refrigeração ligada. O coeficiente R^2 para aproximação desta relação por uma reta é de 0,99.....	38
Figura 2.14: Resposta típica de um sistema de primeira ordem a um sinal de entrada tipo rampa dado por a/s^2	39
Figura 2.15: O diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada..	41
Figura 2.16: O diagrama de blocos genérico de um sistema de controle em malha fechada.	42
Figura 2.17: Resultado da simulação do modelo obtido, para um <i>set point</i> de 25,00°C, com o sistema inicialmente a temperatura de 0,00°C....	44
Figura 2.18: Resultado da simulação do modelo obtido, para um <i>set point</i> de 1,00°C, com o sistema inicialmente a temperatura de 25,00°C....	44
Figura 3.1: Unidade de refrigeração para a câmara de conservação de alimentos frescos baseada em hidroconservação.	47
Figura 3.2: Vista da ramificação do evaporador da câmara de conservação. Medidas internas da câmara: comprimento x largura x altura = 64 x 32 x 27cm.	49
Figura 3.3: Câmara de conservação na configuração de hidroconservador.	50
Figura 3.4: Unidade de digitalização – vista externa.....	50
Figura 3.5: Unidade de digitalização – vista interna.....	51
Figura 3.6: <i>Driver</i> de potência – vista externa.....	51
Figura 3.7: <i>Driver</i> de potência – vista interna.....	52
Figura 3.8: <i>Driver</i> de potência – esquemático eletrônico de um dos canais.	52
Figura 3.9: <i>Hardware</i> implementado - detalhes da unidade de digitalização e do <i>driver</i> de potência, unidade de refrigeração, computador e câmara de conservação.	53
Figura 3.10: Painel de Controle de desenvolvimento do <i>software</i> de controle....	54
Figura 3.11: Diagrama de Fluxo de Sinais de desenvolvimento do <i>software</i> de controle.	55
Figura 3.12: Fluxograma do <i>software</i> de controle desenvolvido.	56
Figura 3.13: Grupo de blocos funcionais que estabelecem o período de amostragem da temperatura pelo <i>software</i> de controle.....	57
Figura 3.14: Grupo de blocos funcionais responsáveis pela leitura do dado de temperatura via interface serial.....	58
Figura 3.15: Grupo de blocos funcionais responsáveis pelo armazenamento dos dados de temperatura em arquivo.	58

Figura 3.16: Grupo de blocos funcionais responsáveis pela plotagem dos dados de temperatura lidos no Painel de Controle, determinação das temperaturas mínima e máxima, comparação da temperatura lida com o <i>set point</i> , funcionamento do bloqueio de segurança e acionamento da refrigeração via placa CIO-DAS08/Jr-AO.	60
Figura 4.1: (a) Curva de resfriamento da câmara aérea com taxa de ocupação de 0%. (b) Detalhe da faixa de 2,00°C a 10,00°C. A taxa de resfriamento obtida para esta faixa foi de 4,05°C/min com um coeficiente R^2 de 0,99.	63
Figura 4.2: (a) Curva de aquecimento da câmara aérea com taxa de ocupação de 0%. (b) Detalhe da faixa de 2,00°C a 10,00°C. A taxa de aquecimento obtida para esta faixa foi de 1,07°C/min com um coeficiente R^2 de 0,99.	63
Figura 4.3: (a) Curva de resfriamento da câmara baseada em hidroconservação com taxa de ocupação de 0%. (b) Detalhe da faixa de 2,00°C a 10,00°C. A taxa de resfriamento obtida para esta faixa foi de 0,21°C/min com um coeficiente R^2 de 0,99.	63
Figura 4.4: (a) Curva de aquecimento da câmara baseada em hidroconservação com taxa de ocupação de 0%. (b) Detalhe da faixa de 2,00°C a 10,00°C. A taxa de aquecimento obtida para esta faixa foi de 0,01°C/min com um coeficiente R^2 de 0,99.	64
Figura 4.5: Unidade de digitalização multicanal.	65
Figura 4.6: Interface do <i>software</i> de aquisição de dados da Unidade de Digitalização Multicanal.	65
Figura 4.7: Arranjo experimental para levantamento da distribuição da temperatura na câmara de conservação.	66
Figura 4.8: Curvas da temperatura na câmara aérea nos pontos A, B, C e D, para um <i>set point</i> de 11,00°C, com a agitação desligada.	67
Figura 4.9: Curvas da temperatura na câmara aérea nos pontos A, B, C e D, para um <i>set point</i> de 11,00°C, com a agitação ligada.	68
Figura 4.10: Curvas da temperatura na câmara baseada em hidroconservação nos pontos A, B, C e D, para um <i>set point</i> de 11,00°C.	69
Figura 4.11: Regime estacionário de temperatura da câmara aérea e da câmara baseada em hidroconservação para o <i>set point</i> de 11,00°C, com taxa de ocupação de 0%.	70
Figura 4.12: Detalhe do regime estacionário de temperatura da câmara baseada em hidroconservação para o <i>set point</i> de 11,00°C, com taxa de ocupação de 0%.	71
Figura 4.13: Regime estacionário de temperatura da câmara aérea e da câmara baseada em hidroconservação para <i>set point</i> de 1,00°C, com taxa de ocupação de 0%.	72

Figura 4.14: Detalhe do regime estacionário de temperatura da câmara baseada em hidroconservação para o <i>set point</i> de 1,00°C, com taxa de ocupação de 0%.	72
Figura 4.15: Câmara preparada com garrafas plásticas de 0,7 litros cheias de areia para avaliar a Margem Segura em função da taxa de ocupação.	74
Figura 4.16: Margem Segura em função da taxa de ocupação da câmara aérea para <i>set point</i> de 1,00°C.	75
Figura 4.17: Margem Segura em função da taxa de ocupação da câmara baseada em hidroconservação para <i>set point</i> de 1,00°C.	75
Figura 4.18: Evolução temporal da temperatura durante a perturbação para as cargas térmicas de 2, 4, 6 e 8 litros na câmara baseada em hidroconservação.	77
Figura 4.19: Temperatura de pico atingida durante a perturbação em função do volume da carga térmica na câmara baseada em hidroconservação.	77
Figura 4.20: Tempo de duração da perturbação em função do volume da carga térmica na câmara baseada em hidroconservação.	78
Figura 4.21: Evolução temporal da temperatura da câmara aérea durante perturbação de abertura de porta por períodos de 0,5 minuto e 1,0 minuto.	79
Figura 4.22: Evolução temporal da temperatura da câmara baseada em hidroconservação durante perturbação de abertura de porta por períodos de 0,5 minuto e 1,0 minuto.	80
Figura 4.23: Curvas de resfriamento de Maçã Fuji em câmara aérea, em regime estacionário com <i>set point</i> de 2,00°C.	81
Figura 4.24: Curvas de resfriamento de Maçã Fuji em hidroconservação, em regime estacionário com <i>set point</i> de 2,00°C.	81
Figura 4.25: Qualidade relativa [$Q_R(t)$] de couve manteiga em função do tempo de armazenamento em câmara aérea para <i>set point</i> de 3,00°C e em câmara baseada em hidroconservação para <i>set point</i> de 1,00°C.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Relação entre a taxa de respiração de alguns produtos e a temperatura	4
Tabela 1.2: Temperatura recomendada para armazenamento e ponto de congelamento de alguns produtos	7
Tabela 4.1: Taxas de resfriamento e aquecimento do interior da câmara na faixa de 2,00°C a 10,00°C com taxa de ocupação de 0%	64
Tabela 4.2: Valores de $\Delta\Theta_{\max}(\theta)$.medidos para câmara aérea e câmara baseada em hidroconservação para <i>set points</i> de 1,00°C e 11,00°C com taxa de ocupação de 0%.	67
Tabela 4.3: Características de desempenho do controle liga-desliga para o <i>set point</i> de 11,00°C para câmara aérea e câmara baseada em hidroconservação, com taxa de ocupação de 0%.	71
Tabela 4.4: Características de desempenho do controle liga-desliga para o <i>set point</i> de 1,00°C para câmara aérea e câmara baseada em hidroconservação, com taxa de ocupação de 0%.	73
Tabela 4.5: Estimativa do consumo mensal de energia para o <i>set point</i> de 1,00°C, para câmara aérea e câmara baseada em hidroconservação, com taxa de ocupação de 0%.	73
Tabela 4.6: Valores médios de t_{meio} de resfriamento interno de maçã Fuji entre a temperatura ambiente (~ 23,00°C) e 2,00°C.....	82
Tabela 4.7: Escala hedônica utilizada para avaliação sensorial no ensaio de degradação de couve manteiga.....	84
Tabela 4.8: Perda percentual de massa de couve manteiga, em oito dias de armazenamento em câmara aérea e em hidroconservação e em quatorze dias de armazenamento em hidroconservação.	86

LISTA DE SÍMBOLOS

- $\theta(t)$ - temperatura (variável);
- Θ - temperatura (valor fixo);
- $Q_{10}(\theta)$ - coeficiente que indica quantas vezes a taxa respiratória aumenta a cada acréscimo de $10,00^{\circ}\text{C}$ na temperatura;
- $R_{\Theta}(\theta)$ - Taxa respiratória à temperatura Θ ;
- $MS(\theta)$ - Margem Segura;
- $E_{ssmax}(\theta)$ - Erro máximo de controle em regime estacionário;
- $\Delta\Theta_{max}(\theta)$ - Diferença máxima de temperatura observada entre dois pontos da câmara;
- α - Coeficiente de variação da resistência elétrica com a temperatura para sensores do tipo PT100;
- $R_s(\theta)$ - Resistência elétrica do sensor PT100;
- R_c - Resistência elétrica do cabo do sensor PT100;
- I - Corrente elétrica no sensor PT100;
- $V_{final}(\theta)$ - Tensão sobre o sensor PT100;
- $x_a(t)$ - Sinal analógico no domínio do tempo;
- $X_a(j\Omega)$ - Transformada de Fourier de $x_a(t)$;
- Ω - Freqüência de $x_a(t)$;
- $x(n)$ - Seqüência obtida por amostragem periódica de $x_a(t)$;
- $r(t)$ - Sinal de referência (*set point*) em um sistema de controle;
- $e(t)$ - Sinal de erro em um sistema de controle;
- $u(t)$ - Sinal de controle em um sistema de controle;

$y(t)$	- Sinal de saída (variável controlada) em um sistema de controle;
$P_1(t)$	- Fluxo de calor que entra na câmara de conservação;
$P_2(t)$	- Fluxo de calor que sai da câmara de conservação;
$P_L(t)$	- Fluxo de calor líquido que sai da câmara de conservação;
$\theta_a(t)$	- Temperatura ambiente;
$R_{\theta 1}$	- Resistência térmica oferecida pelo sistema ao fluxo $P_1(t)$;
$R_{\theta 2}$	- Resistência térmica oferecida pelo sistema ao fluxo $P_2(t)$;
C	- Capacidade calorífica do sistema;
$E(t)$	- Tensão da fonte de tensão no circuito de modelagem;
$i(t)$	- Corrente elétrica no circuito de modelagem;
R	- Resistência elétrica do circuito de modelagem;
C'	- Capacitância do circuito de modelagem;
$Q(t)$	- Carga do capacitor do circuito de modelagem;
$v_c(t)$	- Tensão sobre o capacitor do circuito de modelagem;
s	- Variável de Laplace;
$E(s)$	- Transformada de Laplace da tensão da fonte de tensão;
$V_c(s)$	- Transformada de Laplace da tensão sobre o capacitor;
$G(s)$	- Função de transferência do circuito elétrico de modelagem;
τ	- Constante de tempo elétrica;
τ_D	- Constante de tempo térmica do sistema com a unidade de refrigeração desligada;
τ_L	- Constante de tempo térmica do sistema com a unidade de refrigeração ligada;
$G_D(s)$	- Função de transferência do sistema com a unidade de refrigeração desligada;
$G_L(s)$	- Função de transferência do sistema com a unidade de refrigeração ligada;

- $E_T(t)$ - Energia total retirada da câmara de conservação;
- S/H - *Sample/Hold*
- $R(s)$ - Transformada de Laplace de $r(t)$;
- $E_r(s)$ - Transformada de Laplace de $e(t)$;
- $Y(s)$ - Transformada de Laplace de $y(t)$;
- $H(s)$ - Função de transferência do ramo de realimentação em um sistema de controle;
- $G_G(s)$ - Função de transferência global de um sistema de controle em malha fechada;
- $G_{GD}(s)$ - Função de transferência global do sistema de controle em malha fechada com a unidade de refrigeração desligada;
- $G_{GL}(s)$ - Função de transferência global do sistema de controle em malha fechada com a unidade de refrigeração ligada.
- CT - Carga térmica.
- $Q_R(t)$ - Qualidade relativa de produtos vegetais ensaiados.

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii

CAPÍTULO 1: Armazenamento de alimentos frescos e caracterização do problema.....	1
1.1 Introdução.....	2
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Caracterização do Problema.....	2
1.4 A técnica de hidroconservação.....	11
1.5 Capacidade calorífica e condutividade térmica em hidroconservação....	11
1.6 Impactos sociais e qualidade de vida da população decorrentes de um bom sistema de armazenamento de alimentos frescos.....	13
CAPÍTULO 2: Projeto Instrumental e modelagem.....	17
2.1 Projeto instrumental.....	18
2.2 Ação de controle liga-desliga (<i>on-off</i>) em sistemas de malha fechada ...	26
2.3 Modelagem do sistema de controle de temperatura do processo de armazenamento de alimentos.....	29
CAPÍTULO 3: Instrumento automatizado para conservação de alimentos frescos com base na técnica de hidroconservação.....	45
3.1 Descrição do <i>Hardware</i>	46
3.2 Descrição do <i>software</i> de controle da câmara de conservação de alimentos frescos.....	53

CAPÍTULO 4: Resultados e Conclusões	61
4.1 Metodologia Experimental.....	62
4.2 Resultados Obtidos e Discussão	62
4.2.1 Taxas de resfriamento e aquecimento	62
4.2.2 Distribuição da temperatura na câmara	64
4.2.3 Características de desempenho do controle em malha fechada	69
4.2.3.1 Regime estacionário para <i>Set Point</i> de 11°C	70
4.2.3.2 Regime estacionário para <i>Set Point</i> de 1°C	72
4.2.4 Estimativa do consumo mensal de energia.....	73
4.2.5 Influência da taxa de ocupação da câmara na Margem Segura [MS(θ)]	74
4.2.6 Efeito de perturbações térmicas no controle da câmara de conservação de alimentos	76
4.2.6.1 Perturbação de Carga Térmica	76
4.2.6.1.1 Ensaio na câmara de conservação baseada em hidroconservação.....	76
4.2.6.1.2 Ensaio de perturbação na câmara de conservação aérea ...	78
4.2.6.2 Perturbação devido a abertura de porta da câmara.....	78
4.2.7 Estudos de caso com alimentos frescos	80
4.2.7.1 Resfriamento interno de maçã Fuji (<i>Malus domestica</i> cv. <i>fuji</i>)	80
4.2.7.2 Degradação da couve manteiga (<i>Brassica oleracea</i> , v. <i>acephala</i>)	82
4.2.7.2.1 Análise sensorial	83
4.2.7.2.2 Perda de massa	85
4.3 Conclusões	86
4.4 Propostas de trabalhos futuros	91
REFERÊNCIAS	92
OUTRAS REFERÊNCIAS CONSULTADAS.....	96

CAPÍTULO 1: Armazenamento de alimentos frescos e caracterização do problema

Este capítulo enfoca a situação brasileira no que diz respeito à produção e às perdas de produtos vegetais frescos, bem como aborda os fundamentos do processo de degradação destes produtos, sob o ponto de vista da fisiologia vegetal de pós-colheita. Também apresenta uma discussão sobre os impactos sociais e a qualidade de vida decorrentes de um bom sistema de armazenamento de alimentos frescos.

1.1 Introdução

O controle da temperatura de armazenamento de vegetais frescos ao longo de toda a vida de pós-colheita desses produtos é essencial para assegurar sua qualidade e aumentar seu tempo de prateleira (GEESON, 1989). A não observância dessa condição é um dos principais fatores que acarretam perdas no pós-colheita, ao lado de outros fatores como manuseio, embalagens e transporte inadequados dos produtos. No Brasil, essas perdas são da ordem de 30% para frutas, 30,3% para hortaliças e chegam a 40,6% para folhas (GOMES, 1999).

Nesta pesquisa foi desenvolvida uma nova técnica de armazenamento de alimentos vegetais frescos, baseada em instrumentação eletroeletrônica automatizada para aumento do prazo para consumo e comercialização desses produtos com manutenção da qualidade.

1.2 Objetivo

O objetivo nesta pesquisa é o projeto e desenvolvimento da metodologia e da instrumentação necessária para o controle de qualidade durante o armazenamento de produtos vegetais frescos como frutas, legumes, folhas e raízes para aumento do tempo de prateleira destes produtos.

1.3 Caracterização do Problema

O Brasil tem papel de destaque na produção mundial de frutas e olerícolas frescas, ocupando a 3ª posição no *ranking* mundial dos principais

países produtores de frutas, vindo após a China e Índia (SANTIAGO e ROCHA, 2001). No caso de legumes, em especial tomates, o Brasil é o oitavo produtor mundial e o sétimo maior em processamento (CAMARGO FILHO, 2001).

Após a colheita, as frutas, as hortaliças, os legumes e as raízes frescas permanecem vivos, por algum tempo, realizando suas funções vitais como respiração, transpiração e fotossíntese. A qualidade desses alimentos tem como papel preponderante seu consumo ainda dentro destas condições, ou seja, em boas condições fito-sanitárias. A longevidade pós-colheita destes produtos é regulada pelo procedimento de armazenagem no qual a temperatura é o fator ambiental mais importante pois regula os processos fisiológicos e bioquímicos associados à senescência (CHITARRA & CHITARRA, 1990).

Existe uma relação inversa entre a temperatura de armazenamento e o tempo de vida de produtos frescos. Em geral, quanto mais elevada for a temperatura, menor será a vida útil. A razão disto é que a maioria dos fatores que levam às perdas, quantitativas e qualitativas, são acelerados com o aumento da temperatura. A elevação da temperatura aumenta a transpiração (que faz o produto perder água e peso) e causa um aumento exponencial da respiração, que é o principal indicador da velocidade das reações metabólicas do vegetal. Em consequência disto, sob temperaturas elevadas, o produto murcha e deteriora muito mais rapidamente do que quando armazenado sob refrigeração. Em geral, quanto mais o produto respira, mais rapidamente ele deteriora (LUENGO e CALBO, 2001).

A tabela 1.1 ilustra informações sobre a taxa de respiração de alguns produtos que foram submetidos a diferentes temperaturas.

Tabela 1.1: Relação entre a taxa de respiração de alguns produtos e a temperatura

Produto	Taxa de respiração [$\mu\text{Kg CO}_2\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$]				
	0,00 [°C]	4,00 – 5,00 [°C]	10,00 [°C]	15,00 – 16,00 [°C]	20,00 – 21,00 [°C]
Alface (<i>Lactuca sativa</i>)	6,00 – 17,00	13,00 – 20,00	21,00 – 40,00	32,00 – 45,00	51,00 – 60,00
Brócolos (<i>Brassica oleracea v. italica</i>)	19,00 – 21,00	32,00 – 37,00	75,00 – 87,00	161,00 – 186,00	278,00 – 320,00
Couve-flor (<i>Brassica oleracea v. botrytis</i>)	16,00 – 19,00	19,00 – 22,00	32,00 – 36,00	43,00 – 49,00	75,00 – 86,00
Laranja (<i>Citrus aurantium</i>)	2,00 – 5,00	4,00 – 7,00	6,00 – 9,00	13,00 – 24,00	22,00 – 34,00
Morango (<i>Fragaria ananassa</i>)	12,00 – 18,00	16,00 – 23,00	49,00 – 95,00	71,00 – 92,00	102,00 – 196,00
Maçã (<i>Malus domestica</i>)	3,00 – 6,00	5,00 – 11,00	14,00 – 20,00	18,00 – 31,00	20,00 – 41,00
Melão (<i>Cucumis melo inodorus</i>)	5,00 – 6,00	9,00 – 10,00	14,00 – 16,00	34,00 – 39,00	45,00 – 65,00
Uva (<i>Vitis vinifera</i>)	1,00 – 2,00	3,00 – 6,00	8,00 – 11,00	10,00 – 12,00	-
Rabanete (<i>Raphanus sativus</i>)	3,00 – 9,00	6,00 – 13,00	15,00 – 16,00	22,00 – 42,00	44,00 – 58,00

Fonte: CHITARRA, M. I. F; CHITARRA, A. B. *Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio*. Lavras: ESAL: FAEPE, 1990. 293 p. : il.

Os efeitos da temperatura sobre a taxa respiratória, são tradicionalmente quantificados por um coeficiente que indica quantas vezes a taxa respiratória aumenta a cada acréscimo de $10,00^{\circ}\text{C}$ na temperatura de armazenamento, o qual é expresso pela eq. (1), ou seja:

$$Q_{10}(\theta) = \frac{R_{\theta+10}(\theta)}{R_{\theta}(\theta)} \quad (1)$$

onde $R_{\Theta+10}(\theta)$ é a taxa respiratória na temperatura $(\Theta+10)$, e $R_{\Theta}(\theta)$, é a taxa respiratória na temperatura (Θ) .

Para cada acréscimo de $10,00^{\circ}\text{C}$, a taxa respiratória do produto sofre uma elevação substancial, com aumentos médios de 3,4 a 8,3 vezes (WATADA *et al.*, 1996). O coeficiente $Q_{10}(\theta)$ de cada produto vegetal é, pois, função da faixa de temperatura considerada, conforme ilustra a figura 1.1 para um produto hipotético (WILLS *et al.*, 1998).

Figura 1.1: Relação entre o coeficiente $Q_{10}(\theta)$ e a temperatura de um produto hipotético (WILLS *et al.*, 1998)

Uma classe de alimentos com crescente aceitação no mercado brasileiro e que, de modo especial, sofre com o problema da temperatura é a de frutas e hortaliças minimamente processadas. O processamento mínimo

envolve a higienização, o descascamento (quando necessário⁽¹⁾) e o corte em pedaços convenientes ao consumo imediato. Assim, esses alimentos, com um razoável valor agregado⁽²⁾, são comercializados prontos para serem consumidos. Pelo fato de já estarem descascados e fatiados, esses produtos são muito mais perecíveis que os produtos inteiros que lhes deram origem, pois o descascamento remove a proteção natural e os cortes são injúrias mecânicas que aceleram a respiração e o processo de degradação (FREIRE JR., 1999).

Para a maioria dos produtos, a temperatura mínima de refrigeração recomendada (Θ) depende do ponto de congelamento (PC) e da precisão do sistema de controle da temperatura durante o armazenamento, conforme ilustra a tabela 1.2.

Segundo Luengo e Calbo (2001), verifica-se que as temperaturas recomendadas para o armazenamento de alguns produtos em câmaras aéreas, conforme ilustrado na tabela 1.2, principalmente os de origem tropical, estão bem acima do ponto de congelamento. Para estes casos os produtos são denominados sensíveis à injúria de frio (*chilling*). Para eles, temperaturas entre 0,00°C e as recomendadas podem aumentar a susceptibilidade a doenças ou causar distúrbios fisiológicos como a formação de áreas deprimidas, escurecimento e necrose do tecido.

No caso de frutos ocorre um processo semelhante ao observado anteriormente, em que frutos como ameixa, cereja doce, maçã, nectarina, pêssego, pêra e uva podem ser armazenados logo acima do ponto de congelamento, enquanto outros de origem tropical como abacate, abacaxi, banana, goiaba, limão, manga, mamão e melancia devem ser armazenados a temperaturas bem superiores à do ponto de congelamento.

¹ Em geral, o descascamento é necessário no caso de frutos, raízes e legumes minimamente processados, não sendo necessário no caso de folhas.

² A agregação de valor em alimentos minimamente processados é resultado dos insumos e do tempo da mão de obra utilizada no processamento, bem como da utilização da infra-estrutura e *know how* do processador.

Tabela 1.2: Temperatura recomendada para armazenamento em câmara aérea convencional e ponto de congelamento de alguns produtos

Produto Agrícola	θ [°C]	PC [°C]
Alcachofra (<i>Cynara scolymus</i>)	0,00	-1,10
Alface (<i>Lactuca sativa</i>)	0,00	-0,20
Berinjela (<i>Solanum melongena</i>)	8,00 – 12,00	-0,80
Beterraba (<i>Beta vulgaris</i> v. <i>conditiva</i>)	0,00	-0,90
Cenoura (<i>Daucus carota</i>)	0,00	-1,40
Couve (<i>Brassica oleracea</i> v. <i>acephala</i>)	0,00	-0,80
Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	10,00 – 13,00	-0,50
Pimentão (<i>Capsicum annuum</i>)	9,00 – 13,00	-0,70
Salsa (<i>Petroselinum crispum</i>)	0,00	-1,10
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	8,00 – 10,00	-0,50

Fonte: LUENGO, R. F. A.; CALBO, A. G. *Armazenamento de hortaliças*. [Brasília]: Embrapa Hortaliças, 2001. 242 p.

Para produtos não sensíveis à injúria de frio, o limite mínimo da temperatura de armazenamento é estabelecido pelo ponto de congelamento, abaixo do qual pode ocorrer a chamada injúria de congelamento. A injúria de congelamento provoca a perda da semi-permeabilidade das membranas celulares causando a diminuição da firmeza, do brilho e até o derramamento do conteúdo celular (PEARCE, 2001). Um fator importante de ser observado é que, quando ocorre o congelamento, há uma sensível redução na qualidade do produto para o consumo durante a fase de descongelamento.

Assim, dependendo do produto, o limite mínimo para a temperatura de armazenamento será, ou o que provoca injúria de frio, ou o ponto de congelamento.

Portanto, o controle da temperatura e a precisão dessa, em uma câmara de armazenamento de alimentos frescos, são fatores importantes, pois determinam o quão perto se pode estar dos pontos críticos que provocam injúrias.

Conforme se observa na relação entre o coeficiente $Q_{10}(\theta)$ e a temperatura de um produto hipotético, apresentada na figura 1.1, $Q_{10}(\theta)$ atinge valores elevados próximo ao ponto de congelamento. Este fato faz com que produtos que não sejam sensíveis à injúria de frio e que, portanto, possam ser armazenados a uma temperatura próxima à do ponto de congelamento sejam, de forma especial, beneficiados com a melhoria do controle e da precisão da temperatura na câmara de armazenagem. A redução de apenas $1,00^{\circ}\text{C}$ na temperatura média de armazenamento, na região próxima ao ponto de congelamento, tem efeitos significativos no aumento do tempo de prateleira desses produtos (WILLS *et al.*, 1998).

O problema que se coloca, então, é como controlar a temperatura de produtos frescos, sensíveis à injúria de frio ou congelamento, o mais próximo possível da temperatura ideal, que é aquela logo acima do ponto crítico que provoca injúria, com a garantia de que a temperatura não atinja este valor crítico que provoca injúria nos tecidos dos alimentos armazenados.

Assim, define-se o conceito de Margem Segura [$MS(\theta)$] como sendo a faixa de temperatura, logo acima do ponto de temperatura crítico, a qual deve ser considerada no ajuste do *set point* da temperatura da câmara de armazenamento, a fim de garantir que, em momento algum e, em nenhum ponto da câmara de armazenamento, a temperatura atinja o valor crítico que provoca injúria nos alimentos.

Na eq. (2), considera-se o pior caso para a câmara de armazenamento, ou seja, o armazenamento onde a Margem Segura [$MS(\theta)$] é expressa pela soma do erro máximo de controle da temperatura em regime estacionário [$E_{ss\max}(\theta)$] com a maior diferença de temperatura observada entre dois pontos quaisquer na câmara de armazenamento [$\Delta\Theta_{\max}(\theta)$].

$$MS(\theta) = E_{ss\max}(\theta) + \Delta\Theta_{\max}(\theta) \quad (2)$$

Assim, a qualidade dos alimentos, frente às premissas colocadas, pode ser assegurada a partir da verificação da Margem Segura $[MS(\theta)]$, ou seja:

$$\|MS(\theta)\| < E_{ss\max}(\theta) + \Delta\Theta_{\max}(\theta) \quad (3)$$

O armazenamento de frutas, hortaliças e raízes frescas não sensíveis à injúria de frio é feito, no Brasil, principalmente, com o uso de câmaras frias de meio aéreo, as quais têm sido programadas para um *set point* da ordem de 5,00°C acima do ponto crítico de congelamento dos produtos. Isto indica que essas câmaras frias trabalham com uma $[MS(\theta)]$ de 5,00°C para evitar a ocorrência de congelamentos indesejáveis nas regiões mais frias de um armazém refrigerado (EMBRAPA, 2002; WATADA *et al.*, 1998). Desta forma, não é possível usufruir, com esses sistemas de meio aéreo, dos benefícios que a refrigeração pode proporcionar ao processo de conservação de alimentos frescos, em especial, na faixa próxima ao ponto de congelamento, na qual o $Q_{10}(\theta)$ é elevado.

Uma câmara fria convencional de meio aéreo é constituída por um recinto termicamente isolado, por uma unidade de refrigeração composta por um conjunto de compressor, condensador e evaporador, um sistema de controle da temperatura, um sistema de circulação forçada de ar e, em alguns casos, um sistema de umidificação e controle da umidade do ar. Nessas câmaras, os produtos trocam calor diretamente com o ar, e o calor é drenado para o evaporador com auxílio da circulação forçada de ar no interior da câmara.

Em câmaras relativamente pequenas (do porte preconizado para hidroconservadores) muitas vezes não existem os sistemas de circulação

forçada de ar (agitadores do meio aéreo) e controle da umidade, como é o caso de alguns *displays* de estabelecimentos comerciais e modelos de *freezers* e refrigeradores domésticos.

Todavia, a circulação forçada de ar é importante para permitir certa homogeneidade térmica na câmara, uma vez que promove a agitação do meio, pois a baixa condutividade térmica do ar dificulta a equalização da temperatura no interior da câmara. Mesmo assim, o desenvolvimento de padrões de circulação de ar que assegurem homogeneidade térmica no tempo e no espaço tem sido um desafio (LAWTON *et al.*, 1999). Adicionalmente, nessas câmaras, fortes variações e gradientes de temperatura interna são induzidos por perturbações como a abertura das portas e a retirada ou colocação de produtos (cargas térmicas). O uso do ar como substância transportadora do calor nas câmaras frias convencionais dificulta a eliminação destes gradientes e o controle rigoroso da temperatura do produto (LASSO *et al.*, 2002).

Em câmaras aéreas, o contato direto dos produtos com o ar e sua circulação forçada, tendem a aumentar a taxa de transpiração, dependendo do tipo de embalagem utilizada. O sistema de umidificação e controle da umidade do ar deve manter a umidade relativa em torno de 90% a fim de minimizar a perda de água dos produtos por transpiração. Este é um aspecto importante porque a perda excessiva de água, além de afetar a qualidade dos produtos, causando problemas como enrugamento da pele, afeta o custo através da perda de peso (NEVES FILHO, 1991).

Em câmaras frias convencionais, o controle da temperatura é do tipo liga-desliga (*on-off*), geralmente realizado por um termostato ou por um controlador eletrônico, atuando sobre a alimentação elétrica da unidade de refrigeração. A precisão dos sensores utilizados está normalmente na faixa de 1,00°C. A diferença entre as temperaturas de acionamento e parada é chamada de diferencial ou histerese de temperatura (DOSSAT, 1990).

1.4 A técnica de hidroconservação

Para melhorar o estado da arte representado pelos sistemas de conservação que utilizam câmaras de meio aéreo, buscou-se desenvolver um sistema de armazenamento de alimentos frescos que considera o controle sobre a Margem Segura $[MS(\theta)]$ e as condições para minimizá-la, com o uso de um banho aquoso, no qual os produtos, já embalados, são mantidos imersos. Com esta técnica é possível obter um erro de regime estacionário $[E_{ssmax}(\theta)]$ menor que $0,10^{\circ}\text{C}$ e diferença máxima de temperatura entre dois pontos do banho $[\Delta\Theta_{max}(\theta)]$ menor que $0,30^{\circ}\text{C}$. Isto permite que os alimentos armazenados não congelem com um armazenamento seguro através do ajuste do *set point* a apenas $0,40^{\circ}\text{C}$ acima do ponto crítico, isto é, uma Margem Segura $[MS(\theta)]$ de $0,40^{\circ}\text{C}$.

Na hidroconservação, os produtos são armazenados de forma a ficarem totalmente imersos em um banho aquoso, que é mantido na temperatura ideal de armazenamento daquele produto específico. No caso de armazenamento simultâneo de diferentes produtos é considerada a temperatura, no ajuste do *set point*, para o produto que apresentar o mais elevado ponto de congelamento, para a obtenção da qualidade total dos alimentos armazenados sob hidroconservação.

As embalagens dos produtos frescos devem permitir um bom contato térmico com o banho aquoso e a troca gasosa com o meio externo.

1.5 Capacidade calorífica e condutividade térmica em hidroconservação

A capacidade calorífica por unidade de volume de um material pode ser calculada como o produto do seu calor específico por sua densidade. O calor específico e a densidade da água no estado líquido a $0,00^{\circ}\text{C}$ são

dados, respectivamente, por $4,22 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ e $999,87 \text{ g.m}^{-3}$. Assim, sua capacidade calorífica por unidade de volume é dada por $4219,45 \text{ J.°C}^{-1}.\text{m}^{-3}$. Da mesma forma, o calor específico e a densidade do ar no estado gasoso a $0,00\text{°C}$ são dados, respectivamente, por $1,01 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ e 1.29 g.m^{-3} (LIDE, 1996). Assim, sua capacidade calorífica por unidade de volume é dada por $1,30 \text{ J.°C}^{-1}.\text{m}^{-3}$, ou seja, 3245,73 vezes menor que a capacidade calorífica por unidade de volume da água.

Ademais, a condutividade térmica da água no estado líquido a $0,00\text{°C}$ e a do ar no estado gasoso a $0,00\text{°C}$, são dadas, respectivamente, por $561,0 \text{ mW/°C.m}$ e $24,1 \text{ mW/°C.m}$ (LIDE, 1996). Estes dados implicam que a água apresenta uma condutividade térmica 23,3 vezes melhor que a do ar, o que é importante para um sistema onde se busca minimizar as diferenças de temperatura com vistas à menor variação espacial possível.

A hidroconservação baseia-se na alta capacidade calorífica por unidade de volume e alta condutividade térmica da água, bem como na possibilidade de se ajustar o ponto de congelamento de uma solução aquosa com o uso de solutos adequados. De fato, a alta capacidade calorífica da água em uma câmara de hidroconservação funciona como uma espécie de amortecedor para variações da temperatura, pois é necessário fornecer (ou retirar) 3245,73 vezes mais energia de um banho aquoso do que de uma câmara aérea de mesmo volume, a fim de se observar a mesma variação da temperatura. A alta condutividade térmica da água age como um forte equalizador da temperatura, minimizando os gradientes térmicos existentes. Assim, a capacidade calorífica e a condutividade térmica da água facilitam a construção de banhos que viabilizem temperaturas homogêneas e estáveis, as quais auxiliam no controle da temperatura do produto armazenado. A variação lenta da temperatura do banho da hidroconservação viabiliza um maior grau de precisão no controle dessa variável.

A técnica de hidroconservação pode, preferencialmente, ser utilizada para produtos vegetais frescos de alto valor agregado como os

minimamente processados, seja para o atendimento institucional, seja para a venda em supermercados, sacolões e quitandas.

Uma limitação da técnica de hidroconservação está relacionada ao porte das câmaras. Aspectos como o volume de água, a pressão exercida pela água nas paredes da câmara de conservação e nas embalagens, o custo da estrutura da câmara com a robustez necessária para suportar esta pressão e a conveniência em se colocar e retirar produtos da câmara, limitam seu porte. Portanto, o volume máximo das câmaras de hidroconservação pode girar em torno de 500 litros⁽³⁾. A hidroconservação requer ainda a adequada cloração da água (50 – 125 ppm) para se evitar a proliferação de microorganismos.

Outro ponto importante considerado no desenvolvimento do plano de pesquisa foi quanto à velocidade de resfriamento dos produtos na hidroconservação. A água resfriada é um efetivo meio para retirada rápida de calor, uma vez que a transferência de calor entre a água e os alimentos frescos embalados é muito melhor que entre o ar e os mesmos. Produtos armazenados em hidroconservação resfriam de 25,00°C até próximo de 0,00°C em pouco mais de uma hora, enquanto que, quando armazenados em câmaras aéreas, esse processo pode levar mais de uma dezena de horas. Esta capacidade de transferência de calor da água tem sido largamente utilizada na técnica de hidrorresfriamento (*hydrocooling*) para a rápida retirada do calor de campo de produtos agrícolas recém-colhidos (GEESON, 1989).

1.6 Impactos sociais e qualidade de vida da população decorrentes de um bom sistema de armazenamento de alimentos frescos

Diante de novos conceitos de nutrição onde os alimentos não servem apenas para saciar a fome e fornecer energia ao organismo, mas também para prevenir o aparecimento de doenças típicas da vida moderna,

³ 500 litros - o porte de um *freezer* doméstico existente no mercado varia na faixa de 170 à 530 litros.

vêm entrando em cena os chamados alimentos funcionais ou nutracêuticos, representando um novo e lucrativo mercado para a indústria de alimentos (FUNDAÇÃO PROCON, 2003). A cada semana, surgem novos resultados sobre propriedades funcionais dos alimentos, indicando que os mercados para tais produtos irão se expandir acentuadamente nos próximos anos. Embora os números sejam escassos e contraditórios, algumas publicações indicam que os mercados para alimentos funcionais serão, por volta de 2010, da ordem de 500 bilhões de dólares por ano nos Estados Unidos, 250 bilhões na Europa e 60 bilhões no Japão (DIAS, 2002).

Vegetais frescos como frutas, verduras, legumes e raízes, consumidos *in natura*, são alimentos funcionais⁽⁴⁾ ricos em vitaminas, fibras, antioxidantes (vitamina E, C, betacaroteno), bioflavonóides e outros elementos essenciais a uma dieta saudável e equilibrada para todas as faixas etárias (GALANTE, 2003). Além disso, esses alimentos são livres de substâncias como colesterol e triglicérides e, principalmente no caso de frutas, apresentam uma concentração adequada de açúcares. Diante disto, os alimentos vegetais frescos não servem somente para saciar a fome e fornecer energia ao organismo, mas também servem para prevenir o aparecimento de doenças típicas da vida moderna.

A população brasileira está cada vez mais consciente desses aspectos dos alimentos frescos e exigente em relação à qualidade e funcionalidade dos alimentos que consome.

Entretanto, uma dificuldade existente no Brasil em relação a produtos vegetais frescos refere-se ao alto índice de perdas. Essas perdas estão relacionadas à baixa agregação de tecnologia em todas as etapas da cadeia de produção, distribuição e comercialização, ocorrendo basicamente devido ao manuseio, embalagens e transporte inadequados e à ineficiência dos sistemas de armazenamento e conservação (GORENSTEIN e GUTIERREZ,

⁴ O termo "alimentos funcionais" é utilizado para descrever aqueles que podem ter substâncias bioativas, capazes de reduzir o risco de doenças cardiovasculares, diabetes, câncer, osteoporose, além de regular as funções orgânicas. De um modo geral, todos os alimentos "in natura" são, por princípio, funcionais.

2000). Tais perdas têm um impacto direto no preço final desses produtos, limitando o acesso das camadas menos favorecidas da população. Por outro lado, a introdução de uma nova tecnologia recai na forma de produtos mais baratos para os consumidores (CONTINI, 1999). Nesse sentido, um sistema de armazenamento e conservação de produtos vegetais frescos mais eficiente, como o proposto, proporciona a redução dessas perdas, possibilitando, em última instância, o acesso de uma fatia maior da população a esses alimentos, podendo redundar em uma melhoria geral da saúde e, conseqüentemente da qualidade de vida.

Adicionalmente e, de modo especial nos grandes centros urbanos, além de qualidade e funcionalidade, a população tem demandado alimentos que agreguem praticidade e rapidez no preparo (SILVA, 2000). Essa tendência do mercado tem sido motivada por uma mudança no perfil da população, na qual se observa uma participação crescente das mulheres no mercado de trabalho, o aumento da população urbana e a diminuição do tamanho das famílias. Essas alterações provocaram grande aumento do número de pessoas que fazem suas refeições fora de casa ou que têm pouco tempo para prepará-las (TELES, 2001). Um segmento que atende a essa necessidade da vida moderna é o de vegetais frescos minimamente processados, cujo mercado tem tido um vertiginoso crescimento nos últimos anos. Segundo Cantwell, os produtos minimamente processados já representam 10% do mercado de produtos frescos nos Estados Unidos, movimentando de 8 a 10 bilhões de dólares por ano (CANTWELL, 2000). No Brasil, este nicho de mercado começou a ser explorado no ano de 1994 e, em apenas um ano, cresceu 68,9% em volume consumido no varejo do país, movimentando, em 1996, cerca de R\$ 400 milhões em vendas (ALMEIDA, 2002).

A agregação de tecnologia à cadeia de produção, distribuição, e comercialização de produtos vegetais frescos, através de um sistema de armazenamento e conservação mais eficiente, contribui também para uma maior inserção do Brasil nos mercados externos, atendendo às maiores

exigências desses em qualidade e padronização, e também possibilitando um maior excedente para exportação, através da redução das perdas (FIORAVANÇO, 2000).

Finalmente, um outro aspecto da maior relevância trata do atendimento à agricultura familiar, onde prioridades governamentais relativas às questões de segurança, abastecimento e oferta de alimentos frescos de qualidade para esta faixa da população brasileira de menor renda e com a participação produtiva desta faixa, é uma prioridade inserida no programa Fome Zero do Governo Federal (PRADO, 2003).

CAPÍTULO 2: Projeto instrumental e modelagem

Este capítulo descreve o desenvolvimento do projeto instrumental e apresenta os fundamentos teóricos para a instrumentação aplicada ao projeto, como os sistemas de aquisição de dados e controle, bem como ação de controle liga-desliga (*on-off*) em sistemas de malha fechada.

O presente capítulo apresenta também a modelagem do sistema de controle de temperatura do processo de armazenamento de alimentos.

2.1 Projeto instrumental

O projeto instrumental para testes e validação da metodologia para a conservação de alimentos frescos foi desenvolvido com base em um sistema de controle automático para operar em malha fechada. O diagrama de blocos apresentado na figura 2.1 ilustra a arquitetura do sistema de controle, a qual envolve o sensor da variável a ser controlada, o condicionador do sinal, o amostrador do sinal, o digitalizador do sinal e o atuador para controle do processo.

Figura 2.1: Arquitetura do sistema de controle automático construído

Com base nas características do projeto instrumental, que envolvem um sistema de controle automático de temperatura para operação em malha fechada, os seguintes parâmetros foram considerados:

- precisão: melhor ou igual a $0,01^{\circ}\text{C}$
- sensibilidade $\geq 100,00 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$
- linearidade: 100%
- taxa de conversão A/D $\geq 0,1 \text{ amostra/seg}$
- resolução $\leq 0,01^{\circ}\text{C}$
- faixa de temperatura de operação: $-10,00^{\circ}\text{C}$ a $+30,00^{\circ}\text{C}$

Para o projeto utilizou-se um sensor de temperatura do tipo resistência de platina, por apresentar características que garantem a confiabilidade, sensibilidade, linearidade adequadas e faixa de temperatura de operação, requeridas para a implementação do projeto.

Os termômetros de resistência são sensores de temperatura que operam baseados no princípio da variação da resistividade elétrica de um metal em função da temperatura, sendo confeccionados com fios altamente purificados de platina, níquel ou cobre. Suas principais características são: a alta estabilidade mecânica e térmica, resistência à contaminação, relação resistência/temperatura praticamente linear, desvio com o uso e envelhecimento desprezíveis, além de alto sinal elétrico de saída, o que auxilia na etapa de conversão analógico-digital desse sinal, para o seu processamento digital.

Optou-se por trabalhar com o termômetro de resistência de platina (PT100). Utilizou-se um modelo importado, específico para uso laboratorial, apresentando um erro absoluto inferior a $0,01^{\circ}\text{C}$ na faixa de temperatura de operação requerida (informação verbal)⁽⁵⁾.

O elemento primário deste tipo de sensor é um fio de platina de alta pureza, encapsulado num bulbo de vidro ou cerâmica. Os valores de resistência são padronizados a uma temperatura fixa, neste caso $100,00\Omega$ a $0,00^{\circ}\text{C}$, com um coeficiente de variação linear em função da temperatura $\alpha=0,39\ \Omega\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, (ECIL, 1998). A eq. (4) expressa a dependência da resistência elétrica (em Ω) com a temperatura (em $^{\circ}\text{C}$) em sensores do tipo PT100.

$$R_s(\theta) = 100,00 + 0,39\theta \quad (4)$$

onde $R_s(\theta)$ é a resistência elétrica do PT100 e θ a temperatura.

⁵ Informação obtida junto à empresa Fly-Ever, fabricante da unidade de digitalização utilizada no projeto.

No projeto, foi utilizada a conexão a três fios para o sensor de temperatura PT100. Esta configuração fornece uma conexão numa extremidade do sensor e duas na outra. Desta forma, o sensor PT100, quando conectado a um circuito condicionador de sinal, projetado para aceitar os três fios, viabiliza a compensação da resistência do cabo de conexão entre sensor e circuito condicionador de sinal bem como dos efeitos da variação da temperatura ambiente sobre ele. A figura 2.2 ilustra o diagrama elétrico para a conexão do sensor de temperatura a três fios.

Figura 2.2: Diagrama elétrico para a conexão do sensor de temperatura a três fios para a compensação dos efeitos da resistência R_c do cabo de conexão

Para o diagrama elétrico apresentado na figura 2.2, são válidas as equações:

$$v_1(\theta) = [2R_c + R_s(\theta)]I \quad (5)$$

$$v_2(\theta) = R_c I \quad (6)$$

A compensação do efeito introduzido pelo cabo de leitura da temperatura é obtida subtraindo-se da tensão $v_1(\theta)$ duas vezes o valor da tensão $v_2(\theta)$, ou seja

$$v_{final}(\theta) = v_1(\theta) - 2v_2(\theta) \quad (7)$$

Substituindo na equação (7) as equações (5) e (6), resulta em:

$$v_{final}(\theta) = R_s(\theta).I \quad (8)$$

Para digitalizar o sinal analógico $v_{final}(\theta)$, é necessário amostrá-lo, a fim de se obter um conjunto finito de amostras. A amostragem é periódica e deve ser realizada a uma taxa mínima de forma a atender as condições de reconstrução ditadas no teorema de Nyquist, para se evitar o efeito de *aliasing* do sinal que é discretizado no tempo.

Esclarecendo melhor este ponto, considere-se um sinal analógico $x_a(t)$ a ser discretizado e sua transformada de Fourier $X_a(j\Omega)$ representados respectivamente por:

$$x_a(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_a(j\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega \quad (9)$$

$$X_a(j\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x_a(t) e^{-j\Omega t} dt \quad (10)$$

onde Ω é a frequência do sinal analógico $x_a(t)$.

Sendo n um número natural, a seqüência $x(n)$ é dada por:

$$x(n) = x_a(nT) \quad (11)$$

é dita derivada de $x_a(t)$ por amostragem periódica e T é chamado período de amostragem. O inverso de T é a freqüência de amostragem ou taxa de amostragem. Para determinar quais as condições necessárias para que a seqüência $x(n)$ represente o sinal original $x_a(t)$, é conveniente relacionar a transformada de Fourier contínua no tempo de $x_a(t)$, ou seja $X_a(j\Omega)$ com a transformada de Fourier discreta no tempo da seqüência $x(n)$, isto é $X(e^{j\omega})$, onde

$$\omega = \Omega T \quad (12)$$

Segundo Oppenheim, $X(e^{j\omega})$ pode ser expressa pelo seguinte somatório:

$$X(e^{j\omega}) = \frac{1}{T} \sum_{r=-\infty}^{\infty} X_a\left(\frac{j\omega}{T} + j\frac{2\pi r}{T}\right) \quad (13)$$

Alternativamente, a eq. (13) pode ser expressa em termos da variável Ω na seguinte forma:

$$X(e^{j\Omega T}) = \frac{1}{T} \sum_{r=-\infty}^{\infty} X_a\left(j\Omega + j\frac{2\pi r}{T}\right) \quad (14)$$

As equações (13) e (14) tornam clara a relação entre a transformada de Fourier contínua no tempo e a transformada de Fourier de uma seqüência obtida por amostragem periódica de um sinal contínuo no

tempo. Por exemplo, se $X_a(j\Omega)$ tem sua representação gráfica como a ilustrada na figura 2.3(a), então $X(e^{j\omega})$ terá sua representação gráfica como a ilustrada na figura 2.3(b) se $\Omega_o/2 > \pi/T$. Na figura 2.3(b), nota-se que o período de amostragem T é muito grande, de modo a fazer com que as versões deslocadas de $X_a(j\Omega)$ se sobreponham.

Com base na figura 2.3(c), fica claro que se $\Omega_o/2 < \pi/T$, isto é, se a frequência de amostragem tiver um valor de, pelo menos, duas vezes a maior frequência de $X_a(j\Omega)$, então $X(e^{j\omega})$ será idêntica a $X_a(j\Omega)$ no intervalo $-\pi < \omega < \pi$. Neste caso não ocorre *aliasing* e o sinal analógico $x_a(t)$ pode ser reconstruído a partir das amostras $x_a(nT)$, (OPPENHEIM, 1975).

Figura 2.3 (a) Transformada de Fourier de um sinal contínuo no tempo.

Figura 2.3 (b) Transformada de Fourier do sinal discreto no tempo obtido por amostragem periódica. O período de amostragem é grande, de forma que as repetições periódicas da transformada contínua no tempo se sobrepõem.

Figura 2.3 (c) O mesmo que (b), mas com o período de amostragem pequeno o suficiente para que as repetições periódicas da transformada contínua no tempo não se sobreponham.

Para o projeto, uma vez que o sinal discretizado no tempo é a evolução temporal da temperatura no qual as frequências envolvidas são menores que 0,01Hz, utilizou-se uma taxa de amostragem de 200Hz, o que satisfaz o Teorema de Nyquist.

Os circuitos para amostragem de um sinal analógico têm acoplado um circuito para reter por um tempo mínimo, segundo as constantes de tempo pré-definidas, o nível de tensão amostrado. Esses circuitos são chamados de retentores de amostra (*sample-and-hold*) (HOROWITZ,1983). A operação de conversão do sinal de analógico para digital necessita de algum tempo para ser realizada. Durante a conversão, o nível de tensão na entrada do conversor Analógico/Digital (A/D) deve permanecer constante (SHEINGOLD,1976).

Assim, o sinal analógico do sensor de temperatura, que já foi condicionado, amostrado e mantido em um valor constante, pode ser convertido em um número em base dois proporcional ao valor da amostra, o qual é representado por uma palavra digital cujo número de *bits* depende do conversor A/D empregado.

Na etapa de condicionamento e digitalização do sinal, ocorre a sua amplificação por amplificadores operacionais, e filtragem para eliminação

de ruído e amostragem. No projeto, optou-se pelo uso da unidade de digitalização da Fly-Ever, modelo FE-3000, que possui precisão de $0,01^{\circ}\text{C}$, entrada para conexão a três fios de sensor PT100 e saída serial. Esta unidade utiliza o microcontrolador GP32 da Motorola. A conversão A/D é feita pelo conversor ADS7822P da Burr-Brown de 12 bits que pode operar com uma taxa de amostragem de até 75KHz. No presente projeto, a temperatura é amostrada com uma taxa de 200Hz pela unidade de digitalização, isto é, com um período de amostragem de 5ms.

O número de *bits* que estabelece o comprimento da palavra digital gerada na conversão determina a precisão da aproximação que é feita na conversão A/D. Quanto maior for o número de *bits* do conversor, maior será a precisão, pois a faixa dinâmica do sinal analógico é subdividida em 2^n valores digitais possíveis para a quantização do valor analógico, onde n é o número de *bits* do conversor. Como no projeto foi utilizado um conversor de 12 *bits*, há até 4096 valores digitais possíveis.

Para a conversão A/D, a etapa de condicionamento do sinal transforma linearmente a faixa de temperatura de $-10,00^{\circ}\text{C}$ a $+30,00^{\circ}\text{C}$ na faixa de tensão de -2,50V a +2,50V, onde esta faixa é subdividida em 4096 passos pelo conversor A/D de 12 *bits* utilizado. Dessa forma, cada passo de tensão tem um valor de 1,22mV que corresponde a um passo de temperatura de $0,0098^{\circ}\text{C}$ e cada $1,00^{\circ}\text{C}$ corresponde a 125,00mV. Assim, verifica-se que os parâmetros requeridos de projeto quanto à precisão, resolução e sensibilidade estão atendidos.

O *software* de controle faz a leitura dos dados de temperatura da câmara de armazenamento via interface serial, para realizar o controle em malha fechada do tipo liga-desliga. O sistema gera um sinal de controle, segundo um algoritmo dedicado, o qual também viabiliza o armazenamento dos dados lidos em arquivo. O *software* de controle foi desenvolvido em *LabView*. A opção pelo desenvolvimento em *LabView* foi baseada no fato de que esta ferramenta apresenta a vantagem de a programação ser feita em

ambiente gráfico com a utilização de diagrama de fluxo de sinais, o que facilita e agiliza o desenvolvimento de sistemas. Outra razão para essa opção foi a possibilidade de crescer no conhecimento desta ferramenta de desenvolvimento.

O microcomputador utilizado é um Pentium III de 650Mhz no qual está instalada a placa de I/O modelo CIO-DAS08/Jr-AO da ComputerBoard, Inc. com 8 entradas e 8 saídas digitais, e 8 entradas e 2 saídas analógicas (12 bits) (COMPUTERBOARD, 1994).

O sinal de realimentação para o controle do processo utiliza o *bit* menos significativo da saída digital da placa CIO-DAS08/Jr-AO, que é mapeada no endereço 303H da RAM do microcomputador.

Esta saída é acoplada a um *driver* de potência, baseado em relé, o qual gera um sinal de acionamento em potência que é aplicado diretamente à alimentação da unidade de refrigeração para controle da temperatura do processo de armazenamento dos alimentos. Este *driver* foi projetado e construído especialmente para este projeto, possuindo 3 canais com entradas digitais (0 – 5 Volts) e saídas a relé normalmente aberto (NA) acionados por transistor. Possui ainda uma chave seletora de 3 posições por canal que permite selecionar três estados para cada saída de potência: energizada permanentemente, desenergizada permanentemente ou sob controle do microcomputador, com um led indicador do estado da saída de cada canal.

2.2 Ação de controle liga-desliga (*on-off*) em sistemas de malha fechada

A ação liga-desliga de controle em sistemas de malha fechada é uma das mais simples e, portanto, mais econômica para implementação. O

controlador liga-desliga fornece apenas dois sinais de controle: zero (desligado) ou um nível constante (ligado).

O controlador liga-desliga pode ser modelado por um relé, conforme mostra a figura 2.4, onde $r(t)$ é o sinal de referência (*set point*), $e(t)$ é o sinal de erro, $u(t)$ é o sinal de controle e $y(t)$ é o sinal de saída (variável controlada) (KUO, 1985).

Figura 2.4: Diagrama de blocos para um sistema de controle do tipo liga-desliga

O sinal de controle $u(t)$ pode assumir apenas dois valores, conforme o erro resultante seja positivo ou negativo. Assim, pode-se escrever que:

$$u(t) = \begin{cases} U_1 & \text{se } e(t) > 0 \\ U_2 & \text{se } e(t) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

Entretanto, nota-se que poderá haver uma inconsistência quando $e(t)$ for igual a zero. Adicionalmente, na presença de ruído, podem ocorrer chaveamentos espúrios, ou, dependendo da dinâmica do processo, chaveamentos muito freqüentes, quando o sinal $e(t)$ estiver próximo de zero. Chaveamentos espúrios ou muito freqüentes comprometem a vida útil do dispositivo de acionamento e a da própria unidade de refrigeração, além de prejudicar o controle do processo.

Para evitar este problema, utilizou-se no projeto o controlador liga-desliga com histerese, cuja curva característica é mostrada na figura 2.5. Para este tipo de controlador o seguinte comportamento é observado:

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{é necessário que o valor de } e(t) \text{ desça abaixo de } -E_2 \text{ para que haja um chaveamento para } U_2; \\ U_2, & \text{é necessário que o valor de } e(t) \text{ ultrapasse o valor de } E_1 \text{ para que haja um chaveamento para } U_1. \end{cases} \quad (16)$$

Figura 2.5: Curva característica para o controlador liga-desliga com histerese

A figura 2.6 ilustra os sinais de saída e de controle para o controlador liga-desliga com histerese. A resposta, em regime estacionário, é oscilante em torno do valor de referência (*set point*). A amplitude e a frequência da oscilação são funções do intervalo $[-E_2, E_1]$ e da dinâmica do processo. Assim, a escolha deste intervalo considera o compromisso existente entre a precisão desejada, a dinâmica do processo e os níveis de ruído presentes no sistema energizado.

Figura 2.6: Sinal de saída $y(t)$ e de controle $u(t)$ para o controlador liga-desliga com histerese.

2.3 Modelagem do sistema de controle de temperatura do processo de armazenamento de alimentos.

Para a modelagem termodinâmica da câmara de armazenamento operando como hidroconservador, considerou-se o diagrama ilustrado na figura 2.7. Observa-se que o sistema em questão é isolado termicamente e possui um agitador do meio interno da câmara para equalizar a temperatura que é sensorizada por um sensor PT100. O balanço energético deste sistema é obtido a partir da consideração de dois fluxos de calor (ou de potência): o fluxo $P_1(t)$, referente ao calor (ou potência) que entra na câmara devido a imperfeição do isolamento e o fluxo de calor (ou potência) $P_2(t)$,

referente ao calor que é retirado da câmara através do evaporador da unidade de refrigeração, quando esta está ligada. Como o algoritmo de controle utilizado é o liga-desliga (*on-off*) atuando sobre a alimentação da unidade de refrigeração, existem duas situações a serem modeladas: a primeira é quando essa unidade está desligada e o único fluxo de calor existente é $P_1(t)$, e a segunda é quando a unidade de refrigeração está ligada na qual os dois fluxos $P_1(t)$ e $P_2(t)$ atuam sobre o sistema.

Figura 2.7: Diagrama termodinâmico esquemático da câmara de armazenamento.

Considerando inicialmente a situação em que a unidade de refrigeração está desligada, é oportuno salientar que o fluxo de calor $P_1(t)$ é função da temperatura ambiente $\theta_a(t)$, da resistência térmica ($R_{\theta 1}$), oferecida pelo isolamento à passagem do fluxo $P_1(t)$, e da capacidade calorífica do sistema (C).

O modelo deste sistema é análogo ao da carga de um capacitor em um circuito elétrico RC, conforme ilustra a figura 2.8.

Figura 2.8: Circuito elétrico RC.

No circuito da figura 2.8, $e(t)$ é a tensão da fonte de tensão, R é a resistência elétrica do circuito, C' é a capacitância do capacitor, $v_c(t)$ é a tensão entre as placas do capacitor e $i(t)$ é a corrente no circuito. Aplicando a lei das malhas, pode-se escrever:

$$e(t) = R \cdot i(t) + \frac{Q(t)}{C'} \quad (17)$$

onde $Q(t)$ é a carga do capacitor. Neste circuito, o capacitor é carregado através do fluxo de carga representado pela corrente $i(t)$. Assim, pode-se escrever que

$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (18)$$

Combinando as equações (17) e (18), obtém-se:

$$e(t) = R \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{1}{C'} Q(t) \quad (19)$$

Para o capacitor vale a seguinte relação:

$$Q(t) = C' \cdot v_c(t) \quad (20)$$

Dessa forma, a eq. (19) pode ser escrita em termos de $v_c(t)$, como segue:

$$e(t) = RC' \frac{dv_c(t)}{dt} + v_c(t) \quad (21)$$

Aplicando-se a transformada de Laplace na eq. (21), obtém-se:

$$E(s) = RC' s \cdot V_c(s) + V_c(s) \quad (22)$$

onde $s = \sigma + j\omega$, ou ainda

$$E(s) = (RC' s + 1) \cdot V_c(s) \quad (23)$$

Considerando a transformada de Laplace do sinal da fonte $E(s)$ como a variável de entrada do sistema e a transformada de Laplace da tensão entre as placas do capacitor $V_c(s)$ como a variável de saída do sistema, a sua função de transferência $G(s)$ pode ser escrita como segue:

$$G(s) = \frac{V_c(s)}{E(s)} = \frac{1}{RC' s + 1} \quad (24)$$

onde o produto RC' é a constante de tempo do sistema, normalmente designada por τ . Assim, $G(s)$ é dada por:

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (25)$$

Nota-se que $G(s)$ é a função de transferência típica de um sistema de 1^a ordem com constante de tempo τ (COUGHANOWR, 1965).

A solução da equação diferencial (21), para a condição inicial na qual a carga do capacitor é nula, isto é, $Q(0) = v_c(0) = 0$, é dada por:

$$v_c(t) = e(t) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (26)$$

O comportamento da evolução temporal de $v_c(t)$ durante a carga do capacitor, conforme expresso pela eq. (26), é ilustrado na figura 2.9, onde E é um valor instantâneo de $e(t)$ em um t qualquer.

Figura 2.9: Comportamento da evolução temporal de $v_c(t)$ durante a carga do capacitor.

Aplicando-se a analogia mencionada entre o circuito elétrico analisado e o sistema térmico em questão, é possível identificar as seguintes equivalências:

- $e(t)$ $\longrightarrow$ $\theta_a(t)$ (temperatura ambiente)
- $v_c(t)$ $\longrightarrow$ $\theta(t)$ (temperatura interna da câmara)
- $i(t)$ $\longrightarrow$ $P_1(t)$ (fluxo de calor que entra na câmara)

- R $\longrightarrow$ $R_{\theta 1}$ (resistência térmica do isolamento)
- C' $\longrightarrow$ C (capacidade calorífica do sistema)

Assim, a expressão da evolução temporal da temperatura interna da câmara $\theta(t)$ na situação em que a unidade de refrigeração está desligada, pode ser escrita como:

$$\theta(t) = \theta_a(t) \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{R_{\theta 1} C}} \right) \quad (27)$$

Na linguagem de sistemas de controle, a curva expressa pela eq. (27) é a resposta do sistema a um sinal de entrada tipo degrau de temperatura, cuja transformada de Laplace é dada por θ_a/s , na qual o produto $R_{\theta 1} C$ é a constante de tempo térmica (τ_D) do sistema na situação em que a unidade de refrigeração está desligada.

Para determinar o valor de τ_D , foi aplicado um degrau de temperatura de $25,00^\circ\text{C}$ (temperatura ambiente) no sistema que estava inicialmente com a temperatura interna de câmara $\theta(t) = 0,00^\circ\text{C}$. O resultado deste ensaio é mostrado na figura 2.10, o qual possibilitou a determinação de τ_D como sendo o instante em que a temperatura da câmara atingiu o valor de $15,80^\circ\text{C}$ (63,2% de $25,00^\circ\text{C}$). Assim, obteve-se que $\tau_D = 2294$ minutos. Desta forma, a função de transferência do sistema, na situação em que a unidade de refrigeração está desligada, é dada por

$$G_D(s) = \frac{1}{2294s + 1} \quad (28)$$

Figura 2.10: Resposta do sistema a um sinal de entrada tipo degrau de temperatura com a magnitude de 25,00°C

Considerando agora a situação na qual a unidade de refrigeração está ligada, os dois fluxos de calor $P_1(t)$ e $P_2(t)$ estarão atuando sobre o sistema. Como a potência $P_2(t)$ é muito maior que a potência $P_1(t)$, a potência líquida (ou fluxo líquido de calor) $P_L(t)$ será dado por:

$$P_L(t) = P_2(t) - P_1(t) \cong P_2(t) \quad (29)$$

onde $P_L(t)$ tem, portanto, o mesmo sentido de $P_2(t)$, ou seja, saindo da câmara.

Neste caso, a função de transferência do sistema terá a mesma forma expressa na eq. (25), entretanto o valor da constante de tempo será diferente daquele determinado para a situação em que a unidade de refrigeração estava desligada, pois a resistência térmica ($R_{\theta 2}$) oferecida pelo sistema à passagem do fluxo $P_2(t)$ é muito menor que resistência térmica ($R_{\theta 1}$) oferecida pelo isolamento à passagem do fluxo $P_1(t)$. Assim, a constante de tempo do sistema na situação em que a unidade de refrigeração está ligada é dada por:

$$\tau_L \cong R_{\theta 2} C \ll \tau_D \quad (30)$$

A energia total $E_T(t)$ (ou calor total) retirada da câmara durante o intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$, é dada pela integral da potência líquida $P_L(t)$ no intervalo de tempo ΔT , ou seja:

$$E_T(t) = \int_{t_1}^{t_2} P_L(t).dt \quad (31)$$

No sistema em questão, a potência líquida $P_L(t)$ é constante ao longo do tempo, na faixa de temperaturas consideradas. Assim, a energia total $E_T(t)$ retirada da câmara é diretamente proporcional ao intervalo de tempo Δt em que a unidade de refrigeração permanece ligada. Isto pode ser verificado nos gráficos das figuras 2.11 e 2.12 que ilustram os resultados de ensaios realizados nos quais, partindo-se da temperatura de 21,00°C interna à câmara, a unidade de refrigeração permaneceu ligada por diferentes intervalos de tempo Δt .

Figura 2.11: Curvas de resfriamento da câmara baseada em hidroconservação para vários intervalos de tempo Δt de permanência da unidade de refrigeração ligada.

Figura 2.12: Relação entre a variação de temperatura $\Delta\theta$ e o intervalo de tempo Δt de permanência da unidade de refrigeração ligada. O coeficiente R^2 para aproximação desta relação por uma reta é de 0,99.

De acordo com a 1ª lei da termodinâmica, uma vez que o sistema não realiza trabalho, a energia total $E_T(t)$ retirada da câmara durante o intervalo de tempo Δt , pode também ser calculada através da variação da energia interna do sistema, cuja temperatura sofre uma variação $\Delta\theta(t) = \theta_2 - \theta_1$, durante o intervalo Δt , conforme expresso na eq. (32).

$$E_T(t) = C \cdot \Delta\theta(t) \quad (32)$$

onde C é a capacidade calorífica do sistema (SEARS *et al.*, 1986).

Como a capacidade calorífica por unidade de volume da água é $4219,45 \text{ J/}^\circ\text{C.m}^3$, a capacidade calorífica da câmara baseada em hidroconservação, que comporta um volume de 55,3 litros de água, é de $233,34 \text{ J/}^\circ\text{C}$. Substituindo este valor na eq. (32), obtém-se:

$$E_T(t) = 233,34 \cdot \Delta\theta(t) \quad (33)$$

Utilizando-se a informação contida na eq. (33), o gráfico da figura 2.12 pode ser reelaborado com o eixo das ordenadas expressando a energia total $E_T(t)$ retirada da câmara baseada em hidroconservação, conforme ilustra a figura 2.13.

Figura 2.13: Relação entre energia total $E_T(t)$ retirada da câmara baseada em hidroconservação e o intervalo de tempo Δt de permanência da unidade de refrigeração ligada. O coeficiente R^2 para aproximação desta relação por uma reta é de 0,99.

Dessa forma, foi possível verificar que, quando a unidade de refrigeração está ligada, o fluxo de calor que é retirado da câmara $P_L(t)$ é, de fato, uma constante no tempo, fazendo com que a variação $\theta(t)$ da temperatura interna da câmara seja uma reta decrescente com inclinação de $-0,24^\circ\text{C}/\text{min}$, conforme se observa na figura 2.11. Na linguagem de sistemas de controle, cada uma das curvas dessa figura é a resposta do sistema a um sinal de entrada tipo rampa de temperatura, cuja transformada de Laplace é dada por $-0,24/s^2$.

A figura 2.14 ilustra graficamente a resposta de um sistema típico de 1^a ordem a um sinal de entrada tipo rampa com inclinação (a) que é expresso genericamente por a/s^2 (SEBORG, *et al*, 1989).

Figura 2.14: Resposta típica de um sistema de primeira ordem a um sinal de entrada tipo rampa dado por a/s^2 .

A partir dos resultados dos ensaios mostrados na figura 2.11, nos quais foram aplicadas entradas tipo rampa de temperatura no sistema, foi possível determinar o valor da constante de tempo τ_L do sistema como sendo de 1 minuto. Assim, a função de transferência $G_L(s)$ para este caso será dada por:

$$G_L(s) = \frac{1}{s + 1} \quad (34)$$

Dessa forma, o modelo geral deste sistema de controle, baseado em um algoritmo liga-desliga, envolverá duas funções de transferência, $G_D(s)$ e $G_L(s)$, para a planta, sendo que a entrada aplicada à $G_D(s)$ é um degrau de temperatura com a magnitude da temperatura ambiente e a entrada aplicada à $G_L(s)$ é uma rampa decrescente de temperatura com inclinação de $-0,24^\circ\text{C}/\text{min}$.

O diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada completo é ilustrado na figura 2.15.

Figura 2.15: O diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada (fluxo das bombas de agitação de 4 litros/minuto).

O ramo de realimentação contém os blocos que modelam a atuação da unidade de digitalização sobre o sinal de temperatura $\theta(s)$ medido em [°C]. A etapa de condicionamento do sinal faz uma transformação linear do sinal de temperatura em um sinal de tensão $V(s)$, segundo a seguinte expressão :

$$V(s) = 0,12\theta(s) - 1,25 \quad (35)$$

O sinal $V(s)$ é amostrado com período de amostragem de 5 segundos e retido para a digitalização pelo bloco S/H. Em seguida, o sinal digitalizado $V(s)$ sofre outra transformação linear, dada pela eq. (36), que trata-se de um ajuste de escala, a fim de voltar a expressar o sinal de temperatura $\theta(s)$ medido em [°C], para, finalmente, compará-lo com o sinal de referência $R(s)$ expresso também em [°C].

$$\theta(s) = 8V(s) + 10 \quad (36)$$

Para se obter a função de transferência global do sistema, considere-se o diagrama de blocos genérico de um sistema de controle em malha fechada como o ilustrado na figura 2.16.

Figura 2.16: O diagrama de blocos genérico de um sistema de controle em malha fechada.

Da álgebra de diagrama de blocos, tem-se que:

$$Y(s) = G(s)E_r(s) \quad (37)$$

$$E_r(s) = R(s) - H(s)Y(s) \quad (38)$$

Combinando as equações (37) e (38), obtém-se que:

$$Y(s) = G(s)R(s) - G(s)H(s)Y(s) \quad (39)$$

ou

$$Y(s).(1 + G(s)H(s)) = G(s)R(s) \quad (40)$$

Assim, a função de transferência global do sistema $G_G(s)$ é dada por:

$$G_G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (41)$$

Dessa forma, identificando cada bloco da figura 2.15 e aplicando na eq. (41), determinou-se a função de transferência global do sistema para o caso em que a unidade de refrigeração está desligada $G_{GD}(s)$ e para o caso em que esta está ligada $G_{GL}(s)$, conforme expresso nas equações (42) e (43).

$$G_{GD}(s) = \frac{\theta_a}{s(2294s + 1) + \theta_a} \quad (42)$$

$$G_{GL}(s) = \frac{-0,24}{s^2(s + 1) - 0,24} \quad (43)$$

As figuras 2.17 e 2.18 ilustram os resultados de simulações do modelo, obtidos com o uso do *software* MATLAB.

Figura 2.17: Resultado da simulação do modelo obtido, para um *set point* de 25,00°C, com o sistema inicialmente a temperatura de 0,00°C.

Figura 2.18: Resultado da simulação do modelo obtido, para um *set point* de 1,00°C, com o sistema inicialmente a temperatura de 25,00°C.

CAPÍTULO 3: Instrumento automatizado para conservação de alimentos frescos com base na técnica de hidroconservação.

Este capítulo enfoca a implementação do instrumento automatizado para conservação de alimentos frescos e aborda uma descrição detalhada do *hardware*, do *software* e seus acoplamentos para a correta operação da câmara de conservação baseada na técnica de hidroconservação.

3.1 Descrição do *Hardware*

O *hardware* desenvolvido é composto por uma unidade de refrigeração, uma câmara de hidroconservação e um sistema de controle térmico para a câmara de armazenamento de alimentos em malha fechada.

A unidade de refrigeração, conforme ilustra a figura 3.1, tem capacidade de 4200 BTU/h, sendo constituída por um compressor modelo TCA-1042-E fabricado pela ELGIN, acionado por motor elétrico 220VCA, um condensador com ventilação forçada e um evaporador, em forma de serpentina circundando toda a câmara, o qual fica submerso no banho. Esta unidade de refrigeração utiliza o fluido refrigerante R12, que é comprimido pelo conjunto motor/compressor contra uma válvula de expansão termostática na linha de alta pressão. Após vencer a restrição desta válvula, o fluido refrigerante sofre uma expansão na serpentina do evaporador. Esta expansão faz com que o refrigerante perca pressão, evapore e resfrie, retirando calor do banho (RABELLO, 1993).

A fim de equalizar a ação de refrigeração em todo o volume da câmara, o evaporador foi construído de tal forma que, logo depois do fluido sofrer a expansão, a serpentina se divide em quatro circuitos independentes, levando a ação de refrigeração a quatro diferentes níveis de profundidade da câmara simultaneamente. Depois de percorrer toda a câmara, os circuitos voltam a se unir num único duto de retorno. A figura 3.2 ilustra a organização da serpentina na câmara de conservação.

O refrigerante continua seu circuito pela linha de baixa pressão, até o condensador, onde, através de um radiador com ventilação forçada, o calor retirado do banho é liberado para o ambiente.

Toda vez que a unidade de refrigeração é desligada, um cuidado especial deve ser tomado quanto a aguardar um intervalo de tempo

mínimo de 2 minutos para que ocorra o equilíbrio bórico entre os circuitos de alta e baixa pressão, antes da nova partida no sistema. A não observância deste pré-requisito pode causar danos ao compressor.

Figura 3.1: Unidade de refrigeração para a câmara de conservação de alimentos frescos baseada em hidroconservação.

Os componentes da unidade de refrigeração indicados na figura 3.1 são identificados como segue:

- (1) Condensador;
- (2) Pressostato de segurança;
- (3) Ventilador do condensador;
- (4) Reservatório de fluido refrigerante;
- (5) Compressor.

A câmara de armazenamento utilizada foi construída a partir de uma caixa com isolamento térmico de poliuretano (tipo *camping*), da marca

Coleman, com as seguintes medidas internas: comprimento x largura x altura = 64 x 32 x 27cm, com volume total de 55,3 litros. O volume útil, entretanto, para armazenamento de produtos é de aproximadamente 32 litros, pois são descontados os volumes ocupados pelo evaporador (e sua borda) e pelos agitadores.

Quando operando como câmara aérea, uma ventoinha é utilizada para forçar a circulação do ar, conforme ilustra a figura 3.2.

Quando operando como hidroconservador, conforme ilustra a figura 3.3, a câmara é preenchida com uma solução aquosa, composta de água, Hipoclorito de Sódio (100 ppm) e um produto anti-congelante (Etileno Glicol a 2% ou Cloreto de Sódio a 20 gramas/litro). Nesta configuração, um agitador constituído por duas bombas submersas, com capacidade de bombeio de 4 litros por minuto (cada uma), para forçar a circulação da solução, é também utilizado. Assim, o espaço da câmara de conservação é ocupado pela serpentina do evaporador, o sensor (PT100) para monitorar a temperatura e os produtos a serem armazenados, devidamente embalados.

Na câmara baseada em hidroconservação, as embalagens que contêm os produtos alimentícios devem satisfazer algumas condições como: devem ser impermeáveis para evitar contato direto do produto com a solução aquosa, devem ser flexíveis, moldando-se ao formato do produto sob ação da pressão da solução aquosa de modo a garantir um bom contato térmico do produto com o banho. Devem ainda possibilitar a troca gasosa do produto com o meio externo a fim de permitir a sua respiração.

A questão da adequação de embalagens à essa nova técnica de conservação de alimentos, baseada em hidroconservação, deverá ser objeto de pesquisas futuras a fim de satisfazer as condições mencionadas e conferir conveniência aos usuários do sistema nas operações de colocação e retirada de produtos da câmara.

No presente trabalho de validação da técnica de hidroconservação foram utilizadas embalagens de filme flexível de polietileno de alta densidade, sendo uma embalagem menor com fecho tipo *ziploc*, denominada primária, na qual os produtos eram diretamente colocados e uma outra embalagem maior, denominada secundária, na qual uma ou mais embalagens primárias eram posicionadas. No fundo da embalagem secundária era colocado um lastro para forçar a submersão do conjunto na solução aquosa. A extremidade aberta da embalagem secundária ficava para fora da câmara de armazenamento a fim de permitir a troca gasosa com a atmosfera externa o que também era possibilitado por uma pequena abertura deixada no fecho *ziploc* da embalagem primária. A figura 3.3 ilustra o conjunto de embalagens utilizado posicionado na câmara de hidroconservação.

Figura 3.2: Vista da ramificação do evaporador da câmara de conservação. Medidas internas da câmara: comprimento x largura x altura = 64 x 32 x 27cm.

A figura 3.4 ilustra uma vista externa da unidade de digitalização e a figura 3.5 ilustra seu interior onde pode ser visualizada sua placa de circuito impresso.

Figura 3.3: Câmara de conservação na configuração de hidroconservador.

Figura 3.4: Unidade de digitalização – vista externa

Figura 3.5: Unidade de digitalização – vista interna

A figura 3.6 ilustra uma vista externa do *driver* de potência, a figura 3.7 ilustra seu interior onde pode ser visualizada sua placa de circuito impresso e a figura 3.8 ilustra o esquemático eletrônico de um dos seus canais.

Figura 3.6: *Driver* de potência – vista externa

Figura 3.7: *Driver* de potência – vista interna

Figura 3.8: *Driver* de potência – esquemático eletrônico de um dos canais.

A figura 3.9 ilustra uma vista geral do *hardware* implementado.

Figura 3.9: *Hardware* implementado - detalhes da unidade de digitalização e do *driver* de potência, unidade de refrigeração, computador e câmara de conservação.

3.2 Descrição do *software* de controle da câmara de conservação de alimentos frescos

O *software* de aquisição de dados e controle foi implementado com a ferramenta da *National Instruments*, denominada *LabView*, a qual apresenta a vantagem de a programação ser feita com diagrama de fluxo de sinais em ambiente gráfico, o que facilita e agiliza o desenvolvimento de aplicações. O *LabView* permite a construção de instrumentos virtuais (“VIs”) através de dois ambientes gráficos: o PAINEL DE CONTROLE e o DIAGRAMA DE FLUXO DE SINAIS. O Painel de Controle, conforme ilustra a figura 3.10, simula o painel de um instrumento que o programador cria onde são colocados os indicadores, displays, botões de controle e chaves, entre outras funções. A programação é implementada no Diagrama de Fluxo de Sinais, conforme ilustra a figura 3.11, através de conexões entre blocos funcionais, onde cada objeto do Painel de Controle tem um ícone correspondente no diagrama (NATIONAL INSTRUMENTS, 1998a e 1998b).

Figura 3.10: Painel de Controle de desenvolvimento do *software* de controle.

Figura 3.11: Diagrama de Fluxo de Sinais de desenvolvimento do software de controle.

A figura 3.12 ilustra o fluxograma do *software* de controle.

Figura 3.12: Fluxograma do *software* de controle desenvolvido.

No *software* de controle desenvolvido, a seleção do período de aquisição dos dados de temperatura é feita pelo usuário no Painel de Controle.

O grupo de blocos funcionais responsáveis por essa seleção é ilustrado na figura 3.13. Nos experimentos de controle da temperatura, foi utilizado o período de 5 segundos (0,2Hz), pois é um valor grande o suficiente para evitar que uma leitura subsequente a um chaveamento seja afetada pelos eventuais ruídos gerados.

Figura 3.13: Grupo de blocos funcionais que estabelecem o período de amostragem da temperatura pelo *software* de controle.

Seguindo o protocolo de comunicação desenvolvido pelo fabricante da Unidade de Digitalização, o programa desenvolvido envia uma seqüência de caracteres pela porta serial solicitando um dado de temperatura. Ao receber a solicitação, a Unidade de Digitalização disponibiliza um dado atual, na mesma porta serial, para ser lido pelo programa. Nesta operação de comunicação serial, foi aproveitado um exemplo já pronto do *LabView* na forma de um sub instrumento virtual ("*sub VI*"), equivalente a uma sub-rotina que, quando é executada, escreve uma seqüência de caracteres na porta serial e fica aguardando um determinado número de *bytes* para ler como resposta do periférico conectado. Este *sub VI* requer os seguintes parâmetros que devem ser definidos:

- a porta de comunicação (foi utilizada a COM 2);
- a seqüência de caracteres a ser escrita (foi utilizado o valor hexadecimal 0130 3904 0000 0000 0000 006E 0D);
- o número de bytes a serem lidos (foi utilizado 30);
- o *timeout* de leitura (definido como 1 segundo).

A figura 3.14 ilustra o grupo de blocos funcionais responsáveis pela leitura do dado de temperatura via interface serial.

O *set point* de temperatura é ajustado no Painel de Controle com precisão de centésimo de grau Celsius.

Com o intuito de comparar o desempenho da hidroconservação com a conservação em câmaras frias convencionais, foi implementado, conforme o projeto, o algoritmo de controle do tipo liga-desliga (*on-off*) por ser este o mais freqüente nessas câmaras e o de menor custo de implementação. Assim, o programa compara a temperatura atual lida com o *set point* ajustado pelo usuário. Se a temperatura lida for maior que o valor do *set point* somado à histerese, o programa aciona o compressor via saída digital da placa de CIO-DAS08/Jr-AO, mas, se a temperatura for menor que o *set point*, desliga o compressor. Nesta operação, o *software* utiliza a função “*Out Port*” do *LabView* que permite escrever um *byte* em um endereço, onde tanto o *byte* como o endereço são parâmetros da função, determinados pelo programador.

Foi observado que é possível trabalhar com histerese de $0,01^{\circ}\text{C}$, pois o nível de ruído é baixo, e o processo térmico lento ($0,24^{\circ}\text{C}/\text{min}$). Assim, mesmo usando uma pequena histerese, não ocorrem chaveamentos espúrios ou freqüentes.

Foi também implementado no *software* um dispositivo denominado “Bloqueio de Segurança” a fim de proteger a unidade de refrigeração. O Bloqueio de Segurança impede que o controlador *on-off* acione a unidade dentro de um intervalo de dois minutos após cada vez que esta é desligada, possibilitando tempo para que ocorra o equilíbrio bórico entre os circuitos de alta e baixa pressão do sistema.

A figura 3.16 ilustra o grupo de blocos funcionais responsáveis pela realização das tarefas de plotagem dos dados de temperatura lidos no Painel de Controle, determinação das temperaturas mínima e máxima, comparação da temperatura lida com o *set point*, funcionamento do bloqueio de segurança e acionamento da refrigeração via placa CIO-DAS08/Jr-AO.

Figura 3.16: Grupo de blocos funcionais responsáveis pela plotagem dos dados de temperatura lidos no Painel de Controle, determinação das temperaturas mínima e máxima, comparação da temperatura lida com o *set point*, funcionamento do bloqueio de segurança e acionamento da refrigeração via placa CIO-DAS08/Jr-AO.

O grupo de blocos funcionais apresentados na figura 3.16 pode ser considerado como o principal grupo, pois é através dele que a implementação do algoritmo é desenvolvida, possibilitando o controle da câmara de conservação de alimentos frescos.

CAPÍTULO 4: Resultados e Conclusões

Este capítulo descreve a metodologia experimental empregada e apresenta os resultados obtidos nos experimentos para caracterização e avaliação do instrumento desenvolvido com um estudo de caso para a validação da nova metodologia de armazenamento. Finalmente, apresenta as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

4.1 Metodologia Experimental

A fim de se avaliar a hidroconservação, foi adotada uma metodologia comparativa entre a câmara baseada em hidroconservação e a câmara convencional de meio aéreo. Assim, foram conduzidos experimentos utilizando-se o mesmo sistema, alternando-se o meio de conservação: ora ar, ora solução aquosa.

Os experimentos, com exceção dos estudos de caso que envolviam produtos vegetais, foram realizados em dois pontos de temperatura: $1,00^{\circ}\text{C}$ e $11,00^{\circ}\text{C}$, por estarem próximos, respectivamente, às faixas de temperaturas ideais para produtos sensíveis à injúria de congelamento e de frio. Além disso, a temperatura mínima de $1,00^{\circ}\text{C}$ foi selecionada para se evitar a formação de gelo sobre a serpentina do evaporador presente na câmara de conservação.

4.2 Resultados Obtidos e Discussão

4.2.1 Taxas de resfriamento e aquecimento

A fim de caracterizar o comportamento termodinâmico da câmara baseada em hidroconservação e da câmara aérea, foram realizados experimentos de resfriamento e aquecimento do interior da câmara, sem nenhum produto armazenado (taxa de ocupação de 0%), com os dois meios (aquoso e aéreo). Estes experimentos foram realizados utilizando a instrumentação descrita, com o sensor posicionado no centro da câmara, mantendo-se o sistema de refrigeração ligado para obtenção da taxa de resfriamento e desligado para obtenção da taxa de aquecimento. A fim de se obter um valor representativo dessas taxas que permitisse comparar câmara aérea e câmara baseada em hidroconservação, foi enfocada a faixa de $2,00^{\circ}\text{C}$ a $10,00^{\circ}\text{C}$ para se medir as taxas de resfriamento e aquecimento. Os

resultados deste experimento são apresentados nas figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 e resumidos na tabela 4.1.

Figura 4.1: (a) Curva de resfriamento da câmara aérea com taxa de ocupação de 0%. (b) Detalhe da faixa de 2,00°C a 10,00°C. A taxa de resfriamento obtida para esta faixa foi de 4,05°C/min com um coeficiente R^2 de 0,99.

Figura 4.2: (a) Curva de aquecimento da câmara aérea com taxa de ocupação de 0%. (b) Detalhe da faixa de 2,00°C a 10,00°C. A taxa de aquecimento obtida para esta faixa foi de 1,07°C/min com um coeficiente R^2 de 0,99.

Figura 4.3: (a) Curva de resfriamento da câmara baseada em hidroconservação com taxa de ocupação de 0%. (b) Detalhe da faixa de 2,00°C a 10,00°C. A taxa de resfriamento obtida para esta faixa foi de 0,21°C/min com um coeficiente R^2 de 0,99.

Figura 4.4: (a) Curva de aquecimento da câmara baseada em hidroconservação com taxa de ocupação de 0%. (b) Detalhe da faixa de 2,00°C a 10,00°C. A taxa de aquecimento obtida para esta faixa foi de 0,01°C/min com um coeficiente R^2 de 0,99.

Tabela 4.1: Taxas de resfriamento e aquecimento do interior da câmara na faixa de 2,00°C a 10,00°C com taxa de ocupação de 0%.

Tipo de Câmara	Resfriamento	Aquecimento
Câmara aérea	4,05 °C/min	1,07 °C/min
Câmara baseada em hidroconservação	0,24 °C/min	0,01 °C/min

4.2.2 Distribuição da temperatura na câmara

Foram realizadas medidas da distribuição de temperatura no volume interno da câmara, sem nenhum produto armazenado, para os dois meios (aquoso e aéreo), a fim de se avaliar qual a máxima diferença de temperatura observada entre dois pontos da câmara em regime estacionário, isto é, a fim de se medir $\Delta\Theta_{\max}(\theta)$.

Para estes experimentos, além do hardware já descrito, foi utilizada uma Unidade de Digitalização Multicanal com leitura multiplexada de 8 sensores PT100, ilustrada na figura 4.5. Esta Unidade, também de fabricação

da Flyever, possui precisão de $0,1^{\circ}\text{C}$ por canal, e saída serial. Para a aquisição de dados da Unidade Multicanal foi utilizado um *software* proprietário, desenvolvido pela Flyever, cuja interface é mostrada na figura 4.6.

Figura 4.5: Unidade de digitalização multicanal.

Figura 4.6: Interface do *software* de aquisição de dados da Unidade de Digitalização Multicanal.

Para estes experimentos, os oito sensores foram posicionados em quatro posições (A, B, C e D) do plano horizontal da câmara, conforme ilustra a figura 4.7, sendo que, para cada posição do plano, foi colocado um sensor a dois centímetros da superfície do banho e outro a dois centímetros do fundo da câmara, numa coluna de água de 27 centímetros. Estes experimentos foram realizados para temperaturas de *set point* de 1,00°C e 11,00°C por estarem próximos, respectivamente, às faixas de temperaturas ideais para produtos sensíveis à injúria de congelamento e de frio.

Nestes experimentos foi também feita uma avaliação da influência da agitação do meio.

Os valores de $\Delta\Theta_{\max}(\theta)^{(6)}$ foram medidos durante a observação de 100 minutos de regime estacionário para câmara aérea e câmara baseada em hidroconservação, com os *set points* de 1,00°C e 11,00°C, e são apresentados na tabela 4.2. As figuras 4.8, 4.9 e 4.10 ilustram a influência da agitação do meio, para o *set point* de 11,00°C.

Figura 4.7: Arranjo experimental para levantamento da distribuição da temperatura na câmara de conservação.

⁶ O erro das medidas de $\Delta\Theta_{\max}(\theta)$ é de $\pm 0,2^\circ\text{C}$ pois essa medida é resultante da subtração entre duas medidas de temperatura com erros de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ cada.

Tabela 4.2: Valores de $\Delta\Theta_{\max}(\theta)$ medidos para câmara aérea e câmara baseada em hidroconservação para *set points* de 1,00°C e 11,00°C com taxa de ocupação de 0%.

Tipo de câmara	$\Delta\Theta_{\max}(\theta)$ para <i>set point</i> = 1,00°C	$\Delta\Theta_{\max}(\theta)$ para <i>set point</i> = 11,00°C
Câmara aérea	1,1 ± 0,2 °C	1,9 ± 0,2 °C
Câmara baseada em hidroconservação	0,3 ± 0,2 °C	0,3 ± 0,2 °C

As figuras 4.8, 4.9 e 4.10 ilustram o efeito da agitação do meio na distribuição da temperatura no interior da câmara, para o *set point* de 11,00°C. Nestes resultados gráficos, cada cor representa a temperatura medida por um dos oito sensores, sendo que os sensores S1, S3, S5 e S7 ficaram próximos ao fundo da câmara e os sensores S2, S4, S6 e S8 ficaram próximos à superfície do banho.

Figura 4.8: Curvas da temperatura na câmara aérea nos pontos A, B, C e D, para um *set point* de 11,00°C, com a agitação desligada.

Figura 4.9: Curvas da temperatura na câmara aérea nos pontos A, B, C e D, para um *set point* de 11,00°C, com a agitação ligada.

Para a câmara baseada em hidroconservação cujo resultado para *set point* de 11,00°C é ilustrado na figura 4.10, observa-se que, no início da rampa de descida da temperatura, a agitação estava ligada, fazendo com que as temperaturas medidas por todos os sensores estivessem muito próximas. Entretanto, ainda durante a rampa de descida da temperatura e próximo do valor de tempo igual a 10 minutos, a agitação foi desligada. Isto provocou a separação das curvas de temperatura em dois grupos (um grupo relativo às temperaturas dos sensores posicionados mais próximos ao fundo da câmara e outro dos sensores mais próximos à superfície), como resultado da convecção natural do meio aquoso. Quando o valor do tempo atingiu os 20 minutos, a agitação foi ligada novamente, o que fez com que os dois grupos de curvas se fundissem num único grupo para o qual o valor de $\Delta\Theta_{\max}(\theta)$ medido em regime estacionário foi de 0,3°C.

Figura 4.10: Curvas da temperatura na câmara baseada em hidroconservação nos pontos A, B, C e D, para o *set point* de 11,00°C.

4.2.3 Características de desempenho do controle em malha fechada

De forma a caracterizar o desempenho do sistema e do uso do controle em malha fechada, foram realizados experimentos, com a câmara sem produtos armazenados, a fim de se avaliar comparativamente algumas características como:

- Erro máximo de regime estacionário [$E_{ssmax}(\theta)$], determinado pelo maior desvio do sinal de saída em relação ao *set point*, observado em 100 minutos de regime estacionário;
- Margem Segura [$MS(\theta)$]⁽⁷⁾;

⁷ As medidas de $MS(\theta)$ são apresentadas com erro de $\pm 0,2^\circ\text{C}$ porque são resultantes da soma de $E_{ssmax}(\theta)$ que tem erro de $\pm 0,01^\circ\text{C}$ com $\Delta\Theta_{max}(\theta)$ que tem erro de $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

A aquisição de dados foi feita com um período de amostragem de 5 segundos. Nestes experimentos, trabalhou-se também com os *set points* de 1,00°C e 11,00°C.

4.2.3.1 Regime estacionário para *set point* de 11,00°C

As figuras 4.11 e 4.12 apresentam, respectivamente, os resultados do experimento para o regime estacionário de temperatura da câmara aérea e da câmara baseada em hidroconservação para o *set point* de 11,00°C, com taxa de ocupação de 0% e o detalhe do regime estacionário de temperatura da câmara baseada em hidroconservação para o *set point* de 11,00°C, com taxa de ocupação de 0%.

Figura 4.11: Regime estacionário de temperatura da câmara aérea e da câmara baseada em hidroconservação para o *set point* de 11,00°C, com taxa de ocupação de 0%.

Figura 4.12: Detalhe do regime estacionário de temperatura da câmara baseada em hidroconservação para o *set point* de 11,00°C, com taxa de ocupação de 0%

A tabela 4.3, sintetiza os resultados do experimento para avaliação das características de desempenho do controle liga-desliga para o *set point* de 11,00°C para câmara aérea e câmara baseada em hidroconservação, com taxa de ocupação de 0%.

Tabela 4.3: Características de desempenho do controle liga-desliga para o *set point* de 11,00°C para câmara aérea e câmara baseada em hidroconservação, com taxa de ocupação de 0%.

Tipo de câmara	Câmara Aérea	Câmara baseada em hidroconservação
Erro máximo de regime estacionário $E_{ssmax}(\theta)$	$1,42 \pm 0,01$ °C	$0,11 \pm 0,01$ °C
Margem Segura $MS(\theta)$	$3,3 \pm 0,2$ °C	$0,4 \pm 0,2$ °C

4.2.3.2 Regime estacionário para *set point* de 1,00°C

As figuras 4.13 e 4.14 e os dados da tabela 4.4 apresentam os resultados deste experimento.

Figura 4.13: Regime estacionário de temperatura da câmara aérea e da câmara baseada em hidroconservação para *set point* de 1,00°C, com taxa de ocupação de 0%.

Figura 4.14: Detalhe do regime estacionário de temperatura da câmara baseada em hidroconservação para o *set point* de 1,00°C, com taxa de ocupação de 0%.

A tabela 4.4, a seguir, resume os resultados deste experimento.

Tabela 4.4: Características de desempenho do controle liga-desliga para o *set point* de $1,00^{\circ}\text{C}$ para câmara aérea e câmara baseada em hidroconservação, com taxa de ocupação de 0%.

Tipo de Câmara	Câmara Aérea	Câmara baseada em hidroconservação
Erro máximo de regime estacionário $E_{ss\max}(\theta)$	$0,89 \pm 0,01^{\circ}\text{C}$	$0,05 \pm 0,01^{\circ}\text{C}$
Margem Segura $MS(\theta)$	$2,0 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$	$0,4 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$

4.2.4 Estimativa do consumo mensal de energia

A estimativa do consumo mensal de energia elétrica em regime estacionário, foi feita para o *set point* de $1,00^{\circ}\text{C}$, medindo-se a potência consumida pela unidade de refrigeração (através de leituras de corrente e tensão elétrica) e medindo-se o ciclo de trabalho (*duty cycle*) do sistema de controle durante o intervalo de 100 minutos. Dessa forma, foi possível calcular o consumo neste intervalo de tempo e, a seguir, extrapolar para o período de um mês, sendo também acrescido o consumo dos agitadores. A tabela 4.5 apresenta os resultados deste experimento.

Tabela 4.5: Estimativa do consumo mensal de energia para o *set point* de $1,00^{\circ}\text{C}$, para câmara aérea e câmara baseada em hidroconservação, com taxa de ocupação de 0%.

Tipo de Câmara	Câmara Aérea	Câmara baseada em hidroconservação
Estimativa do consumo mensal de energia elétrica	125 kWh	31 kWh

4.2.5 Influência da taxa de ocupação da câmara na Margem Segura [MS(θ)]

Para se avaliar comparativamente a influência da taxa de ocupação da câmara aérea e da câmara baseada em hidroconservação na Margem Segura [MS(θ)], para o *set point* de 1,00°C, considerou-se a hipótese de que o crescimento da taxa de ocupação deve prejudicar a circulação do meio (ar ou meio aquoso), alterando a distribuição de temperatura no sentido de aumentar as diferenças internas que impactam o valor da [MS(θ)] .

A ocupação da câmara foi feita com garrafas plásticas de 0,7 litros, cheias de areia para não flutuarem na solução aquosa. O experimento foi iniciado com uma taxa de ocupação de aproximadamente 40% (equivalente a 18 garrafas) conforme ilustrado na figura 4.15.

Figura 4.15: Câmara preparada com garrafas plásticas de 0,7 litros cheias de areia para avaliar a Margem Segura em função da taxa de ocupação.

Inicialmente, a câmara foi resfriada até 1,00°C e mantida nesta temperatura. Depois de atingido o regime estacionário, foram medidos os valores de $E_{ssmax}(\theta)$ e $\Delta\theta_{max}(\theta)$ a fim de se determinar a Margem Segura

[$MS(\theta)$], conforme já descrito nos experimentos dos itens 4.2.2 e 4.2.3. Posteriormente, foram retiradas seis garrafas de cada vez, de forma aleatória. A cada retirada, foi repostado o volume de solução aquosa correspondente, quando analisando na configuração de hidroconservação. A partir daí aguardou-se o sistema atingir o regime estacionário para se fazer nova medida. Dessa forma, foi possível analisar a variação da Margem Segura em função da taxa de ocupação para os dois sistemas. Os resultados obtidos neste experimento são ilustrados nas figuras 4.16 e 4.17.

Figura 4.16: Margem Segura em função da taxa de ocupação da câmara aérea para *set point* de 1,00°C.

Figura 4.17: Margem Segura em função da taxa de ocupação da câmara baseada em hidroconservação para *set point* de 1,00°C

4.2.6 Efeito de perturbações térmicas no controle da câmara de conservação de alimentos

4.2.6.1 Perturbação de Carga Térmica

4.2.6.1.1 Ensaio na câmara de conservação baseada em hidroconservação

Para avaliar a perturbação nas condições da câmara de conservação de alimentos, foram realizados ensaios sobre os efeitos da perturbação provocada pela introdução de cargas térmicas de diversos volumes, estando o sistema inicialmente em regime estacionário com *set point* de 1,00°C. Como carga térmica, foram utilizadas garrafas plásticas de refrigerante (tipo PET) de 2 litros cheias de água à temperatura de 25,10°C. Foram medidos os valores de pico atingidos pela temperatura no centro da câmara para cargas de 2, 4, 6 e 8 litros (que equivalem, respectivamente, a 6,25%, 12,50%, 18,75% e 25,00% do volume útil da câmara). Foram também medidos os tempos de duração da perturbação para cargas de 2, 4, 6 e 8 litros. O tempo de duração da perturbação foi definido como o intervalo de tempo entre o instante da aplicação da perturbação até a restauração do regime estacionário do sistema.

Os resultados dos ensaios com a evolução temporal da temperatura durante as perturbações provocadas pelas cargas térmicas de 2, 4, 6 e 8 litros bem como os resultados da temperatura de pico e do tempo de duração da perturbação em função do volume da carga térmica para a câmara de conservação de alimentos frescos baseada em hidroconservação são apresentados nas figuras 4.18, 4.19 e 4.20.

Figura 4.18: Evolução temporal da temperatura durante a perturbação para as cargas térmicas de 2, 4, 6 e 8 litros na câmara baseada em hidroconservação

Figura 4.19: Temperatura de pico atingida durante a perturbação em função do volume da carga térmica na câmara baseada em hidroconservação

Figura 4.20: Tempo de duração da perturbação em função do volume da carga térmica na câmara baseada em hidroconservação.

4.2.6.1.2 Ensaios de perturbação na câmara de conservação aérea

Na câmara de conservação aérea, as perturbações provocadas pelas cargas térmicas, causaram oscilações rápidas na temperatura de modo que o bloqueio de segurança do *software* de controle impedia que o motor da unidade de refrigeração partisse, a fim de proteger o sistema contra partidas com desequilíbrio bórico dos circuitos de gás refrigerante.

4.2.6.2 Perturbação devido à abertura de porta da câmara

Para se avaliar a perturbação devido à abertura da porta da câmara de conservação, foram realizados ensaios para determinados intervalos de tempo de abertura da porta, estando o sistema inicialmente em

regime estacionário com *set point* de 1,00°C. Abertura da porta da câmara é comum em operações de colocação e retirada de produtos. Foram, assim, medidos os valores de pico atingidos pela temperatura no centro da câmara para intervalos de abertura da porta de 0.5 minuto e 1,0 minuto. O tempo de 0.5 minuto é suficiente para se fazer uma operação de colocação ou retirada de produtos da câmara. A fim de se avaliar situações limites, foi também analisado o efeito para o intervalo de 1,0 minuto. O resultado da variação da temperatura em função do tempo para a câmara aérea é mostrado na figura 4.21. A figura 4.22 ilustra os ensaios repetidos para a câmara de conservação baseada na técnica de hidroconservação.

Conforme observado na figura 4.21, a abertura da porta da câmara aérea perturba de forma bastante significativa o controle da temperatura, provocando aumentos superiores a 12,00°C na temperatura da câmara que, neste experimento de avaliação, permaneceu aberta por um minuto. Por outro lado, o tempo necessário para este sistema recuperar o regime estacionário é reduzido, sendo menor que cinco minutos.

Figura 4.21: Evolução temporal da temperatura da câmara aérea durante perturbação de abertura de porta por períodos de 0,5 minuto e 1,0 minuto.

Observou-se que, no ensaio realizado com a câmara baseada em hidroconservação, sob as mesmas condições experimentais, não se

detectou, nesta classe de medidas, qualquer efeito da perturbação, conforme o resultado ilustrado na figura 4.22.

Figura 4.22: Evolução temporal da temperatura da câmara baseada em hidroconservação durante perturbação de abertura de porta por períodos de 0,5 minuto e 1,0 minuto.

4.2.7 Estudos de caso com alimentos frescos

4.2.7.1 Resfriamento interno de maçã Fuji (*Malus domestica* cv. fuji)

Foi feito um ensaio com um lote de seis maçãs Fuji e os resultados de resfriamento interno foram obtidos simultaneamente, a partir da temperatura ambiente. Estes resultados são apresentados nas figuras 4.23 e 4.24. No ensaio, foi introduzido um sensor no centro de cada um dos seis frutos e todos foram colocados simultaneamente em câmara de conservação mantida a 2,00°C. O ensaio foi realizado primeiramente com uma câmara aérea e, posteriormente, com novos frutos, na câmara baseada em hidroconservação. Dessa forma, foram comparadas as curvas de resfriamento interno das maçãs para as duas câmaras, tendo sido medido o tempo necessário para a temperatura atingir a metade do intervalo entre a temperatura ambiente e os 2,00°C das câmaras para cada um dos casos (t_{meio}). Os valores médios de t_{meio}

para cada conjunto de seis curvas de resfriamento para as câmaras aérea e baseada em hidroconservação são apresentados na tabela 4.6.

Figura 4.23: Curvas de resfriamento de Maçã Fuji em câmara aérea, em regime estacionário com *set point* de 2,00°C

Figura 4.24: Curvas de resfriamento de Maçã Fuji em hidroconservação, em regime estacionário com *set point* de 2,00°C

A tabela 4.6, ilustra os valores médios de t_{meio} de resfriamento interno para maçãs Fuji.

Tabela 4.6: Valores médios de t_{meio} de resfriamento interno de maçã Fuji entre a temperatura ambiente ($\sim 23,00^{\circ}\text{C}$) e $2,00^{\circ}\text{C}$

Tipo de câmara	Câmara aérea	Câmara baseada em hidroconservação
t_{meio} (minutos)	120 ± 2	22 ± 2

4.2.7.2 Degradação da couve manteiga (*Brassica oleracea*, v. *acephala*)

A partir dos resultados dos experimentos sobre a influência da taxa de ocupação da câmara de conservação sobre a Margem Segura, verificou-se que, para a temperatura de $1,00^{\circ}\text{C}$ com taxa de ocupação de 30%, a Margem Segura da câmara baseada em hidroconservação é quase $2,00^{\circ}\text{C}$ menor que a Margem Segura da câmara aérea, ou seja, é possível trabalhar com o ajuste do *set point* da câmara baseada em hidroconservação $2,00^{\circ}\text{C}$ abaixo do ajuste feito na câmara aérea na faixa de temperaturas próximas ao ponto de congelamento. Dessa forma, o objetivo deste experimento é verificar o efeito sobre a velocidade de degradação de couve manteiga (*Brassica oleracea*, v. *acephala*) armazenada na câmara aérea e na câmara baseada em hidroconservação com o ajuste de *set points* diferindo em $2,00^{\circ}\text{C}$. Assim, utilizando-se a instrumentação já descrita, foram realizados experimentos de armazenamento de couve manteiga (*Brassica oleracea*, v. *acephala*) em hidroconservação com *set point* de $1,00^{\circ}\text{C}$ e na câmara aérea com *set point* de $3,00^{\circ}\text{C}$ com a finalidade de se avaliar comparativamente a velocidade de degradação deste produto. Para esta avaliação foram utilizados dois critérios: um subjetivo, baseado em uma análise sensorial realizada por quatro

avaliadores, e um objetivo, baseado em medidas de perda de massa das amostras.

No ensaio, foi utilizada a couve cultivada em horta no perímetro urbano do município de São Carlos – SP, a qual, após colhida, foi imediatamente transportada ao laboratório onde as folhas foram, inicialmente, selecionadas e padronizadas por tamanho, cor e integridade. Em seguida, elas foram lavadas em água corrente e tiveram sua nervura central retirada. A sanitização das folhas, já sem o talo, foi realizada através da sua imersão em uma solução de água e Hipoclorito de Sódio a 150ppm, por 10 minutos. Após a sanitização, cada folha foi cortada em 4 quadrantes, tendo a direção da nervura central como um dos eixos de corte, utilizando-se uma faca afiada e limpa. Após o corte, foi realizado o enxágüe das folhas com água corrente, durante 2 minutos e, em seguida, elas foram secas com papel-toalha de uso culinário. Depois de secas, cada folha (segmentada em quadrantes), foi embalada em embalagem de polietileno de alta densidade tipo *ziploc*, medindo 18 x 22 cm, previamente sanitizada, a qual foi denominada embalagem primária. Foram montadas e numeradas cinco amostras para cada tratamento. Em seguida, estas cinco amostras foram colocadas em uma segunda embalagem de polietileno de alta densidade, medindo 40 x 60 cm, denominada embalagem secundária, que já continha em seu fundo um lastro para forçar a submersão das amostras quando em solução aquosa. A extremidade aberta da embalagem secundária ficou para fora da câmara conforme ilustra a figura 3.3.

4.2.7.2.1 Análise sensorial

A análise sensorial é uma metodologia usual para a avaliação da qualidade de produtos (TELES, 2001). As avaliações sensoriais foram realizadas por quatro avaliadores (dois do sexo masculino e dois do sexo feminino) logo antes de iniciar, e depois, a cada dois ou três dias de armazenamento. Aos avaliadores foi solicitado que observassem a aparência global do produto embalado apenas na embalagem primária e atribuísem uma

nota de zero a quatro para cada uma das cinco amostras, levando em consideração aspectos como cor, aroma e textura das folhas, segundo a escala hedônica apresentada na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Escala hedônica utilizada para avaliação sensorial no ensaio de degradação de couve manteiga

Nota	Significado
4	Ótimo
3	Bom
2	Razoável
1	Limite de consumo
0	Impróprio para o consumo

Para cada dia de avaliação, foi calculada a média das notas de todos os avaliadores para as cinco amostras. Dessa forma, foi obtida uma média para cada dia de avaliação. Essas médias foram convertidas em percentuais da média do dia inicial, que foi tomada como 100%. Este procedimento matemático elimina possíveis diferenças iniciais do conjunto de amostras para cada tratamento. Este valor percentual foi denominado qualidade relativa $[Q_R(t)]$. Foi assim, estabelecido o valor de 25% de qualidade relativa $[Q_R(t)]$ como sendo o *limite de consumo*, pois este valor é equivalente ao caso em que todos os avaliadores atribuísem nota 1 para todas as amostras, isto é, estariam todas no *limite de consumo* segundo todos os avaliadores.

Os pontos experimentais resultantes do experimento para avaliação da qualidade relativa $[Q_R(t)]$ em função do tempo, tanto para câmara aérea como para a câmara baseada em hidroconservação, foram ajustados por curvas sigmoidais produzidas pela função de Boltzmann e resultaram ambas em coeficientes de correlação $R^2 = 0,99$.

Figura 4.25: Qualidade relativa [$Q_R(t)$] de couve manteiga em função do tempo de armazenamento em câmara aérea para *set point* de 3,00 °C e em câmara baseada em hidroconservação para *set point* de 1,00 °C

4.2.7.2.2 Perda de massa

Além da realização da análise sensorial, foi também realizada a avaliação da perda de massa sofrida pelas amostras após oito dias de armazenamento, para os dois tratamentos e após quatorze dias de armazenamento para a couve submetida ao tratamento em câmara baseada em hidroconservação. Para as medidas, foi utilizada uma balança digital da marca AND, modelo EK-2000G, com precisão de 0,05g. Foi, assim, realizada uma pesagem logo antes de ter sido iniciado o armazenamento, com as folhas já prontas para serem embaladas e depois, uma segunda pesagem no oitavo dia de armazenamento, bem como uma terceira pesagem no décimo quarto dia

de armazenamento. Antes de cada pesagem, as folhas foram cuidadosamente retiradas das embalagens e secas com o uso de papel toalha de uso culinário para se remover a água condensada sobre elas.

O resultado do experimento com a análise sensorial, que tem um caráter subjetivo, foi somado ao resultado obtido através do experimento de perda de massa, que tem caráter objetivo. Na tabela 4.8 são apresentados os resultados destes experimentos.

Tabela 4.8: Perda percentual de massa de couve manteiga, em oito dias de armazenamento em câmara aérea e em hidroconservação e em quatorze dias de armazenamento em hidroconservação.

Dia	Câmara aérea	Câmara baseada em hidroconservação
primeiro	$100,0 \pm 0,5\%$	$100,0 \pm 0,5\%$
oitavo	$94,0 \pm 0,5\%$	$98,8 \pm 0,5\%$
décimo quarto	————	$96,5 \pm 0,5\%$

4.3 Conclusões

Em face dos resultados obtidos e das discussões apresentadas, podem-se enumerar as seguintes conclusões parciais:

- a) quanto à taxa de resfriamento e aquecimento, os resultados apresentados nas figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e tabela 4.1 mostraram que a faixa de $2,00^{\circ}\text{C}$ a $10,00^{\circ}\text{C}$ representa a operação do sistema desenvolvido, uma vez que é intermediária entre as temperaturas de armazenamento normalmente recomendadas para produtos sensíveis à injúria de congelamento e as temperaturas de armazenamento normalmente recomendadas para

produtos sensíveis à injúria de frio. Ademais, concluiu-se, quanto a este contexto, que a taxa de resfriamento da câmara baseada em hidroconservação é da ordem de 17 vezes menor que a da câmara aérea, e a taxa de aquecimento da câmara baseada em hidroconservação é 107 vezes menor que a da câmara aérea, o que confere estabilidade térmica superior à câmara baseada em hidroconservação. Também foi constatado que o modelo proposto, cujos resultados foram simulados e apresentados nas figuras 2.17 e 2.18, reproduziu, com fidelidade, o resultado experimental obtido.

- b) Quanto à distribuição da temperatura na câmara, conforme resultados que foram apresentados na tabela 4.2, observou-se que, tanto para o *set point* de 1,00°C como para o *set point* de 11,00°C, os valores de $\Delta\Theta_{\max}(\theta)$ medidos para a câmara aérea são bastante superiores aos medidos para a câmara baseada em hidroconservação, sendo 367% maior para o *set point* de 1,00°C e 634% maior para o *set point* de 11,00°C. Este resultado evidenciou o efeito da alta condutividade térmica da água em relação à do ar, o que levou à conclusão de que há uma distribuição mais homogênea de temperaturas na câmara baseada em hidroconservação. Observou-se também que, para a câmara aérea, foi verificada uma redução do valor de $\Delta\Theta_{\max}(\theta)$ com a redução do *set point* enquanto que, para a câmara baseada em hidroconservação, este comportamento não ficou evidente, pois o mesmo foi camuflado pelos erros de medida envolvidos os quais eram da ordem de grandeza da própria medida. Além disso, conforme ilustrado pelas figuras 4.8 e 4.9, para a câmara com agitação desligada ficou clara a existência de dois grupos distintos de curvas: um com temperaturas mais baixas (correspondentes aos sensores que estavam próximos ao fundo da câmara) e outro com temperaturas mais elevadas (correspondentes aos sensores que estavam próximos à superfície), o que permite concluir que os maiores gradientes de temperatura estão na direção vertical. Este comportamento é explicado pela convecção natural do meio, que faz com que o ar mais denso (de temperatura mais baixa) permaneça na região mais baixa da câmara (ou no fundo desta). Também se observou que a

agitação do meio promoveu a fusão dos dois grupos de curvas, ou seja, o gradiente de temperatura criado pela convecção natural do meio, no sentido vertical, foi quebrado pela agitação, o que provocou uma sensível redução do valor de $\Delta\Theta_{\max}(\theta)$ em relação ao anterior. Também, conforme resultados apresentados na figura 4.10, pode-se concluir que a câmara baseada em hidroconservação é o sistema que apresentou o menor valor de $\Delta\Theta_{\max}(\theta)$, sendo notório o efeito da agitação do meio aquoso sobre o sistema.

- c) Quanto às características de desempenho do controle em malha fechada, considerando o primeiro caso relativo a regime estacionário para *set point* de 11,00°C, conforme resultados apresentados nas figuras 4.11 e 4.12 e tabela 4.3, pôde-se concluir que a Margem Segura apresentada pela câmara baseada em hidroconservação foi 8,25 vezes menor que a apresentada pela câmara aérea, o que indica a possibilidade de se armazenar produtos vegetais frescos sob melhores condições de segurança e conservação. Adicionalmente, considerando o segundo caso, ou seja, regime estacionário para *set point* de 1,00°C, conforme resultados apresentados nas figuras 4.13 e 4.14 e tabela 4.4, concluiu-se que a Margem Segura apresentada pela câmara baseada em hidroconservação foi 5 vezes menor que a apresentada pela câmara aérea, o que comprova duplamente a excelência do modelo de conservação baseado em hidroconservação frente ao modelo convencional de câmara aérea.
- d) Quanto à estimativa de consumo mensal de energia, conforme resultado apresentado na tabela 4.5, concluiu-se que a câmara baseada em hidroconservação apresenta um consumo mensal de energia elétrica da ordem de 4 vezes menor que uma câmara aérea sob as mesmas condições de operação e armazenagem, conforme previa Lasso *et al.* (2002).
- e) Quanto à influência da taxa de ocupação da câmara na Margem Segura, conforme resultados apresentados nas figuras 4.16 e 4.17, houve a confirmação da hipótese levantada de que a Margem Segura depende de forma crescente da taxa de ocupação da câmara. Para a câmara aérea, a

Margem Segura cresceu de $0,3^{\circ}\text{C}$ para variação na taxa de ocupação de 0% a 40% e para a câmara baseada em hidroconservação, cresceu de $0,2^{\circ}\text{C}$ na mesma faixa considerada.

- f) Quanto ao efeito de perturbação térmica no controle da câmara de conservação de alimentos, os resultados apresentados nas figuras 4.18, 4.19 e 4.20 permitiram concluir que existe uma relação quadrática crescente entre a temperatura de pico e o volume da carga térmica. Notou-se ainda que cargas térmicas de água a $25,10^{\circ}\text{C}$ (temperatura ambiente) inferiores a 4 litros (12,5% do volume útil da câmara) provocaram perturbações insignificantes na temperatura do banho aquoso da câmara de hidroconservação. Ajustes realizados com o conjunto de pontos experimentais resultantes levaram a um coeficiente de correlação, em ajuste sigmoidal, $R^2=1$. Também, resultados obtidos com ensaios realizados em câmara aérea mostraram oscilações rápidas quando variações de carga térmica ocorreram.
- g) Quanto à perturbação devido à abertura da porta da câmara, conforme resultados ilustrados nas figuras 4.21 e 4.22, verificou-se a excelência da câmara baseada em hidroconservação.
- h) Quanto ao estudo de caso com alimentos frescos, no ensaio realizado para resfriamento interno de maçã Fuji (*Malus domestica* cv. *fuji*), conforme resultados apresentados nas figuras 4.23 e 4.24 e na tabela 4.6, a câmara baseada em hidroconservação respondeu mais rapidamente para o resfriamento interno das maçãs Fuji ensaiadas, tendo apresentado um t_{meio} de resfriamento 5,5 vezes menor que o da câmara aérea.
- i) Quanto ao estudo de caso com alimentos frescos visando à avaliação da degradação da couve manteiga (*Brassica oleracea*, v. *acephala*), conforme resultados apresentados pela análise sensorial realizada e estudo de perda de massa, cujos resultados foram reportados na figura 4.25 e tabela 4.8, pôde-se concluir que os mesmos enfatizam a superioridade da câmara

baseada em hidroconservação no que tange ao tempo de prateleira dos produtos armazenados. Observou-se que, no sexto dia de armazenamento na câmara aérea, a curva da qualidade relativa já estava cruzando a linha dos 25%, estabelecidos como limite de consumo. No caso do armazenamento em hidroconservação, isso só ocorreu após o décimo-terceiro dia, o que representou um ganho de mais de 100% no tempo de vida de prateleira do produto. Observou-se também que, no sexto dia de armazenamento, enquanto a curva de qualidade relativa [$Q_R(t)$] da couve armazenada em câmara aérea cruzava o limite de consumo (25%), o valor de $Q_R(t)$ da couve armazenada em hidroconservação era de 80%, isto é, 55% superior. Adicionalmente, verificou-se que as amostras de couve armazenadas na câmara aérea já tinham perdido 6,0% de massa no oitavo dia de armazenamento, contra uma perda de massa de apenas 1,2% das amostras armazenadas em hidroconservação, no mesmo período. Isto representa uma perda 5 vezes menor. Observou-se ainda que, no décimo quarto dia de armazenamento em hidroconservação, após a curva de qualidade relativa da couve armazenada já ter cruzado a linha do limite de consumo, a perda de massa das amostras foi de apenas 3,5%. Este dado permite concluir que, embora os avaliadores do experimento de análise sensorial tivessem julgado que as amostras de couve armazenadas na câmara baseada em hidroconservação já estivessem impróprias ao consumo no décimo quarto dia, a condição destas era ainda melhor do que daquelas armazenadas na câmara aérea, no oitavo dia.

- j) Quanto aos valores de temperatura recomendados para armazenamento de produtos em câmara aérea, apresentados na tabela 1.2, eles devem ser revistos para baixo quando considerado o armazenamento em câmara baseada em hidroconservação.

Finalmente, como conclusão geral, considera-se que a instrumentação desenvolvida para o controle do processo apresentou as características requeridas para a correta operação da câmara baseada em hidroconservação, proporcionando maior imunidade à perturbação de carga

térmica e abertura de porta da câmara, velocidade adequada para um rápido resfriamento de produtos frescos e menor consumo de energia.

4.4 Propostas de trabalhos futuros

- a) Desenvolvimento de um sistema integrado com eletrônica dedicada para conservação de alimentos frescos baseado na técnica de hidroconservação.
- b) Desenvolvimento de estudos para câmaras de conservação em escala de armazenagem ampliada.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, T. L. (2002). *Vida útil de couve minimamente processada e mantida em hidroconservador*. 57 f. Monografia (Bacharelado) – Faculdade de Ciências Agrárias Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.
- CAMARGO FILHO, W. P. (2001). *Perspectivas dos mercados de tomate para indústria e mesa*. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 31, n. 5, maio.
- CANTWELL, M. (2000). *Preparation and quality of fresh cut produce*. In: II ENCONTRO NACIONAL SOBRE PROCESSAMENTO MÍNIMO DE FRUTAS E HORTALIÇAS, 2., Viçosa. [Anais...]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. p. 156–182.
- CHITARRA, M. I. F; CHITARRA, A. B. (1990). *Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio*. Lavras: ESAL: FAEPE. 293 p. : il.
- COMPUTERBOARD, INC. (1994). *CIO-DAS08/Jr-Ao: user's manual*. ver. 1. Mansfield. 8 p.
- CONTINI, E. (1999). *Tecnologia para o agronegócio*. do SEMINÁRIO SOBRE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS, Belo Horizonte. *Anais ...* Belo Horizonte: EPAMIG. p. 60-71.
- COUGHANOWR, D. R.; KOPPEL, L. B. (1965). *Process systems analysis and control*. New York: McGraw-Hill.
- DIAS, J. M. C. S. (2002). Alimentos funcionais e nutracêuticos: oportunidades de desenvolvimento e cooperação. In: ENCONTRO FRANCO BRASILEIRO DE BIOCIÊNCIA E BIOTECNOLOGIA : ALIMENTOS FUNCIONAIS E NUTRACÊUTICOS. *Resumo de palestras...* Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. p. 5. (Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Documentos, 85). Editores: José Manuel Cabral de Souza e Linda Reis. Disponível em: <<http://www.cenargen.embrapa.br/publica/trabalhos/doc008.pdf>>. Acesso em: 03 jun. 2003.
- DOSSAT, R. J. (1990). *Princípios de Refrigeração*. [São Paulo]: Hemus. 884p.
- ECIL S. A. PRODUTOS E SISTEMAS DE MEDIÇÃO E CONTROLE. (1998). *Catálogo geral de pirometria*. [Piedade]. 137 p.
- EMBRAPA. (PESSOA, J. D.; GIMENES, A. C.; CRUVINEL, P. E.; LASSO, P. R. O.) (2002). *Hidroconservador e processo de conservação de produtos orgânicos perecíveis utilizando o mesmo*. BR PI nº 000291. 11 jul.
- FIORAVANÇO, J. C. (2000). O mercado comunitário de frutas: participação e perspectivas para o Brasil. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 30, n. 3, mar.

FREIRE JR., M. (1999). *Efeito da temperatura de armazenamento e influência da atmosfera modificada do alface hidropônico cv. Regina minimamente processado*. 82 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

FUNDAÇÃO PROCON (São Paulo) (2003). *Alimentos funcionais: conheça os cuidados ao consumir*. Secretaria da justiça e da defesa da cidadania. Disponível em: <http://www.procon.sp.gov.br/infpressalimfuncionais.shtml>>. Acesso em: 03 jun. 2003.

GALANTE, A. (2003). Alimentos funcionais. *Folha on line*. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/folha/equilibrio/nutricao/ult696u1.shtml>>. Acesso em: 03 jun. 2003.

GEESON, J. D. (1989). Cooling and storage of fruits and vegetables. *Proceedings of the Institue of Refrigeration*, London, v. 85, p. 65-74.

GOMES, M. S. de O. (1999). *Conservação pós-colheita: frutas e hortaliças*. [Brasília]: EMBRAPA-SPI. 134 p. (Coleção Saber).

GORENSTEIN, O.; GUTIERREZ, A. S. D. (2000). Esforço de modernização do mercado de frutas e hortaliças frescas no estado de São Paulo. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 30, n. 4, abr .

HOROWITZ, P.; HILL, W. (1983). *The art of electronics*. [Cambridge]: Cambridge University Press. 716 p.

KUO, B. C. (1985). *Sistemas de controle automático*. 4. ed. [Rio de Janeiro]: Prentice Hall do Brasil. 653 p. Traduzido por Roberto Moura Sales, Victor M. Pinto Leite.

LASSO, P. R. O.; PESSOA, J. D. C.; CALBO, A. G. (2002). *Comparação da estabilidade térmica de câmaras para armazenamento em meio líquido e gasoso*. Trabalho apresentado no XVII Congresso Brasileiro de Fruticultura em Belém, PA. 5 f. Digitado.

LAWTON, K. M.; PATTERSON, S. R. (1999). *A high-stability air temperature control system*. [S.I.]: University of North Carolina-Center for Precision Metrology. 42 p.

LIDE, R.; FREDERIKSE, H. P. R. (Ed.) (1996). *Handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data*. 77. ed. Boca Raton: CRC Press. Várias paginações.

LUENGO, R. F. A.; CALBO, A. G. (2001). *Armazenamento de hortaliças*. [Brasília]: Embrapa Hortaliças. 242 p.

NATIONAL INSTRUMENTS. (1998a). *LabViewTM basics I: course manual: course software version 4.0*. Austin. Várias paginações.

NATIONAL INSTRUMENTS. (1998b). *LabView™ basics II: course manual: course software version 4.0*. Austin. Várias paginações.

NEVES FILHO, L. C. (1991). *Resfriamento, congelamento e estocagem de alimentos*. [São Paulo]: Instituto Brasileiro do Frio: Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, Ventilação e Aquecimento: Sindicato da Indústria de Refrigeração e Tratamento de Ar . 176 p.

OPPENHEIM, A. V. (1975). *Digital Signal Processing*. [New Jersey]: Prentice Hall, Inc. 585 p.

PEARCE, R. S. (2001). Plant freezing and damage. *Annals of Botany*, London, v. 87, p. 417-424.

PESSOA, J. D.; GIMENES, A. C.; LASSO, P. R. O. (2001). *Avaliação do SPAD-502 no monitoramento da degradação de tecidos vegetais em função da temperatura*. Trabalho apresentado no VIII Congresso Brasileiro de Fisiologia Vegetal, Ilhéus, BA. Digitado.

PRADO, M. C. R. do. (2003). Fome Zero começa no plantio familiar. *Investnews*. Disponível em:

http://www.investnews.com.br/colunistas/default.asp?id_colunista=21&id_coluna=276. Acesso em: 30 maio 2003.

RABELLO, L. M. (1993). *Sistema computadorizado para congelamento de embriões*. 226 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos - Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SANTIAGO, M. M. D.; ROCHA, M. B. (2001). O mercado de frutas e as estimativas dos preços recebidos pelos fruticultores no Estado de São Paulo, 1990-2000. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 31, n. 2, fev.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D. (1986). *Física 2: mecânica dos fluidos, calor e movimento ondulatório*. [Rio de Janeiro]: Livros Técnicos e Científicos. 510 p.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. (1989). *Process dynamics and control*. [Toronto]: J. Wiley . 717 p.

SHEINGOLD, D. H. (Ed.) (1976). *Analog-digital conversion handbook*. 2. ed. Norwood: Analog Devices, Inc. Paginação irregular.

SILVA, E. O. (2000). *Fisiologia Pós-Colheita de Repolho (Brassica oleracea var. capitata) Minimamente Processado*. 79 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

TELES, C. S. (2001). *Avaliação física, química e sensorial de couve (Brassica oleracea, L. var. acephala) minimamente processada, armazenada sob atmosfera modificada*. 102 f. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

WATADA, A. E.; KO, N. P.; MINOTTI, D. A. (1996). Factors affecting quality of fresh-cut horticultural produces. *Postharvest Biology and Technology*, Amsterdam, v. 9, p. 115-125.

WATADA, A. E.; LIENG, Q. (1998). Quality of fresh-cut produce. *Postharvest Biology and Technology*, Amsterdam, v. 15, p. 201-205.

WILLS, R.; MCGLASSON, B.; GRAHAM, D.; JOYCE, D. (1998). *Postharvest: an introduction to the physiology & handling of fruit, vegetables & ornamentals of fruit, vegetables & ornamentals*. 4. ed. Wallingfor: CAB International, 262 p. : il.

OUTRAS REFERÊNCIAS CONSULTADAS

ARRUDA, M. C.; KANO, C.; VIEITES, R. L. (2000). Processamento mínimo de cenoura. *Horticultura Brasileira*, Brasília, DF, v. 18, p. 523-524, jul. Suplemento.

BAZANELLA, A. S.; SILVA JR., J. M. G. de. (2002). Ajuste de controladores PID. Disponível em : <<http://www.delet.ufrgs.br/~jmgomes>>. Acesso em: 12 nov. 2002.

BERTUCCI NETO, V. (1990). *Desenvolvimento dos Controladores PID*. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos - Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos.

DORF, R. C. (1992). *Modern control systems* . 6. ed. Reading: Addison-Wesley. 717 p. (Addison-Wesley series in electrical and computer engineering. Control engineering).

HOWELL, S. K.; HAMILTON, T. D. S. (1990). Intelligent instrumentation. *Measurement Science & Technology*, Bristol, v. 1, p. 1265-1273.

MORETTI, C. L.; ARAÚJO, A. L.; SILVA, W. L. C. (2000). Alteração no metabolismo respiratório de pimentões em função do processamento mínimo e da temperatura de armazenamento. *Horticultura Brasileira*, Brasília, DF, v. 18, p. 331-332, jul. Suplemento.

OGATA, K. (1982). *Engenharia de controle moderno*. [Rio de Janeiro]: Prentice Hall do Brasil. 929 p.