



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ÁREA: PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO
DE PRODUTOS AGRÍCOLAS



DISSERTAÇÃO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PROCESSAMENTO
E ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

ESTUDO TEÓRICO DO RESFRIAMENTO DE FRUTAS
COM FORMA ARBITRÁRIA USANDO O MÉTODO
INTEGRAL BASEADO EM GALERKIN

PAULO DE MORAIS PESSÔA

CAMPINA GRANDE – PB
MARÇO - 2010

ESTUDO TEÓRICO DO RESFRIAMENTO DE FRUTAS COM FORMA ARBITRÁRIA USANDO O MÉTODO INTEGRAL BASEADO EM GALERKIN

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas

ALUNO: Paulo de Morais Pessôa

ORIENTADOR: Antonio Gilson Barbosa de Lima - DEM/UFCG

Josivanda Palmeira Gomes - DEAg/UFCG

Campina Grande - Paraíba
Março - 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

P475e

2010 Pessoa, Paulo de Morais.

Estudo teórico do resfriamento de frutas com forma arbitrária usando o método integral baseado em Galerkin / Paulo de Morais Pessoa. — Campina Grande, 2010.

67 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Prof^a. Dr^a. Josivanda Palmeira Gomes.

1. Fruta - Conservação. 2. Alimentos. 3. Analítico. I. Título.

CDU – 664.853(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA




PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

PAULO DE MORAIS PESSOA

ESTUDO TEÓRICO DO RESFRIAMENTO DE FRUTAS COM FORMA ARBITRÁRIA
USANDO O MÉTODO INTEGRAL BASEADO EM GALERKIN

BANCA EXAMINADORA

PARECER



Dr. Antônio Gilson Barbosa de Lima – Examinador

Aprovado



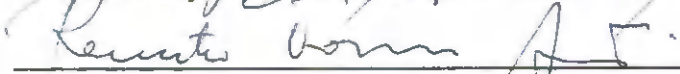
Dra. Josiyanda Palmeira Gomes – Orientadora

Aprovado



Dr. Vital Araújo Barbosa de Oliveira – Examinador

Aprovado



Dr. Renato Fonseca Aragão – Examinador

APROVADO

MARÇO - 2010

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Severino Porfírio (in memorian) e Maria José, pelos ensinamentos.

A minha esposa (Nadja), meu filho (Paulo) e minha filha (Natália) pela compreensão, paciência, apoio e incentivo.

A toda minha família pelo apoio incondicional!

.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me abençoado com uma família maravilhosa e por estar sempre presente em nossas vidas.

Aos meus orientadores Prof^ª. Dr^ª. Josivanda Palmeira Gomes e Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima pela oportunidade, paciência, orientação, ensinamento e amizade que possibilitaram a elaboração deste trabalho.

Aos professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, especialmente aos do mestrado pelos ensinamentos transmitidos.

À Universidade Federal de Campina Grande.

Aos colegas Genival e Joselito pela amizade e colaboração.

À prof^ª. Dr^ª. Marinalva Freire da Silva pela revisão do texto.

Aos colegas de curso, pela amizade e convivência agradável.

À secretária do mestrado em Engenharia Agrícola, Elaine.

Ao CNPq, Finep, Petrobrás e JBR Engenharia Ltda, pelo apoio financeiro dado ao LCTF/UAEM.

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
1- INTRODUÇÃO	1
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1- As frutas.....	4
2.1.1- Produção de frutas	4
2.1.2- Perdas de frutas no Brasil.....	7
2.1.3- Alterações sofridas pelas frutas causadas por fatores biológicos.....	11
2.1.4- Características gerais sobre frutas tropicais: banana, laranja, morango e limão.....	14
2.1.4.1- Banana.....	14
2.1.4.2- Laranja.....	15
2.1.4.3- Morango.....	16
2.1.4.4- Limão.....	18
2.2- Conservação a frio.....	19

2.2.1- Refrigeração.....	20
2.2.2- Armazenamento a frio.....	24
2.3- As cinéticas de resfriamento, congelamento e pós-congelamento.....	25
2.4- O estado da arte no resfriamento de alimentos.....	26
3- MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1- Modelagem matemática.....	30
3.2- Aplicação ao resfriamento de frutas	36
3.2.1- Morango.....	36
3.2.2- Banana, laranja e limão.....	39
3.3- Propriedades termofísicas.....	42
4- RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1- Cinética de resfriamento.....	44
4.2- Distribuição de temperatura.....	47
5- CONCLUSÕES.....	59
6- SUGESTÕES.....	60
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

RESUMO

PESSOA, Paulo de Moraes. Estudo teórico do resfriamento de frutas com forma arbitrária usando o método integral baseado em Galerkin. Campina Grande: UFCG, 2010. 67 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola.

A estabilidade físico-química é uma característica extremamente desejável em alimentos. Ao adquirir um produto, o consumidor deseja que ele mantenha a sua qualidade pelo maior tempo possível, tanto do ponto de vista sensorial, quanto do microbiológico. Frutas e hortaliças, após sua colheita, apresentam muitas perdas devido ao transporte e estocagem inadequados. O armazenamento e a conservação de frutas e hortaliças permitem planejar a oferta do produto ao mercado consumidor, de forma a atender a demanda durante bom tempo após a colheita. São vários os métodos utilizados para a conservação de alimentos, tais como: resfriamento, congelamento, secagem, tratamento térmico, embalagem com atmosfera modificada, entre outros; a escolha do método dependerá das propriedades do alimento e viabilidade econômica. Neste sentido, este trabalho objetivou simular o resfriamento de sólidos com forma arbitrária, com particular referência à banana prata (*Musa balbisiana Colla*), laranja valência (*Citrus sinensis Osbeck*), limão Taiti (*Citrus latifolia, Tanaka.*) e morango camarosa (*Fragaria x ananassa Duch.*). Para descrever o processo, apresentou-se a solução analítica da equação de condução de calor usando o método integral baseado em Galerkin considerando condições de contorno de Dirichlet e propriedades termofísicas constantes. Resultados das cinéticas de resfriamento e distribuição de temperatura no interior das frutas são mostrados e analisados. Verificou-se que o morango resfriou mais rapidamente que as demais frutas, apresentando uma distribuição de temperatura que varia fortemente nas direções longitudinal e radial.

Palavras-chave: fruta - conservação, alimentos, analítico

ABSTRACT

PESSOA, Paulo de Moraes. Theoretical study of the cooling of fruits with arbitrary shape using Galerkin based-integral method. Campina Grande: UFCG, 2010. 67 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola

Physical and chemical stability is one desirable characteristic in foods. For consumer it is desirable that the foods maintain quality for long time under sensorial and microbiological view points. Fruits and horticultural products post-harvested presents many lost due to inadequate transport and storage. The storage and conservation of fruits and vegetables allow planning to offer the product to the consuming market and to assist the demand for long time after the crop. Several methods are used to food conservation such as: cooling, freezing, drying thermal treatment, modified atmosphere packing; the choice of the adequate method depends on food properties and economical viability. In this sense, the aim of this work is to simulate cooling of solids with arbitrary shape. Particular reference are given to banana (*Musa balbisiana Colla*), orange (*Citrus Sinensis Osbeck*), lemon Tahiti (*Citrus latifolia, Tanaka.*) and strawberry (*Fragaria x ananassa Duch.*) fruits. Analytical solution of the heat conduction equation using GBI method considering Dirichlet boundary condition and constant thermo-physical properties is presented. Results of cooling kinetics and temperature distribution inside the fruits are shown and analyzed. It was verified that the strawberry have cooled more fast that other fruits by presenting temperature distribution that change strongly in radial and longitudinal directions.

Keywords: fruit - conservation, foods, analytical

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Banana prata	14
Figura 2.2	Laranja	16
Figura 2.3	Morango	17
Figura 2.4-	Limão	19
Figura 2.5 -	Transferência de calor durante o resfriamento, congelamento e pós-congelamento de um produto alimentício; T_1 e T_2 – temperatura inicial e final do produto no centro; t_r – tempo de resfriamento; t_c – tempo de congelamento; t_{pc} – tempo de pós-congelamento	25
Figura 3.1	Morango e sua representação geométrica	36
Figura 3.2	Banana, laranja e limão e sua representação geométrica	39
Figura 4.1	Comportamento da temperatura adimensional média das frutas em função do número de Fourier	45
Figura 4.2	Comportamento da temperatura adimensional central das frutas em Função do número de Fourier	46
Figura 4.3	Distribuição da temperatura adimensional dentro da banana em dois intervalos de tempo diferentes: (a) $t = 150$ s ($Fo = 0,0511$) e (b) $t = 350$ s ($Fo = 0,1192$)	48
Figura 4.4	Distribuição da temperatura adimensional dentro da banana em dois intervalos de tempo diferentes: (a) $t = 500$ s ($Fo = 0,1703$) e (b) $t = 1000$ s ($Fo = 0,3405$)	49
Figura 4.5	Distribuição da temperatura adimensional dentro da laranja em dois intervalos de tempo diferentes: (a) $t = 350$ s ($Fo = 0,0343$) e (b) $t = 500$ s ($Fo = 0,0490$)	51
Figura 4.6	Distribuição da temperatura adimensional dentro da laranja em dois intervalos de tempo diferente: (a) $t = 1000$ s ($Fo = 0,0979$) e (b) $t = 1500$ s ($Fo = 0,1469$)	51
Figura 4.7	Distribuição da temperatura adimensional dentro do morango em dois intervalos de tempo diferentes: (a) $t = 40$ s ($Fo = 0,02799$) e (b) $t = 68$ s ($Fo = 0,04759$)	52
Figura 4.8	Distribuição da temperatura adimensional dentro do morango em dois intervalos de tempo diferentes: (a) $t = 90$ s ($Fo = 0,06298$) e (b) $t = 100$ s ($Fo = 0,06998$)	53
Figura 4.9	Distribuição da temperatura adimensional dentro do limão em quatro intervalos de tempo diferentes: (a) $t = 150$ s ($Fo = 0,0370748$) e (b) $t = 350$ s ($Fo = 0,0865079$)	55
Figura 4.10	Distribuição da temperatura adimensional dentro do limão em	55

dois intervalos de tempo diferentes: (a) $t = 500$ s ($F_0 = 0,123583$) e (b) $t = 1000$ s ($F_0 = 0,247165$).

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Temperatura ideal de armazenamento e capacidade aproximada de conservação para as diferentes frutas de clima temperado	22
Tabela 3.1	Dados utilizados na simulação do resfriamento das frutas.	42
Tabela 4.1	Área, volume, relação área/volume, relação eixo maior/eixo menor das frutas.	56
Tabela 4.2	Comparação da temperatura central das frutas ao longo do tempo.	57
Tabela 4.3	Tempo de resfriamento para várias frutas.	58

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Eixo menor da fruta	cm
B	Eixo maior da fruta	cm
H	Altura da fruta	cm
C _p	Calor específico	Jkg ⁻¹ °C ⁻¹
F _o	Número de Fourier	---
K	Condutividade térmica	Wm ⁻¹ °C ⁻¹
R	Raio da fruta,	cm
R	Coordenada radial	cm
T	Temperatura final	°C
T ₀	Temperatura inicial do fruto	°C
T _e	Temperatura do ar de resfriamento	°C
T*	Temperatura adimensional	---
T ₁	Temperatura inicial do produto	°C
T ₂	Temperatura final do produto	°C
T	Tempo	s
t _r	Tempo de resfriamento	s
t _c	Tempo de congelamento	s
t _{pc}	Tempo de pós-congelamento	s
Z	Coordenada cilíndrica	cm
α	Difusividade térmica	m ² s ⁻¹
∇ ²	Operador laplaciano	---
ρ	Densidade da fruta	kgm ⁻³

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os vegetais constituem a base da alimentação de grande parte dos seres vivos. Como na evolução da espécie o homem se tornou sedentário, teve, portanto, a necessidade de produzir o seu próprio alimento. Daí surgiram descobertas e novas tecnologias quando havia necessidade de aumentar a produção. Nem sempre é possível expandir a terra agricultável e em virtude de controle dos custos de produção, motivo pelo qual a produtividade é buscada na tentativa de garantir o abastecimento e aumentar o lucro.

Desde que os alimentos passaram a ser produzidos pelo homem, o plantio passou a ser uma etapa do processo produtivo. Para realizar esse processo é necessário que parte da produção seja classificada como sementes e parte para alimentação; os produtos que não se enquadram nessa classificação são descartados e destinados à ração animal.

Os produtos alimentícios de origem agrícola contribuem com parcela importante na balança comercial brasileira. O agronegócio atingiu uma posição importante no mundo, tanto que atualmente são comercializadas safras futuras na BMF – Bolsa de Mercadorias e Futuro.

A produção de alimentos do mundo atingiu valores expressivos, contudo, essa produção não tem atendido a toda população do planeta; as perdas pós-colheita contribuem para o aumento do custo desses produtos e o desabastecimento.

Os produtos agrícolas, por serem materiais biológicos, sofrem decomposição após determinado prazo pós-colheita; dependendo das características, alguns são mais vulneráveis que outros.

Os alimentos perecíveis, entre os quais as frutas, aumentam sua qualidade após a colheita e, em seguida, sofrem uma queda considerável de qualidade. Para a estabilização físico-química dos hortifrutícolas podem-se utilizar várias técnicas de armazenamento. O armazenamento a frio é um dos processos utilizados na conservação de alimentos perecíveis, essa técnica retarda as deteriorações devido à produção do calor vital e a liberação do CO₂, decorrentes da respiração. Nesse contexto, percebe-se que a temperatura de armazenamento é, portanto, um dos fatores ambientais de grande importância, por controlar a senescência, visto que regula as taxas dos processos fisiológicos e bioquímicos associados garantindo dessa forma a estabilidade físico-química que é uma característica desejável nos alimentos por garantir maior durabilidade melhorando, consideravelmente, as condições de comercialização. Dessa forma, atende ao interesse do consumidor qual seja o de adquirir produtos cujas qualidades nutricionais e gustativas estejam preservadas e que as mantenham por maior tempo possível.

O armazenamento é uma técnica que permite controlar o abastecimento, ou seja, garantir a oferta do produto por mais tempo a partir da colheita (Massoni, 2002). As perdas que ocorrem após a colheita são, na maioria, provocadas por transporte inadequado e/ou estocagem que por não dispor de estrutura física e mão-de-obra capacitada pode ocasionar danos mecânicos nos produtos. A partir destes os fatores de deterioração são favorecidos.

A utilização de resfriamento em produtos hortifrutícolas é de grande interesse prático, razão por que vários pesquisadores têm procurado estudar este problema de forma experimental e teórica. Matematicamente, porém esse tipo de problema apresenta uma não linearidade matemática, que limita a obtenção de soluções exatas da equação que descreve o problema. Na impossibilidade de soluções exatas, métodos aproximados semi-analíticos ou numéricos têm sido utilizados para simular o comportamento da temperatura de frutas durante sua conservação a frio. Apesar das limitações, para casos onde as propriedades termofísicas são constantes, soluções analíticas ainda apresentam sua importância, principalmente, quando se trata de geometrias não convencionais, que têm sido pouco estudadas.

Neste sentido os objetivos deste trabalho são:

- a) Modelar matematicamente o resfriamento de banana, laranja, morango e limão.
- b) Simular a cinética de resfriamento e distribuição de temperatura no interior das frutas.
- c) Avaliar o efeito da relação área/volume no tempo de resfriamento das frutas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – As frutas

2.1.1 – Produção de frutas

A fruticultura tem apresentado resultados significativos em produção e rentabilidade, dessa forma, contribui com geração de emprego garantindo empregabilidade no setor agrícola.

A produção mundial de frutas tem como maior produtor a China com 175 milhões de toneladas, seguida pela Índia com produção de 57 milhões de toneladas (ABANORTE, 2010).

Os quatro maiores produtores de banana juntos produziram, no ano 2007, 45.825.608 toneladas da fruta, sendo 23.204.800 toneladas produzidas pela Índia, maior produtor, em segundo lugar, a China produziu 8.038.385 toneladas, as Filipinas, com

produção de 7.484.073 toneladas, é a terceira no ranking, e o Brasil, quarto colocado, teve uma produção de 7.098.350 toneladas (FAO, 2007).

A produção mundial de laranja considerando os 20 maiores produtores, no ano 2007, foi de 58.677.782 toneladas. O Brasil liderou o ranking com 18.685.000 toneladas, em segundo lugar com 7.357.000 toneladas apareceu os Estados Unidos, a Índia, que produziu 4.266.900 toneladas, é o terceiro país maior produtor de laranja e em quarto lugar o México cuja produção foi 4.248.715 toneladas (FAO, 2007).

Já a produção dos 20 países maiores produtores de morango, no ano 2007, foi 3.599.460 toneladas, onde os quatro países que mais produziram foram: Estados Unidos da América, Espanha, Turquia e Rússia, cujas produções foram 1.133.703 toneladas, 263.900 toneladas, 250.316 toneladas e 230.400 toneladas, respectivamente. Neste mesmo ano, a produção dos 20 países que mais produziram limão foi 11.982.151 toneladas e os quatro primeiros países do ranking foram: Índia, México, Argentina e Brasil, que produziram respectivamente 2.298.300 toneladas, 1.935.909 toneladas, 1.260.000 toneladas e 1.018.700 toneladas (FAO, 2007).

O morango é produzido em vários países sendo os EUA o maior produtor mundial, tendo produzido 1.105 mil toneladas, sendo 900 mil toneladas/ano de frutas frescas e 205 mil toneladas congeladas. Outros países grandes produtores de morango são: Espanha, cuja produção anual é de 350 mil toneladas, Japão com produção de 180 mil toneladas, Polônia, com produção anual de 150 mil toneladas, México, com 141 toneladas e Itália, 102 mil toneladas (AGRIANUAL, 2002).

A produção nacional está concentrada, principalmente na Região Sudeste e Sul. O Estado maior produtor é Minas Gerais com produção superior a 30 mil toneladas juntamente com São Paulo com 29 mil toneladas e o Rio Grande do Sul com 11 mil toneladas, são responsáveis por mais de 80% da produção nacional (EMBRAPA, 2010).

O Brasil é o terceiro maior produtor de frutas do mundo ficando atrás apenas da China e Índia, com uma produção superior a 43 milhões de toneladas de frutos (IBGE, 2008). Embora o Brasil seja um grande produtor, sua participação no mercado internacional é apenas de 1% devido ao grande mercado interno (FAO, 2005). Aproximadamente 53% da produção brasileira destina-se ao mercado de frutas processadas e 47% ao mercado de frutas frescas. Com uma produção bastante diversificada devido às

diferentes condições climáticas tendo dessa forma, grande variedade e qualidade de frutas, as perdas da produção de frutas e hortaliças são elevadas, principalmente após a colheita, por falta de tratamento e deficiência do setor no manuseio dos produtos e falta de estocagem frigorífica. A deficiência na manipulação dos produtos hortícolas aumenta a vulnerabilidade ao ataque de microrganismos (Pinto & Jorge, 2007). As perdas pós-colheita variam de 30 a 50%, representando descarte aproximado de 15 milhões de toneladas por ano (Di Rienzo, 2001).

Graças à sua extensão territorial, posição geográfica, solo e condições climáticas a produção brasileira está voltada para frutas tropicais, subtropicais e temperadas. A diversidade de produtos é de 500 variedades de frutas comestíveis e 220 de frutas nativas somente na Amazônia. O setor garante emprego a 5,6 milhões de pessoas, equivalente a 27% da mão-de-obra agrícola. Na cadeia produtiva, gera oportunidades de dois a cinco postos de trabalho por hectare cultivado e está fundamentado em pequenas e médias propriedades.

Os citros, na fruticultura mundial, pertencem a um grupo mais importante. Nesse grupo se incluem as laranjas, as tangerinas e híbridos, limões e limas, entre outros. A laranja é considerada a rainha das frutas, tendo sua produção em torno de 58% da produção cítrica do mundo (FAO, 2005), porém no Brasil a fruta mais consumida é a banana cujo consumo per capita é 30 kg/ano (ANBF, 2005).

De acordo com o IBGE (2008), a produção de banana foi de 6.998.150 toneladas, correspondendo a 18,2% produção nacional de frutas. Foram produzidas ainda 18.538,084 toneladas de laranja, correspondente a 29,3% da produção do Brasil. Com relação ao ano anterior houve um decréscimo de 1,4% na produção de banana e de 0,8% de laranja produzida. Esses valores fazem da banana e da laranja, as duas frutas que têm maior participação no total do valor da produção com percentuais de 18,2% e 29,3%, respectivamente. A produção de limão, que ocupou o décimo primeiro lugar na escala de produção das frutas foi de 965.333 toneladas, representando 5,2% de decréscimo com relação à safra do ano anterior, contudo, essa produção constituiu 2,1% da produção total de frutas no ano. A produção brasileira de morango foi aproximadamente 100 mil toneladas no ano 2006 (IBRAF, 2006).

A uva ocupou o primeiro lugar nas exportações brasileiras com 172 mil toneladas, o melão com 153 mil toneladas ficou em segundo lugar, com 119 mil toneladas a manga ficou em terceiro lugar e, em quarto lugar, aparece a maçã, alcançando 80 mil toneladas. Esses números são importantes para o mercado brasileiro quando comparados aos valores da exportação mundial, cuja demanda do melão é de 212 mil toneladas, seguido da manga e da banana, com 134 e 131 mil toneladas, respectivamente (ABANORTE, 2010).

Cada espécie e/ou variedade apresenta um limite de armazenamento que, quando atingido, leva a fruta a senescência e morte. Neste sentido, é importante o conhecimento da vida de armazenamento das diferentes frutas, como forma de evitar perdas elevadas de qualidade, em função de um tempo demasiadamente longo de conservação, e melhor planejar a sua distribuição no mercado.

2.1.2 – Perdas de frutas no Brasil

O Brasil produz grande variedade e qualidade de frutas, sendo um dos maiores produtores mundial de hortícolas (Tanabe & Cortez, 1998). Contudo, após a colheita, grande parte da produção é perdida devido à falta de tratamento e manuseio adequados, vulnerabilidade ao ataque de microrganismos e falta de estocagem frigorífica (Pinto & Jorge, 2007). Essas perdas ocorrem em toda a cadeia produtiva, podendo ser avaliada em cada elo ou nos canais de comercialização (ABIA, 1996). As conseqüências dessas perdas tanto são de ordem econômica quanto sociais e influenciam no comportamento de mercado contribuindo nas mudanças dos parâmetros econômicos e no desequilíbrio do mercado, provocando, dessa forma, a elevação de preço do produto para o consumidor final (Vilela et al., 2003).

As perdas podem ser classificadas em quantitativas e qualitativas. As perdas quantitativas são visíveis e podem ser quantificadas a partir do registro da quantidade de produtos desperdiçados, enquanto que, se tem mais dificuldade de quantificar as perdas qualitativas. Estes desperdícios proporcionam perda da qualidade ocasionando baixos preços de comercialização para o produtor e falta de competitividade do produto (Chitarra & Chitarra, 2005).

Para diminuir as perdas, necessita-se manter a estabilidade físico-química dos produtos. Segundo Leite et al. (2005), do ponto de vista termodinâmico, um material é estável quando se encontra em equilíbrio com as condições de temperatura e pressão ambiente, tal que não apresente alterações em seu estado físico ao longo do tempo. Entretanto, os alimentos têm um ciclo de vida, e o seu metabolismo sofre uma aceleração após o desligamento da planta mãe. As perdas de frutas e hortaliças, após a colheita, não ocorrem apenas pelo metabolismo, mas por deficiência no transporte e estocagem inadequada. Segundo Massoni (2002), no entanto, sabe-se que os alimentos contêm um número variável de bactérias e leveduras que poderão provocar alterações, dependendo de condições adequadas de crescimento. Além dos microrganismos, os alimentos também estão sujeitos a alterações causadas pelas atividades metabólicas, por reações químicas e enzimáticas (Gava, 1998).

Barbosa (2006), em estudo de caso, verificou que do total de perdas de abacaxi, apenas 18% ocorreram por microrganismos enquanto que 82% por danos mecânicos. A maiores níveis de perdas por fitopatógenos foi pela ação do *Fusarium subglutinans f.sp. ananas*. Com relação ao mamão ‘Havaí’, as perdas por fitopatógenos foi em torno de 40%, enquanto que as perdas por danos mecânicos foram 60%. Já a manga ‘Espada’, teve um descarte de 11% por danos mecânicos, destes 50% por amassamento, 37% por ferimentos e 13% por frutos quebrados ou rachados. Os frutos aptos para comercialização apresentaram firmeza e acidez titulável superiores a dos frutos descartados.

As frutas e hortaliças são consideradas produtos perecíveis porque apresentam atividade metabólica elevada, notadamente após a colheita, conduzindo aos processos de deterioração. A manutenção de sua qualidade através de manuseio cuidadoso e da aplicação de tecnologias adequadas na cadeia de comercialização depende do conhecimento, da estrutura, da fisiologia e das transformações metabólicas (aspectos físicos, físico-químicos, químicos e bioquímicos) que ocorrem no seu ciclo vital. Após a colheita, o processo respiratório em frutas e hortaliças já não é tão eficiente, por não ser suprido pelo processo fotossintético através das folhas. A temperatura é um dos fatores de maior influência na respiração, havendo um valor ideal para a manutenção de cada tipo de produto vegetal, para que esse alcance um máximo de qualidade comestível (Chitarra & Chitarra, 2005).

Devido à alta perecibilidade, frutas e hortaliças necessitam serem conservadas para minimizar deterioração e aumentar o tempo de armazenagem. São vários os métodos utilizados para a conservação de alimentos, tais como: resfriamento, congelamento, secagem, tratamento térmico, embalagem com atmosfera modificada, entre outros. A escolha do método dependerá das propriedades do alimento e viabilidade econômica. As temperaturas mais baixas podem inibir o crescimento dos microrganismos, porém as atividades metabólicas continuam, ainda que levemente, até certo limite (Gava, 1998). As alterações indesejáveis causadas por fatores biológicos, como a respiração, a transpiração e a ação do etileno, e todas as transformações metabólicas que estão associadas à degradação das frutas e hortaliças podem ser retardadas com o uso da refrigeração controlada (Pinto & Morais, 2000).

A diminuição da temperatura do produto ainda é um dos meios mais eficazes para a manutenção de sua qualidade, por reduzir a atividade respiratória e retardar a atividade metabólica, inibir o crescimento microbiano, os quais conduzem ao amadurecimento e/ou à senescência dos tecidos vegetais (Chitarra & Chitarra, 2005).

O período de conservação por refrigeração de produtos hortifrutícolas varia por produto e depende da temperatura utilizada (Pinto & Morais, 2000). A eficiência do resfriamento é caracterizada pela relação entre o tempo e a temperatura, desta forma quanto menor for o tempo de resfriamento, maior será a eficiência do sistema, o que garante produtos que mantêm sua qualidade e vida de prateleira maior (Teruel et al., 2003).

O amadurecimento é uma das fases mais importantes da ontogenia (desenvolvimento desde a fecundação até a maturidade) das frutas. Nessa etapa ocorrem as modificações que aumentam a aceitabilidade das frutas para o consumo. Essas mudanças são decorrentes das atividades de síntese (anabolismo) e degradação (catabolismo). O armazenamento refrigerado tem sido o método mais utilizado para preservação das frutas após a colheita. Consiste basicamente na colocação destas em câmaras com baixa temperatura e alta umidade relativa do ar. Neste sistema é diminuída a respiração e a transpiração das frutas, bem como é retardado o processo de senescência (envelhecimento) e o desenvolvimento de patógenos causadores de podridões (Kluge et al., 2002).

As qualidades não aparentes dos produtos hortícolas, como valor nutricional, textura, aroma e sabor são preservados por mais tempo desde que estes sejam submetidos à

temperatura e tempo adequados. A vida útil dos produtos pós-colheita pode ser reduzida e conseqüentemente sua qualidade alterada se ocorrer retardo no resfriamento desses produtos. Contudo, deve-se evitar a exposição ao calor ou frio excessivos, visto que promovem modificações no metabolismo normal, podendo acarretar alterações indesejáveis tais como: perda de massa, danos pelo frio, perda do valor nutritivo, modificações na textura, modificações no sabor e no aroma, aumento na susceptibilidade ao ataque de microrganismos (Chitarra & Chitarra, 2005)

As injúrias pelo frio constituem os danos fisiológicos mais comuns e preocupantes em frutas e hortaliças armazenados, principalmente quando o produto é submetido a temperaturas inferiores à temperatura de segurança (TMS), acima do ponto de congelamento (Kluge et al., 2006). A temperatura de segurança, de acordo com a literatura pesquisada, é variável para os diferentes produtos que dependendo tempo de resfriamento a que estejam submetidos, varia de 0 a 15°C. Vários sintomas visíveis e disfunções fisiológicas caracterizam os danos pelo frio em frutas e hortaliças. As respostas ao frio em produtos hortícolas são demonstradas quando fatores fisiológicos e bioquímicos são comparados, dentre eles a perda de peso, respiração, doenças, taxa de fluorescência da clorofila, ligações eletrolíticas, etc. Os sintomas dos danos causados em frutos, devido à baixa temperatura, são: escurecimento interno, depressões superficiais externas, falha no amadurecimento, polpa translúcida, dificuldade no desenvolvimento normal da cor da polpa e perda de sabor e aroma característico (Kluge et al., 2002).

O pré-resfriamento é uma das etapas mais importantes antes do armazenamento das frutas. É um procedimento pouco utilizado, devido ao desconhecimento das técnicas mais adequadas ou falta de equipamentos e/ou estrutura física apropriados para a realização da operação (Kluge et al., 2002). Ainda segundo Kluge et al. (2002), o pré-resfriamento deve ser realizado no menor tempo possível, dessa forma a aplicação dessa técnica possibilita a rápida remoção do calor do corpo, diminui a incidência de doenças e retarda a perda de qualidade, por restringir o crescimento de microrganismos e reduzir as atividades enzimática e respiratória; reduz também as perdas de peso por transpiração; entre outros. Trata-se de uma operação importante, uma vez que a fruta é colhida, muitas vezes, em condições de alta temperatura, no verão, podendo a polpa alcançar temperatura ambiente pelo efeito do seu processo respiratório. Nessa condição, há uma elevação na taxa respiratória da fruta e uma rápida deterioração da mesma.

Alguns sistemas de pré-resfriamento existentes são: pré-resfriamento com água fria e com ar forçado. Outras técnicas de pré-resfriamento, menos utilizadas são: pré-resfriamento em câmaras; pré-resfriamento por gelo; pré-resfriamento com gases liquefeitos e pré-resfriamento a vácuo. O método a ser utilizado depende da temperatura do produto colhido, da fisiologia do produto e da vida útil pós-colheita. Normalmente, busca-se reduzir a temperatura do produto ao mais próximo possível da temperatura de armazenamento, geralmente, em torno de 4°C (Kluge et al., 2002). Fatores que devem ser considerados no resfriamento de frutas e que variam de acordo com o produto e/ou cultivar são: temperatura mínima de segurança ou temperatura crítica (TMS), tempo de armazenamento e umidade relativa do ar.

2.1.3 – Alterações causadas por fatores biológicos

Os hortifrutícolas estão sujeitos a alterações contínuas após a colheita, por serem tecidos vivos. Algumas dessas alterações (o amadurecimento controlado, a fermentação para produção de vinho, vinagre, etc) são importantes para o consumidor, outras são totalmente desfavoráveis, pois diminuem a qualidade do produto ou implicam até mesmo na sua perda (Pinto & Morais, 2000).

As alterações que os produtos hortifrutícolas sofrem após a colheita são de origem biológica (Pinto & Morais, 2000). Os principais fatores de alterações são: a respiração, a transpiração e a ação do etileno.

O processo respiratório das frutas e hortaliças, após a colheita, não é eficiente, visto que não existe contato com a planta mãe, portanto, deixa de se beneficiar do processo fotossintético. Entretanto, as reservas acumuladas (carboidratos, lipídios e proteínas) são fontes de energia através do processo respiratório. Ao utilizar essas reservas o produto sofre diferentes modificações em sua composição e características devido aos eventos fisiológicos a seguir: aceleração da senescência, perda do sabor por redução nos teores de açúcares e ácido, aumento da transpiração com murchamento e perda de textura, perda de massa e redução do valor nutritivo.

A respiração, também é um fator responsável pela produção de energia na forma de calor (calor vital). O amadurecimento e a respiração estão relacionados à quantidade de calor gerado, isto é, quanto mais rápido ocorrer a respiração e o amadurecimento mais rápido maior será a quantidade de calor gerado. O calor produzido é inversamente proporcional ao tempo de armazenamento do produto. Geralmente, após a colheita, a taxa de respiração é maior nas primeiras horas após a colheita. Quando o armazenamento ocorre sob temperatura elevada, sem refrigeração, o tempo de armazenamento é menor e as perdas são maiores.

Os materiais orgânicos, principalmente hidratos de carbono, são degradados em produtos mais simples com liberação de calor durante o processo biológico denominado respiração. Na respiração, são utilizados os hidratos de carbono, até estes se esgotarem, acarretando o envelhecimento e a morte dos tecidos. A redução do valor nutritivo, perda do sabor característico e perda de peso no início da senescência caracterizam a perda desses materiais orgânicos (Pinto & Morais, 2000). Nos tecidos vegetais intactos, a respiração aeróbica não pára após a colheita. A velocidade de respiração não é comum a todos os produtos, depende da constituição físico-química de cada cultivar; os produtos com velocidades de respiração elevadas são muito perecíveis (Pereda et al., 2005).

A transpiração realiza-se pela evaporação da água dos tecidos, mas diferente das plantas em crescimento, os produtos hortifrutícolas, depois de separados da planta-mãe, não podem repor a água perdida. Esta perda de água do produto fresco depois da colheita é um problema sério, pois leva, por um lado, à perda do peso vendável e, por outro, a perdas na aparência (emurchecimento) e textura (amolecimento, perda de sumo) que podem levar a rejeição do produto por parte do consumidor. A transpiração é um processo influenciado por características do produto e por fatores externos. Como características dos produtos podem-se citar: as características morfológicas, a relação superfície/volume, danos na epiderme e estado de maturação, quanto aos fatores externos que interferem no processo tem-se a temperatura, a umidade relativa e a circulação do ar (Pinto & Morais, 2000). Os danos físicos ou mecânicos são fatores externos que contribuem com a transpiração.

Os processos da respiração e transpiração estão associados, contudo a transpiração é o principal fator responsável pela perda de massa que está associada à perda de água resultando dessa forma, alteração na aparência e na aceitabilidade do produto como alimento (Chitarra & Chitarra, 2005).

Os produtos tropicais apresentam taxas dos processos metabólicos mais elevadas do que os produtos de clima temperado quando armazenados sob temperatura ambiente. Os ambientes tropicais geralmente apresentam temperatura entre 25 e 35 °C, enquanto que nas zonas temperadas observam-se temperaturas de verão entre 10 e 20 °C. Por isso, para armazenar produtos tropicais é necessário maior ventilação que os produtos de zona temperada que apresentam perdas de massa inferiores que os produtos de clima tropical.

Os produtos hortícolas, após a colheita, passam por transformações internas resultantes do metabolismo, que acarretam em várias mudanças nas suas características, tais como textura, cor, sabor e aroma, indicativos do processo de amadurecimento e posterior senescência. É importante que esses produtos perecíveis sejam colhidos na maturidade adequada de forma que favoreçam o manuseio e o armazenamento.

O tempo de amadurecimento das frutas é relativamente curto. As frutas, se forem colhidas já maduras, sua vida pós-colheita será reduzida, visto que se tornam mais suscetíveis aos danos mecânicos e ao ataque de patógenos. Outro fator que contribui com a deterioração dos produtos é a evolução natural de etileno que estimula as transformações endógenas e a senescência resultando na perda da qualidade comestível e na comercialização.

Os produtos podem ser classificados, de acordo com a sensibilidade ao etileno durante a maturação, em duas categorias: climatérios e não climatérios. Nos frutos climatérios, verifica-se que o etileno (produzido naturalmente ou adicionado externamente) influencia no processo de amadurecimento do produto imaturo, o que não se observa nos frutos não climatérios (Pinto & Moraes, 2000).

A partir da colheita até a comercialização, os produtos hortícolas, em geral, necessitam ser conservados para preservar as suas propriedades organolépticas, mecânicas e nutricionais desde a colheita a sua comercialização. São vários os métodos utilizados para a conservação de alimentos, tais como: conservação a frio (resfriamento, congelamento), secagem, radiação (radurização, radicação), ação do calor (branqueamento, pasteurização, defumação, etc.), por adição de elementos (aditivos, salga e cura, etc.), através de embalagem, por fermentação e osmose; a escolha do método dependerá das propriedades do alimento e viabilidade econômica (Evangelista, 1998).

2.1.4- Características gerais.

2.1.4.1- Banana

A banana, *Musa sapientum.*, cultivada na maioria dos países tropicais, é uma das frutas mais consumidas no mundo (Botrel et al., 2002). As bananas, por serem frutos de alto valor calorífico, energético e, principalmente, pelo conteúdo mineral e vitamínico que apresentam, são de grande importância na alimentação humana. Do ponto de vista tecnológico e comercial, por apresentar grande variedade de vitaminas e nutrientes, a utilização para consumo “in natura” e industrial tem sido elevada (Lima et al., 2000).

A banana prata (Figura 2.1), subgrupo Prata, subgênero *Musa sapientum*, muito cultivada no Brasil, devido a sua alta perecibilidade, tem sido comercializada somente no mercado interno (Moreira, 1987; Alves, 1997; citados por Botrel et al., 2002).



Figura 2.1 - Banana prata.

As condições de amadurecimento e armazenamento influenciam nas qualidades alimentícias e comerciais da banana (Campos et al., 2003). Tendo em vista que a banana é um fruto climatérico (fruto sensível ao etileno, ou seja, amadurece pela ação do etileno) que após a colheita apresenta alta taxa respiratória e alta produção de etileno, por isso, é altamente perecível (Pinheiro et al., 2005).

A vida de prateleira da banana é curta devido sua rápida senescência (envelhecimento), podendo visualmente ser percebida através do aparecimento de manchas escuras em sua casca amarelo-esverdeada (Quevedo et al., 2008).

De acordo com Lichtemberg et al. (2001) em bananas do subgrupo Cavendish o escurecimento do tecido vascular, normalmente indica que os frutos foram submetidos a temperaturas abaixo de 13 °C, tendo em vista que, temperatura variando entre 13 e 14 °C com umidade relativa entre 85 e 95%, são recomendadas para a conservação de banana (Asrhae, 1994). Entretanto, Lichtemberg et al. (2001), em estudo sobre a resistência à frio das bananas dos grupos Grande Naine (Cavendish), Enxerto (Prata), Mysore (prata) e FHIA-0 1, concluíram que as bananas do subgrupo prata podem ser armazenadas sob temperaturas inferiores a 12 °C.

2.1.4.2- Laranja

A laranja (Figura 2.2) é uma cultura de grande importância tanto no Brasil quanto na América do Norte. No mercado interno é consumida na forma in natura enquanto que no mercado externo predomina o consumo na forma de sucos concentrados, principalmente (Barboza et al., 2002).

Na composição química da laranja encontram-se grandes quantidades de vitamina C, B₁, cálcio, fósforo e magnésio (Frutas, 1996).

A laranja valência (*Citrus sinensis Osbeck*), tem forma quase esférica, peso médio de 150 g, é uma das frutas cítricas mais exportadas pelo Brasil (Mederos, 2000).



Figura 2.2 - Laranja.

Para o armazenamento da laranja, recomenda-se temperatura de 7,2 °C sob umidade relativa de 85 a 90%, contudo sua resistência ao transporte e armazenamento varia entre 3 a 8 semanas (Frutas, 1996).

Segundo Kluge et al. (2007), as condições ideais para a conservação refrigerada da laranja é temperatura entre 3 e 9 °C e umidade relativa entre 85 e 90%, dessa forma, garante-se um período de conservação de 3 a 8 semanas, dependendo da cultivar e das condições climáticas.

2.1.4.3- Morango

O morango (Figura 2.3) é uma fruta do grupo dos pequenos frutos. No Brasil, as mais conhecidas são: o morango, a amora, a framboeza e o mirtilo. Estes frutos, de clima temperado, têm origem no Hemisfério Norte, e sua participação na hortifruticultura brasileira é pequena, contudo ultimamente, devido às propriedades nutracêuticas, por serem ricos em antioxidantes, tem crescido o interesse de produtores brasileiros em cultivá-las. Estas características influenciaram na demanda tendo em vista o interesse da população em consumir alimentos saudáveis e à base de frutos. A conservação pós-colheita destes frutos é relativamente curta, devido à sua alta atividade respiratória e sua grande área de exposição, que facilitam a desidratação e o ataque de fungos.



Figura 2.3- Morango.

De acordo com o modelo de respiração, as frutas podem ser divididas em: climatéricas e não-climatéricas, o morango está no grupo das frutas não climatéricas nas quais ocorre uma diminuição gradual da respiração e não há produção de etileno endógeno.

O morango (*Fragaria*, spp) é um pseudofruto, de clima temperado, com textura suculenta, sabor e aroma agradáveis. Pode apresentar formato cônico, de cunha alongada ou irregular, é longo e graúdo, quando proveniente das flores primárias e secundárias, e pequenos quando das flores terciárias ou quaternárias. Apresenta sabor subácido, aroma intenso, poupa de textura média e de coloração vermelha clara a intensa, epiderme de coloração branca a vermelha (como mostra a Figura 2.3).

A composição química do morango é assim constituída: umidade 89%, carboidratos 7,34%, proteínas 0,8%, gorduras totais 0,68%, fibra alimentar 2,18%, cálcio 32 mg/100 g, ferro 8,4 mg/100 g, sódio 11,2 mg/100 g e vitamina C 76 mg/100 g (ITALBRAZ, 2008).

A colheita realiza-se de forma manual, no ponto de colheita "maduro" para fins industriais, e de $\frac{1}{2}$ maduro a $\frac{3}{4}$ maduro para comercialização "in natura". A cor é o parâmetro mais importante para definir o ponto de colheita dos morangos. De modo geral, o fruto deve ter no mínimo 50% a 75% da superfície de cor vermelho-brilhante, quando destinado para consumo fresco. O ponto de colheita pode variar também em função da distância, do tempo de transporte, da temperatura ambiente, da cultivar e da finalidade do produto. (EMBRAPA, 2010). A cultivar Camarosa tem ciclo precoce e alta capacidade de produção, os frutos são de tamanho grande, epiderme vermelho escura, polpa de textura

firme e de coloração interna vermelha brilhante, escura e uniforme, sabor sub-ácido próprio para o consumo in natura e industrialização.

O resfriamento por ar forçado é o método adequado para resfriar os morangos, porque além de ser uma forma rápida de resfriamento, evita a umidade sobre a fruta, que os morangos não toleram. Com um pré-resfriamento eficiente, a temperatura do morango poderia ser reduzida, por exemplo, de 25 para 5 °C, em duas ou três horas.

Em geral, o morango pode ser conservado à temperatura de 0 °C com 90 a 95% de umidade relativa durante 3 a 5 dias. Para umidade 85-90% e temperatura 0°C o tempo de armazenamento fica entre 5 a 10 dias (EMBRAPA, 2010). É essencial que durante o transporte, o morango seja refrigerado, pois assim pode-se manter a cadeia do frio.

2.1.4 .4- Limão

O limão (Figura 2.4), *Citrus limonium*, família botânica Rutáceas, é a fruta mais conhecida e usada no mundo. De diversas aplicações na vida doméstica, tudo nele é aproveitável. Da casca extrai-se uma essência aromática usada em perfumaria, no preparo de licores e várias outras utilidades deste cítrico fácil de ser adquirido durante o ano todo, nas suas diversas variedades. Em geral, todos os tipos de limão têm aspecto semelhante, embora mudem no tamanho e na textura da casca, que pode ser lisa ou enrugada. Quanto à cor, variam do verde-escuro ao amarelo-claro, exceto uma das espécies, que se assemelha a uma mexerica. Excelente fonte de vitaminas C, vitamina A e vitamina do complexo B, além de sais minerais, como cálcio, fósforo e ferro.



Figura 2.4 – Limão.

As variedades de limão mais conhecidas são: limão-galego, pequeno e suculento, de casca fina, cor verde-clara ou amarelo-clara; limão-siciliano, grande de casca enrugada e grossa, menos suculento e mais ácido que o galego; limão-cravo, parecido com uma mexerica, tem casca e suco avermelhados e sabor bem forte; limão Taiti, de tamanho médio, casca verde e lisa, muito suculento e pouco ácido.

A lima ácida Tahiti, (*Citrus latifolia Tanaka*), conhecida no mercado consumidor como limão Tahiti é uma espécie americana de citros, originária da Califórnia, Estados Unidos. Surgiram a partir de sementes de limão introduzidas do Tahiti, por volta de 1870. Posteriormente, difundiu-se pelos países das três Américas. É produzido comercialmente apenas no continente americano. Foi introduzido no Brasil a partir do estado de São Paulo por volta de 1940 (SEAGRI, 2010).

O limão à temperatura entre 5 e 7 °C, umidade relativa maior que 90% tem suas propriedades nutricionais preservadas por um período entre 60 a 90 dias (Fachinello & Nachtigal, 1996).

2.2 - Conservação a frio

O emprego de baixas temperaturas é uma das técnicas mais antigas para conservar alimentos, tornando-se, no século XIX, uma das grandes inovações da Tecnologia de

Alimento com a produção contínua de frio para aplicação na indústria alimentícia (Pereda et al., 2005).

O calor é uma forma de energia inerente à matéria. O termo “frio” é utilizado para expressar a ocorrência de um nível relativamente baixo de calor. A troca de calor ocorre entre corpos quando um deles apresenta temperatura mais elevada que outro. Essa transferência de calor sempre flui naturalmente do corpo cuja temperatura seja mais elevada para outro de temperatura menor.

O armazenamento pode ser feito utilizando-se vários métodos, contudo, a refrigeração é um processo mais econômico utilizado para frutas e hortaliças frescas. Para controlar o amadurecimento e reduzir a ação de microrganismos que provocam doenças são utilizados outros métodos que complementam o abaixamento da temperatura (Chitarra & Chitarra, 2005).

A conservação a frio consiste na inibição total ou parcial dos principais agentes responsáveis pela alteração dos alimentos que são: o crescimento e a atividade dos microrganismos, as atividades metabólicas dos tecidos animais e vegetais, as enzimas e as reações químicas.

As técnicas de conservação, bem como o processo de frio, fornecem ao produto condições para retardar a ação de microrganismos e enzimas, de forma a melhorar as qualidades características do alimento fresco (Evangelista, 1998). O armazenamento à frio pode ser realizado de duas formas diferentes: por refrigeração e por congelamento (Gava, 1998).

2.2.1 – Refrigeração

A refrigeração é entendida como a redução e manutenção da temperatura dos alimentos acima de seu ponto de congelamento, ocorrendo apenas mudanças do calor sensível do produto. Como a temperatura não é muito grande, a refrigeração dos alimentos prolonga sua vida útil durante um período limitado (dias ou semanas), que depende, entre

outros fatores, das características do produto e da temperatura de armazenamento (Pereda et al., 2005).

As técnicas de refrigeração e congelamento, utilizadas na conservação dos produtos hortifrutícolas, devidamente controladas têm grande influência na redução dos seguintes efeitos: perda de água (peso e apresentação), deterioração devido a microrganismos (bactérias e fungos), crescimento indesejável (brotos), da produção de etileno (agente de amadurecimento), envelhecimento devido ao amadurecimento (Pinto & Morais, 2000).

O método de refrigeração é utilizado como uma técnica de conservação básica, ou como uma forma de conservação temporária de matérias-primas antes do processamento. Nesse tipo de tratamento, dependendo da natureza do alimento, são recomendadas temperaturas entre -1,5 e 10 °C (Silva, 2006).

O resfriamento dos produtos será efetivamente eficiente à medida que o processo tiver início o mais próximo do momento da colheita. Dessa forma, para evitar perdas precoces é aconselhável que a cadeia do frio seja iniciada imediatamente após a colheita. Os métodos utilizados nesse processo são: resfriamento à ar, resfriamento à vácuo (ao evaporar a água provoca o resfriamento do produto) e resfriamento a água (hidro-resfriamento). O nitrogênio líquido também vem sendo muito usado em certos países (Gava, 1998).

A refrigeração pode ser administrada de forma rápida ou contínua (Evangelista, 1998). A refrigeração rápida, tecnicamente conhecida como pré-refrigeração ou refrigeração a curto prazo, é realizada com a finalidade de dotar o produto de condições necessárias para melhor suportar o meio ambiente, antes de ser consumido, levado a indústria como matéria-prima, ou ser novamente trabalhado pelo frio. Esse processo de resfriamento iniciado no campo, continuando no armazenamento até a comercialização ou industrialização, é denominado “cadeia do frio”, cujo objetivo é prolongar o tempo de prateleira dos produtos in natura e garantir a qualidade dos produtos destinados à industrialização.

Segundo Ashrae (1998), é necessária a aplicação do resfriamento rápido nos produtos hortícolas visto que, em geral, são colhidos a uma temperatura superior à recomendada para armazenagem. Essa técnica permite a remoção do “calor de campo” e de estocagem.

A temperatura recomendada de resfriamento é peculiar a cada produto, dessa forma, após o resfriamento, este parâmetro deve ser respeitado para garantir a qualidade desejada, conforme Tabela 2.1. Se ocorrer o reaquecimento, ou seja, a quebra da “cadeia do frio”, põe em risco os benefícios adquiridos pelo resfriamento rápido imediato. O produto, ao sair da “cadeia do frio” sofrerá condensação de água na superfície. A umidade na superfície juntamente com o aumento da temperatura pode acelerar a atividade de microrganismos resultando na deterioração, precoce do produto (Cortez et al., 2002).

Na Tabela 2.1, estão relacionadas à temperatura ideal de armazenamento e capacidade aproximada de conservação para as diferentes frutas de clima temperado. As variações encontradas para o tempo aproximado de conservação são devido às diferenças na capacidade de conservação das variedades de cada espécie.

Tabela 2.1. Temperatura ideal de armazenamento e capacidade aproximada de conservação para as diferentes frutas de clima temperado

Fruta	Temperatura de Armazenamento (°)	Tempo aproximado de conservação
Ameixa	-0,5 a 0	2 – 5 semanas
Amora	-0,5 a 0	2 – 3 dias
Caqui	-1 a 1	1 – 3 meses
Cereja	-1 a -0,5	2 – 3 semanas
Damasco	-0,5 a 0	1 – 3 semanas
Figo	0 a 1	7 – 10 dias
Framboesa	-0,5 a 0	2 – 3 dias
Kiwi	-0,5 a 0,5	3 – 5 meses
Maçã	-1 a 4	1 – 10 meses
Mirtilo	-0,5 a 0	2 semanas
Nectarina	-0,5 a 0	2 – 4 semanas
Pêra européia	-1,5 a -0,5	2 – 7 meses
Pêra asiática	1,0	5 – 6 meses
Pêssego	- 0,5 a 0	2 – 4 semanas
Uva de mesa	-1,0 a -0,5	1 – 6 meses

Fonte: Kluge et al. (2002)

Conforme descrito acima, o pré-resfriamento tem por finalidade a remoção rápida do calor do campo dos produtos recém colhidos para em seguida, proceder as demais etapas da cadeia produtiva que são: armazenamento, processamento e transporte para locais distantes.

A refrigeração de alimentos se realiza através dos seguintes métodos de refrigeração (Evangelista, 1998):

a) Refrigeração natural: é um método mais simples de abaixamento de temperatura até próximo do ponto de congelamento, abrangendo uma extensa faixa de frio. É uma técnica conseguida através de agentes naturais de resfriamento descritos a seguir: os locais de sombra, as noites frias, ambientes protegidos de raios solares, a água com baixa temperatura, os gelos dos lagos, rios e mares. Este método tornou-se obsoleto diante da implantação dos modernos recursos frigoríficos;

b) Refrigeração por gelo artificial: é uma técnica muito utilizada na refrigeração e pré-resfriamento de carnes, pescado e frutas. A utilização do gelo pode ser feita através de gelo britado, em escamas, seco ou com substâncias químicas ou antibióticos. Este método ainda é muito utilizado em veículos de transportes de alimentos;

c) Refrigeração por água refrigerada: é realizada através do gelo artificial ou por processo mecânico. É empregada na refrigeração ou pré-refrigeração de determinados produtos;

d) Refrigeração mecânica: tem por finalidade produzir, transmitir e manter em uma substância ou espaço confinado (câmara frigorífica, geladeira, etc), temperatura menor que à da atmosfera circundante.

Comparando o resfriamento de laranja Valência (*Citrus sinensis Osbeck*) em três sistemas de resfriamento: com ar forçado, com água gelada e em câmara de estocagem, através de estudos experimentais, Teruel et al. (2001a) concluíram, que as câmaras convencionais devem ser usadas apenas para a estocagem e a manutenção da temperatura de resfriamento.

Entre os sistemas de resfriamento por água gelada e por ar forçado, em experimento de resfriamento rápido de laranja valência, foi comprovado que o resfriamento por água gelada foi mais eficiente (Teruel et al., 2003).

2.2.2 – Armazenamento a frio

O armazenamento refrigerado é um dos principais métodos utilizados para conservar a fruta na sua forma in natura, por manter o metabolismo de forma que evite a sua rápida deterioração (Kluge et al., 2006).

Para que a refrigeração seja efetiva, em primeiro lugar, é necessário que a matéria-prima seja de boa qualidade e o processo de resfriamento seja aplicado imediatamente após a colheita. Não bastando apenas introduzir os alimentos em recintos mantidos em baixa temperatura, mas é fundamental que a redução da temperatura seja rápida. Só assim reduz-se a possibilidade de que o produto se altere antes de atingir a temperatura adequada (Pereda et al., 2005).

Alguns fatores que devem ser controlados no armazenamento por refrigeração são: a temperatura de armazenamento, a circulação do ar, a umidade e a composição da atmosfera de armazenamento (Gava, 1998).

As frutas poderão estar conservadas por mais tempo em boas condições de comercialização quando a redução de velocidade de deterioração for realizada através da rápida remoção de calor após a colheita (pré-resfriamento), combinado com o armazenamento refrigerado, na temperatura e umidade relativa do ar recomendada (Brasnan & Sun, 2001; Dussán-Sarria & Honório, 2005).

Malgarim et al. (2005), estudando a variação de temperatura durante o armazenamento refrigerado na qualidade pós-colheita de ameixas cv. Amarelinha, observaram que a alternância de temperaturas durante o armazenamento refrigerado reduz o período de conservação da fruta.

O pré-resfriamento das frutas antes de seu armazenamento é muito importante, pois a maioria das câmaras de armazenagem não possui capacidade suficiente de refrigeração e nem o movimento de ar com velocidade suficiente para efetuar um resfriamento rápido dos produtos recém-armazenados (Castro et al., 2000; Louzada et al., 2003).

2.3 - As cinéticas de resfriamento, congelamento e pós-congelamento

Na Figura 2.5 tem-se a representação gráfica da curva típica de resfriamento, congelamento e pós-congelamento de alimentos. A conservação de alimentos através do processo de redução de temperatura pode ser representada em três estágios a seguir: resfriamento (a-b), congelamento (b-c) e pós-congelamento (c-e) (Delgado & Sun, 2001; Rahman et al., 2002).

A primeira fase, que corresponde ao tempo decorrido de a até b, o produto é resfriado desde a temperatura inicial T_1 até à temperatura crioscópica (inicial de congelamento) T_{cr} . O tempo decorrido de b até c corresponde ao período de congelamento da maior parte da água existente no material. Para substâncias puras, este processo ocorre à temperatura constante. Porém, no caso de soluções complexas (solução aquosa no interior dos alimentos), o congelamento ocorre numa determinada faixa de temperatura, o que confere à curva uma ligeira inclinação. O tempo decorrido de c até e, corresponde ao período em que o produto continua a perder calor até atingir o equilíbrio térmico com o meio refrigerante (Silva, 2005).

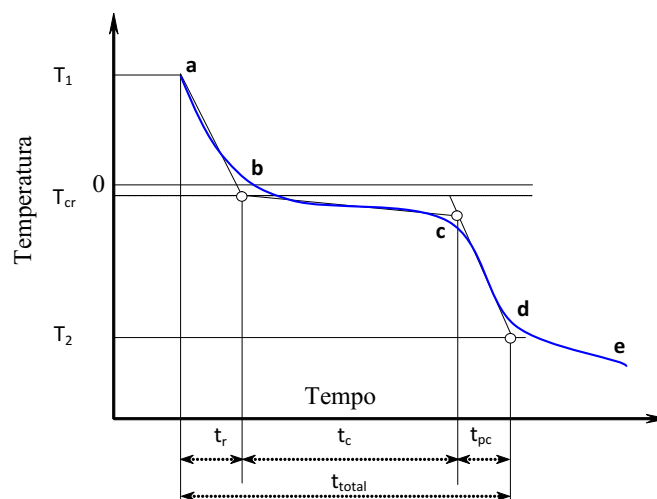


Figura 2.5 - Transferência de calor durante o resfriamento, congelamento e pós-congelamento de um produto alimentício; T_1 e T_2 – temperatura inicial e final do produto no centro; t_r – tempo de resfriamento; t_c – tempo de congelamento; t_{pc} – tempo de pós-congelamento. Fonte: Silva (2005).

Teruel et al. (2002) estudando o resfriamento de banana-prata (*Musa balbisiana* Colla) através de um sistema com ar forçado a 7 °C, umidade relativa de $87,6 \pm 3,8\%$, e velocidade do ar entre 1,0 e 0,2 m/s, analisaram as curvas de resfriamento da banana e concluíram que o menor tempo de resfriamento foi atingido no tratamento que combinou a maior taxa de ar com a embalagem de maior área de aberturas.

Cavalcanti Mata et al. (2003) observaram durante o congelamento do fruto de cajá, através da curva de congelamento, que na fase, correspondente ao congelamento em si do fruto, na temperatura de -30 °C, o tempo de congelamento foi de 75 minutos; na temperatura -60 °C foi de 44 minutos e na temperatura de -90 °C de 40 minutos. Os autores também perceberam que nessa mesma fase houve uma inclinação da curva, e concluíram que teoricamente não deveria existir, se o congelamento fosse lento, pois nessas condições, toda a energia seria utilizada para congelar o produto, ou seja, a energia seria utilizada para formar os cristais de gelo no interior do fruto.

2.4 – O estado da arte no resfriamento de alimentos

Ferrua & Singh (2009) realizaram simulação, utilizando a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para predizerem o resfriamento de morango por ar-forçado. No estudo analisaram a eficiência do resfriamento do fruto variando parâmetros como, por exemplo: a direção da corrente de ar dentro do sistema. Concluíram que a inversão da corrente de ar melhora a eficiência do sistema. Os mesmos autores fizeram uma análise numérica do processo de resfriamento de morangos embalados resolvendo equações de massa, quantidade de movimento e energia dentro do sistema. Verificaram que o comportamento da corrente de ar dentro do sistema é muito influenciado pela estrutura de embalagem e a forma e desenho de abertura de caixas e bandejas. Os resultados numéricos proveram uma compreensão importante sobre os fenômenos de transporte complexos dentro de pacotes individuais de morangos durante o resfriamento por ar-forçado.

Seibert et al. (2008), estudaram danos provocados pelo frio e alterações durante o armazenamento de pêssegos colhidos em dois estádios de maturação. Concluíram que os

pêssegos colhidos de vez a firmeza da polpa foi maior do que nos pêssegos colhidos maduros, contudo, após transferidos para 20 °C não apresentou diferença.

Ravindra & Goswami (2008) compararam o desempenho de métodos de pré-resfriamento de manga. O pré-resfriamento foi realizado pelos métodos de atmosfera modificada com a utilização de nitrogênio líquido e hidro-resfriamento. Os autores concluíram que o tempo de resfriamento da fruta utilizando o hidro-resfriamento é menor que realizando o processo com ar forçado, contudo, acrescentando a este último método, o nitrogênio líquido, o resultado obtido foi melhor e conseqüentemente eficaz no que diz respeito à redução de danos causados pelo frio.

Bairi et al. (2007), utilizando um método analítico baseado na equação de Fourier, determinaram a difusividade térmica de alimentos (carne vermelha) com formatos cilíndricos, para várias temperaturas de resfriamento. Neste estudo, observaram que a difusividade térmica obtida tem precisão de cerca de 4%.

Kluge et al. (2006), armazenaram sob refrigeração, após tratamentos: laranja Valência, tangor Murcott e lima ácida Tahiti. Nesse estudo verificaram os efeitos na redução de injúrias pelo frio e outras características bioquímicas. Aplicaram quatro tratamentos: T1 (controle) armazenaram as frutas a 1 °C; T2 realizaram o aquecimento rápido das frutas com água quente à 53 °C, por 2 dias, seguido de armazenamento a 1 °C; e T3, promoveram o aquecimento lento das frutas em câmara regulada para 37 °C, por 2 dias, em seguida, armazenaram a 1 °C; e T4, aquecimento intermitente em ciclos de 6 dias a 1°C+1 dia a 25 °C. Armazenaram as frutas por 90 dias a 1 °C e 90 a 95% de Umidade Relativa. Concluíram que a resistência das frutas ao frio, em virtude dos tratamentos térmicos aplicados, pode ter relação com a atividade das enzimas antioxidativas.

De acordo com Silva (2005), os métodos disponíveis para a determinação de um problema físico são essencialmente os métodos analíticos, os métodos numéricos e experimentos em laboratórios.

Os métodos analíticos e numéricos constituem a classe dos métodos teóricos, visto que têm o objetivo de resolver equações diferenciais, entretanto, a diferença entre esses métodos está na complexidade da equação que cada um desses métodos pode resolver (Maliska, 2004).

O desenvolvimento de trabalhos que apresentam modelos matemáticos analíticos e/ou empíricos para obter a curva e o tempo de resfriamento de frutas de geometrias diferentes tem sido objeto de pesquisa de vários autores, Pirozzi (2005), Ferrua (2009), Teruel (2001).

Um estudo teórico (numérico) para obtenção das curvas e do tempo de resfriamento de frutas esféricas, utilizando um modelo matemático baseado na equação de Fourier, em uma dimensão e em coordenadas esféricas foi desenvolvida por Amendola & Teruel (2005). Os autores utilizaram, para a solução da equação matemática, o Método das Diferenças Finitas (MDF) e o esquema implícito, tendo concluído que o modelo e método aplicados mostram-se aptos para caracterizar o processo de resfriamento das frutas.

Pirozzi & Amendola (2005), em estudo do resfriamento rápido de morango com ar forçado por simulação numérica, utilizaram o modelo matemático escrito em coordenadas esféricas de forma unidimensional. Neste trabalho, concluíram que a metodologia de simulação numérica, utilizada para o resfriamento do morango, foi capaz de determinar o tempo de resfriamento da fruta.

Van Der Sman (2003), através de um modelo numérico, baseado na equação de Fourier, na forma unidimensional, estudou a condução de calor em alimento com formato cilíndrico durante o resfriamento, e concluiu que o modelo desenvolvido é capaz de prever a temperatura média e superficial de um sólido cilíndrico ao longo do tempo de resfriamento. Segundo o mesmo autor o modelo desenvolvido também pode ser aplicado para outras formas geométricas simples como esferas e placas planas.

Massoni (2002) realizou simulação numérica do resfriamento de um sólido com formato cilíndrico, submetido a um fluxo de ar resfriado. Utilizou um modelo numérico unidimensional em coordenadas cilíndricas, tendo constatado que o modelo desenvolvido prevê, de forma coerente, o comportamento físico esperado para sólidos cilíndricos submetidos a um processo de resfriamento convectivo.

Segundo Farias (2002), que realizou a simulação numérica do processo de secagem de corpos com geometria elipsoidal, o método integral baseado em Galerkin mostrou-se eficiente para solução da equação de difusão no sistema de coordenadas cilíndricas. O autor concluiu que a mesma solução pode descrever outros fenômenos em regime transiente, tais como: umidificação, resfriamento ou aquecimento.

Teruel et al. (2001), desenvolveram um estudo numérico, para a obtenção das curvas de resfriamento de laranja Valência (*Citrus sinensis* O.) e banana prata (*Musa balbisiana* Colla), em posições diferentes ao longo do leito e acondicionadas em embalagens com 40% de área efetiva de abertura, através de um modelo matemático bidimensional, em coordenadas esferoidais prolatas. Os autores concluíram que o modelo matemático aplicado mostrou-se adequado para uma caracterização do fenômeno de transferência de calor.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizada a solução analítica de um modelo matemático, empregando método de integral baseado em Galerkin, para prever o comportamento da temperatura durante o resfriamento de sólidos com forma arbitrária.

3.1 - Modelagem matemática

Para descrever o transporte de calor no interior de sólidos, considere-se a equação da difusão de calor no regime transiente, sem geração de energia (Lei de Fourier) como segue:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.1)$$

A solução da equação (3.1), de acordo com Payne et al. (1986), pode ser escrita da seguinte forma:

$$T = \sum_{n=1}^N C_n \psi_n e^{-\gamma_n t} + T_e \quad (3.2)$$

Substituindo a equação (3.2) na equação (3.1), considerando $\gamma_n, C_n, \rho, C_p, T_e$ e k constantes e ψ_n independente de t , para cada valor de n , pode-se escrever:

$$\rho C_p \gamma_n \psi_n + \nabla \cdot (k \nabla \psi_n) = 0 \quad (3.3)$$

A função ψ_n será obtida como uma combinação linear de um conjunto de funções (Farias, 2002). Seus membros são linearmente independentes, de forma que cada membro satisfaça as condições de contorno homogêneas

$$\psi_n = \sum_{j=1}^N d_{nj} f_j \quad (3.4)$$

onde f_j é um elemento de um conjunto de funções de base, e d_{nj} são constantes a serem determinadas.

A função f_j é denominada de função de Galerkin; sendo obtida pela multiplicação de funções φ_n , com $n = 1, 2, 3, \dots, N$, por um elemento de um conjunto completo de funções. A função φ_n , que define o contorno do sólido, é escolhida de forma que as condições de contorno homogêneas sejam satisfeitas. A função f_j com j variando de 1 até N constitui um conjunto de funções de base (Farias, 2002).

Substituindo a equação (3.4) na equação (3.3), tem-se:

$$\sum_{j=1}^N d_{nj} [\rho C_p \gamma_n f_j + \nabla \cdot (k \nabla f_j)] = 0 \quad (3.5)$$

Multiplicando ambos os membros da equação (3.5) por $f_i dV$ e integrando, tem-se:

$$\sum_{j=1}^N d_{nj} \left[\int_V \rho C_p \gamma_n f_i f_j dV + \int_V f_i \nabla \cdot (k \nabla f_j) dV \right] = 0 \quad (3.6)$$

A equação (3.6), na forma matricial, pode ser reescrita da seguinte forma:

$$(\bar{A} + \gamma_n \bar{B}) \bar{d}_n = 0 \quad (3.7)$$

onde \bar{A} e \bar{B} são matrizes quadradas de $n \times n$ elementos.

Os elementos das matrizes \bar{A} e \bar{B} , são dados por:

$$a_{ij} = \int_V f_i \nabla \cdot (k \nabla f_j) dV \quad (3.8)$$

$$b_{ij} = \int_V \rho C_p f_i f_j dV \quad (3.9)$$

Por outro lado, as seguintes identidades são válidas:

$$\int_V f_i \nabla \cdot (k \nabla f_j) dV = \int_V \nabla \cdot (k f_i \nabla f_j) dV - \int_V k \nabla f_i \cdot \nabla f_j dV \quad (3.10)$$

e

$$\int_V f_i \nabla \cdot (k \nabla f_j) dV = \int_S k f_i \nabla f_j \cdot \vec{n} dS - \int_V k \nabla f_i \cdot \nabla f_j dV \quad (3.11)$$

ou ainda,

$$\int_V f_i \nabla \cdot (k \nabla f_j) dV = \int_S k f_i \cdot \left(\frac{\partial f_j}{\partial \vec{n}} \right) dS - \int_V k \nabla f_i \cdot \nabla f_j dV \quad (3.12)$$

Para a condição de 1ª espécie (T prescrito) tem-se $f_j = 0$. Assim, o 1º termo do segundo termo da equação (3.12) é zero, enquanto que o 2º termo é sempre simétrico.

Resolvendo-se a equação (3.7) obtêm-se os coeficientes γ_n e d_{nj} . A discussão do método utilizado neste trabalho é apresentada a seguir.

Os autovalores $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N$ podem ser determinados por um método analítico se N for pequeno; casos contrário ($N > 4$), são necessários procedimentos numéricos para a obtenção desses autovalores.

De acordo com a literatura, são muitos os métodos numéricos (Carnahan et al., 1969) com diversos níveis de precisão. Todavia, para utilizar estes métodos, a equação (3.7) pode ser representada e reescrita da seguinte forma:

$$(\tilde{A} + \gamma_n \tilde{B}) \tilde{d}_n = 0 \quad (3.13)$$

onde $\tilde{A} = L^{-1} \cdot A \cdot L^{-t}$, I é a matriz identidade e \tilde{d}_n é um vetor coluna com N elementos. A computação numérica rápida e precisa dos autovalores e autovetores, como por exemplo, o método de Jacobi é possível por A e B serem matrizes simétricas (Carnahan et al., 1969). Dentre os métodos numéricos pode-se citar a decomposição de Cholesky que é um método eficiente (Forsyth & Roler, 1967, citado por Beck et al., 1992). Para tal, deve-se decompor a matriz B em $L \cdot L^t$, onde L é uma matriz triangular inferior e L^t é sua matriz transposta, de tal forma que se pode escrever:

$$(L^{-1}.A.L^{-t} + I) \tilde{d}_n = 0 \quad (3.14)$$

onde L^{-1} e L^{-t} são as matrizes inversas de L e L^t , respectivamente.

Desde que a matriz $L^{-1}.A.L^{-t}$ seja simétrica, o método de Jacobi, que é eficiente computacionalmente, pode ser conveniente para a determinação dos autovalores (γ_n) e dos autovetores (d_{nj}).

Os autovetores d_n , computados da equação (3.7), embora sejam diferentes daqueles obtidos da equação (3.14), estão relacionados pela relação:

$$d_n = L^{-t} \cdot \tilde{d}_n \quad (3.15)$$

Segundo Boldrini et al. (1980), os autovalores e autovetores correspondentes da matriz C são exatamente os que satisfazem a equação $C.v = \lambda v$ ou $C.v = \lambda I.v$ ou ainda $(C - \lambda I) = 0$. Escrevendo esta equação explicitamente tem-se:

$$\begin{pmatrix} C_{11} - \lambda & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} - \lambda & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Definindo \tilde{C} como sendo a matriz $C - \lambda I$, acima, tem-se que $C - \lambda I = 0$. Se $\det \tilde{C} \neq 0$, sabe-se que o sistema de equações lineares homogênea, indicado na equação (3.16), tem solução única. Contudo, como $v_1 = v_2 = \dots = v_n = 0$ ($v = 0$) sempre é solução do sistema homogêneo, então esta única solução seria nula. Assim, a única maneira de se encontrar os autovalores v (soluções não nulas) da equação (3.16) é ter-se $\det \tilde{C} = 0$, ou seja,

$$\det(C - \lambda I) = 0 \quad (3.17)$$

Impondo-se essa condição, determina-se primeiramente, os autovalores λ , que satisfazem a equação, e depois os autovetores a eles associados, usando a seguinte equação:

$$(C - \lambda I).v = 0 \quad (3.18)$$

Para obtenção dos coeficientes C_n da equação (3.2), usa-se a condição, em $t = 0$, que fornece $T = T_0$. Então, da equação (3.2) obtém-se:

$$T_0 = \sum_{n=1}^N C_n \psi_n + T_e \quad (3.19)$$

Multiplicando ambos os membros da equação (3.19) por $f_i dV$ e integrando, tem-se que:

$$\int_V f_i (T_0 - T_e) dV = \int_V f_i \sum_{n=1}^N C_n \psi_n dV \quad (3.20)$$

O resultado da equação (3.20) será um conjunto de N equações algébricas lineares que permite a determinação de C_1, C_2, \dots, C_N o que completa a resolução do problema. Neste trabalho utilizou-se a condição de contorno de 1ª espécie.

O valor médio da temperatura no interior do sólido é dado por:

$$\bar{T} = \frac{1}{V} \int_V T dV \quad (3.21)$$

onde V é o volume do sólido em estudo.

3.2-Aplicação ao resfriamento de frutas

3.2.1- Morango

Para a simulação do resfriamento do morango considerou-se o fruto como a forma de um cone de revolução conforme Figura 3.1.

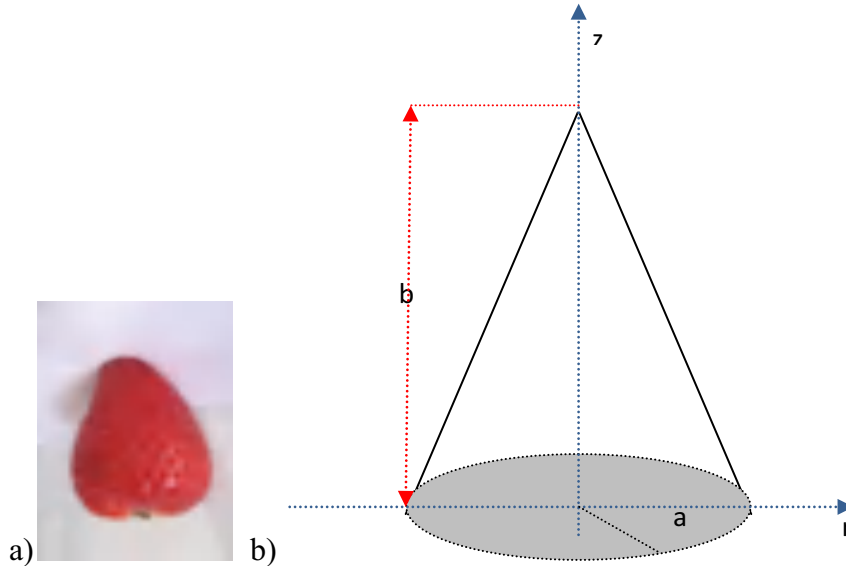


Figura 3.1 – Morango e sua representação geométrica.

O contorno do cone é definido por duas funções $\varphi_1 = \left(h - \frac{h}{R} r - z\right)$ e $\varphi_2 = z$ de tal forma que o produto delas é dado por:

$$\left(h - \frac{h}{R}r - z\right)z \quad (3.22)$$

sendo $h = b$ e $R = a$

Desde que $x^2 + y^2 = r^2$ (sólido de revolução), pode-se escrever:

$$z = h - \frac{h}{R}r \quad (3.23a)$$

e

$$dV = r dr d\theta dz \quad (3.23b)$$

Então, o volume do sólido ilustrado na Figura 3.1, será:

$$V = \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^{\left(h - \frac{h}{R}r\right)} r dz dr d\theta = \frac{1}{3} \pi R^2 h \quad (3.24a)$$

e sua área superficial será:

$$A = \pi a \left(a + \sqrt{a^2 + b^2}\right) \quad (3.24b)$$

Assim sendo, pode-se escrever, para uma condição de contorno de 1ª espécie

$$a_{ij} = - \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^{\left(h - \frac{h}{R}r\right)} k \nabla f_i \cdot \nabla f_j r dz dr d\theta \quad (3.25a)$$

$$b_{ij} = - \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^{\left(h-\frac{h}{R}r\right)} \rho C_p f_i f_j r dz dr d\theta \quad (3.25b)$$

O valor de C_n , para um sólido de revolução (cone), pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^{\left(h-\frac{h}{R}r\right)} f_i (T_0 - T_e) r dz dr d\theta = \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^{\left(h-\frac{h}{R}r\right)} f_i \sum_{n=1}^N C_n \psi_n r dz dr d\theta \quad (3.26)$$

As funções de base f_j , neste caso, são dadas por:

$$f_j(r, z) = \left(h - \frac{h}{R}r - z\right) r^{p-q} z^{q+1} \quad (3.27)$$

sendo $p = 0, 2, 4, \dots, N$ e $q = 0, 2, 4, \dots, P$. Neste trabalho utilizou-se 21 funções de base.

Para completar a modelagem matemática foram usadas as seguintes condições inicial e de contorno:

$$T(r, z, t = 0) = T_0 \quad (3.28a)$$

$$T\left[r, z = \left(h - \frac{h}{R}r\right), t\right] = T_e \quad (3.28b)$$

3.2.2- Banana, laranja e limão

Para o estudo teórico das frutas: banana, laranja e limão considerando os frutos como sendo um elipsóide de revolução (esferóide prolato) conforme Figura 3.2.

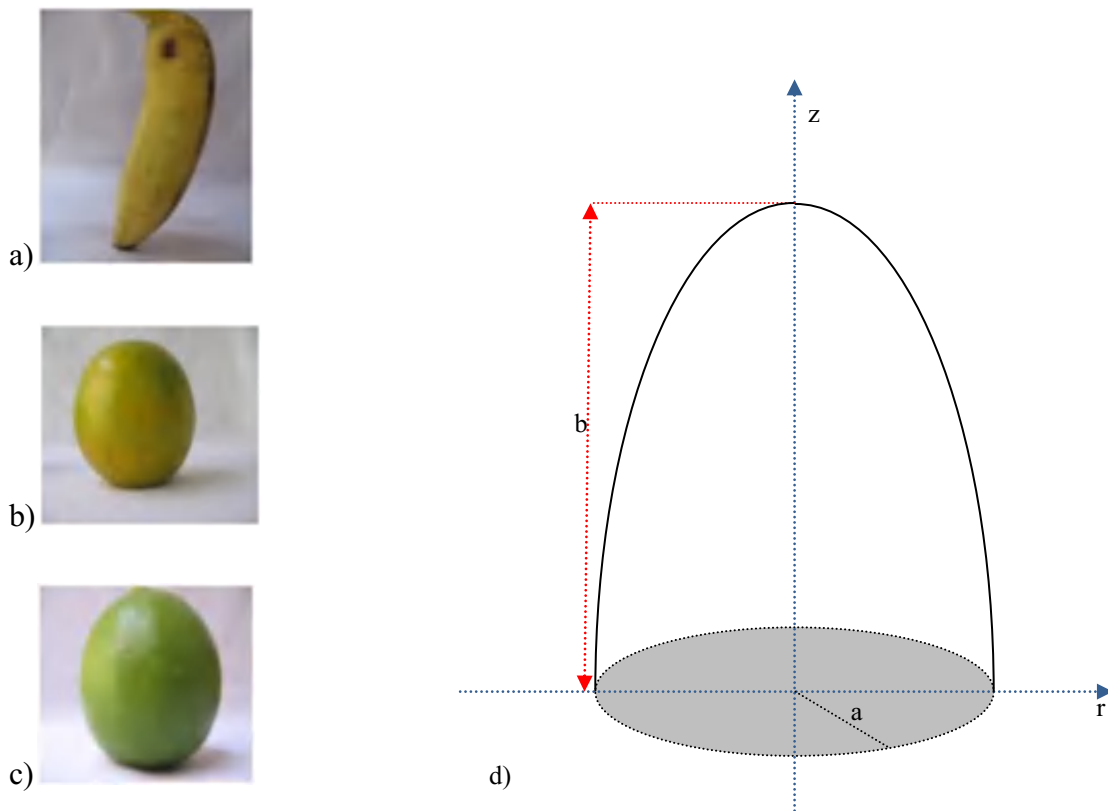


Figura 3.2 – Banana, laranja e limão e sua representação geométrica.

O contorno do esferóide é definido por:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (3.29a)$$

Desde que $x^2 + y^2 = r^2$ (sólido de revolução) pode-se escrever:

$$z = b \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad (3.29b)$$

e

$$dV = r dr d\theta dz \quad (3.29c)$$

Então, o volume total de um elipsóide, será:

$$V = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-\left(\frac{r}{a}\right)^2}} r dz dr d\theta = \frac{4}{3} \pi a^2 b \quad (3.30a)$$

e sua área superficial será:

$$A = 2\pi ab \left\{ \frac{a}{b} + \frac{\arcsen \left[\sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} \right]}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2}} \right\} \quad (3.30b)$$

Assim sendo,

$$a_{ij} = - \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-\left(\frac{r}{a}\right)^2}} k \nabla f_i \cdot \nabla f_j r dz dr d\theta \quad (3.31a)$$

$$b_{ij} = - \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-\left(\frac{r}{a}\right)^2}} \rho C_p f_i f_j r dz dr d\theta \quad (3.31b)$$

O valor de C_n , para um sólido de revolução (esferóide), pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-\left(\frac{r}{a}\right)^2}} f_i(T_0 - T_e) r dz dr d\theta = \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-\left(\frac{r}{a}\right)^2}} f_i \sum_{n=1}^N C_n \psi_n r dz dr d\theta \quad (3.32)$$

As funções de base f_j , neste caso, são dadas por:

$$f_j(r, z) = \left(1 - \frac{r^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2}\right) r^{p-q} z^q \quad (3.33)$$

Sendo $p= 0, 2, 4, \dots, N$ e $q= 0, 2, 4, \dots, P$. Neste trabalho utilizou-se 15 funções de base para a banana, a laranja e o limão. Enquanto que para o morango foram utilizadas 21 funções de base, tendo em vista os valores de $p=0, 1, 2, 3, \dots, N$ e $q=0, 1, 2, 3, \dots, P$.

Para completar a modelagem matemática foram usadas as seguintes condições inicial e de contorno:

$$T(r, z, t = 0) = T_0 \quad (3.34a)$$

$$T\left(r, z = b\sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2}, t\right) = T_e \quad (3.34b)$$

3.3 – Propriedades termofísicas

O conhecimento das propriedades termofísicas é de grande importância na análise da transferência de calor. Estas propriedades podem ser classificadas, basicamente, em duas categorias: as propriedades de transporte (condutividade térmica, difusividade térmica) e propriedades de equilíbrio ou termodinâmicas (densidade, calor específico). A intensidade dessas propriedades varia de acordo com o produto em estudo e está relacionada estrutura física do material, ou seja, depende do estado físico em que a matéria se encontra (Incropera e De Witt, 1998).

Os valores das propriedades termofísicas das frutas, usadas neste trabalho, encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados utilizados na simulação do resfriamento das frutas .

Propriedades termofísicas e geométricas	Banana Prata*	Laranja Valência*	Morango Camarosa**	Limão Tahiti**	Fonte
Condutividade térmica (k) em $Wm^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	0,500	0,500	0,462	0,525	
Calor específico (C_p) em $Jkg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	3660,00	3770,00	3852,04	3852,04	
Densidade (ρ) em kgm^{-3}	980	948	900	930	*Mederos (2000)
Eixo menor da fruta (a) em cm	2,04	3,78	1,38***	2,43***	**Ashrae
Eixo maior da fruta (b) em cm	7,81	3,89	3,43***	2,69***	(1998)
Temperatura inicial do fruto (T_0) em $^{\circ}C$	27,6	27,6	27,6	27,6	
Temperatura do ar de resfriamento (T_e) em $^{\circ}C$	7,0	7,0	7,0	7,0	

*** Determinados experimentalmente

A determinação dos eixos maior e menor do morango e do limão foi feita através da medição com um paquímetro digital. Foram medidos os três eixos ortogonais: longitudinal, intermediário e o eixo menor. As leituras das medidas foram realizadas no Laboratório de Armazenamento e Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas – LAPPA da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola do CTRN/UFCG.

Para determinar as dimensões dos frutos e obter um valor médio foram utilizados morangos da variedade Camarosa e limões Taiti adquiridos na feira livre da cidade de Goiana, estado de Pernambuco.

O valor do eixo maior corresponde à média aritmética da medida do eixo longitudinal de todos os frutos da amostra do morango e do limão. A medida do eixo menor foi obtida através da média aritmética das medidas dos eixos intermediário e eixo menor de todos os representantes da amostra.

Para a simulação do resfriamento das frutas, realizada no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, LCTF, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica do CCT/UFCG, foi desenvolvido um código computacional na plataforma Mathematica[®] 7.0.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1- Cinética de resfriamento

Na Figura 4.1 e 4.2 estão representadas as cinéticas de resfriamento, (temperatura adimensional média e no centro) das frutas. A Figura 4.1, mostra as curvas que representam a temperatura média das quatro frutas, enquanto que na Figura 4.2 estão representadas as curvas do resfriamento no centro de cada uma das frutas estudadas. As curvas representadas nas Figuras 4.1 e 4.2 estão descritas em função do número de Fourier (Fo). Observa-se que a temperatura adimensional média das frutas decresce rapidamente no início do processo. Nota-se que a temperatura adimensional média decresce mais rapidamente que no centro das frutas, cujo comportamento é mais suave, ou seja, cada uma das quatro frutas atinge, em média, a temperatura do meio de resfriamento mais rapidamente, enquanto o resfriamento no centro das frutas é mais demorado.

Pode-se ainda observar, ainda, a partir das cinéticas de resfriamento na Figura 4.2, que a temperatura do centro do morango decai mais rapidamente que a temperatura adimensional das outras frutas, isto é, o morango é resfriado em menor tempo adimensional que as demais frutas. Constata-se, ainda, que a curva de resfriamento da laranja e do limão tem um traçado coincidente, ou seja, o gráfico descrito apresenta uma

sobreposição das curvas de resfriamento dessas duas frutas. Quanto à banana, observa-se que o resfriamento dessa fruta ocorre em um tempo maior que as outras frutas estudadas. De acordo com Teruel et al. (2001), os corpos esféricos resfriam em menor tempo adimensional que corpos cilíndricos, em razão da relação área/volume (A/V). De acordo com os mesmos autores, a área superficial da esfera é menor que a área superficial do cilindro, e a relação A/V da esfera é maior que a do cilindro. Concordando com esta observação, verifica-se que o morango apresenta área e volume menores que as dos demais frutos estudados e sua relação A/V é maior. Neste trabalho, os valores da relação área/volume (A/V) encontrados para as frutas foi de 3,21791; 1,19559; 1,18729 e 0,786213 para o morango, o limão, a banana e a laranja, respectivamente.

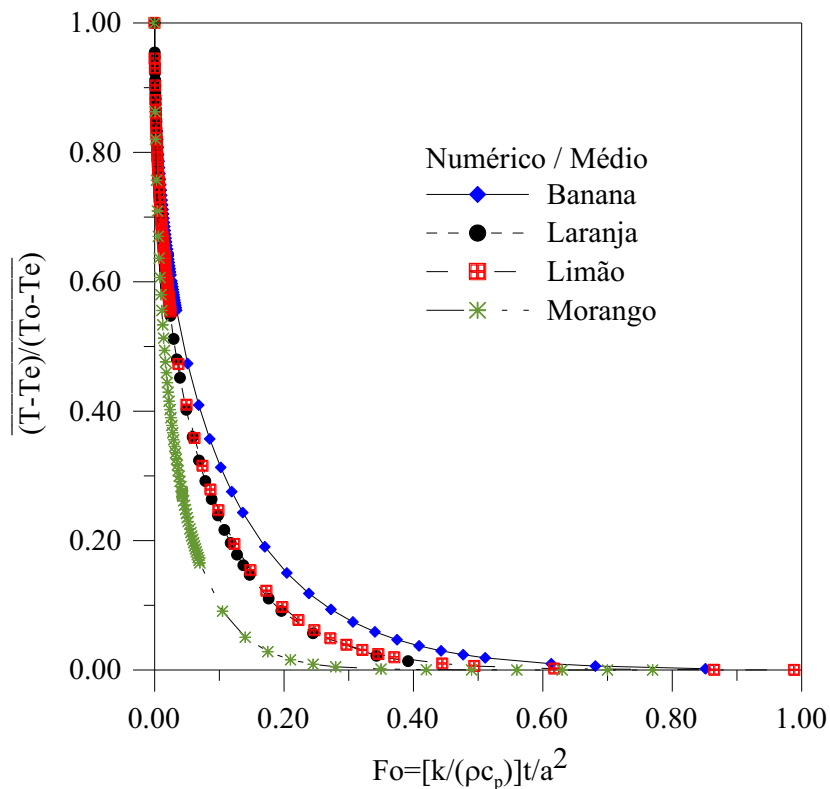


Figura 4.1- Comportamento da temperatura adimensional média das frutas em função do número de Fourier.

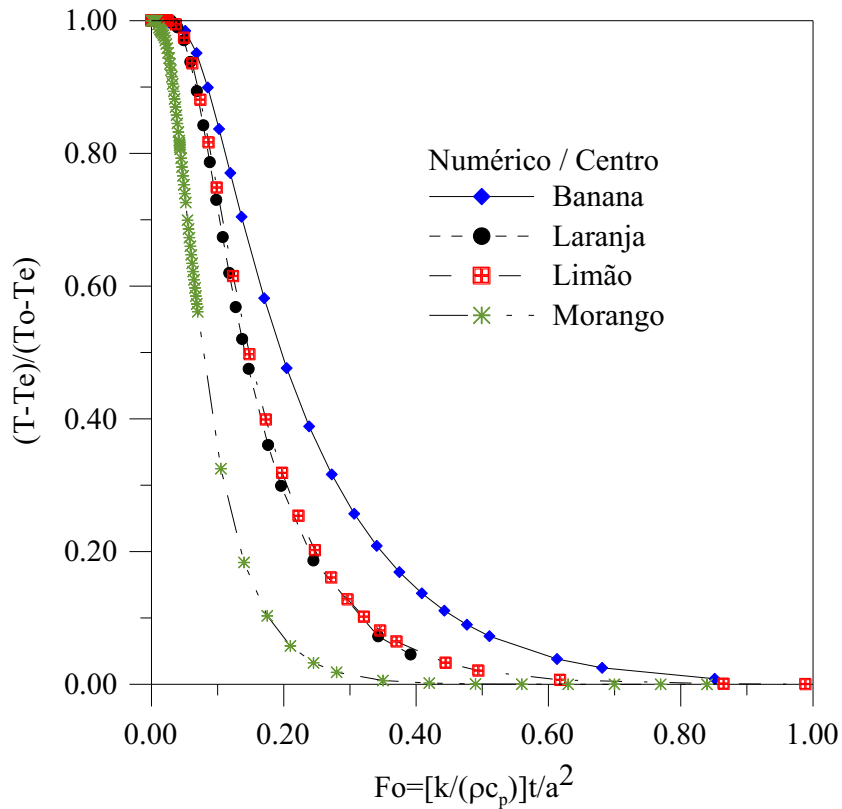


Figura 4.2- Comportamento da temperatura adimensional central das frutas em Função do número de Fourier.

Observando a Figura 4.2, percebe-se que a temperatura do centro do morango sofre uma redução superior à temperatura do centro das outras três frutas. Neste gráfico as curvas de resfriamento do centro das frutas apresentam o mesmo comportamento apresentado na Figura 4.1, ou seja, o centro do morango atinge a temperatura de resfriamento mais rapidamente que as outras três frutas, enquanto que o limão e a laranja atingem esta mesma temperatura em tempos próximos e inferiores ao tempo de resfriamento do centro da banana. Contudo vale ressaltar que os resultados apresentados estão na forma adimensional, portanto são independentes das propriedades termofísicas e temperatura inicial e de resfriamento das frutas.

4.2- Distribuição de temperatura

Têm-se, nas Figuras 4.3 e 4.4 a distribuição de temperatura adimensional dentro da banana em quatro intervalos de tempo diferentes: 150, 350, 500 e 1000 s, que correspondem aos os números de Fourier $Fo = 0,0511$, $Fo = 0,1192$, $Fo = 0,1703$ e $Fo = 0,3405$, respectivamente. Nota-se, em todas as distribuições de temperatura dentro da banana, que o resfriamento não é realizado de forma homogênea em toda a fruta. Verifica-se que o resfriamento da extremidade da banana (ponta), na direção z , é mais intenso. De acordo com Teruel et al. (2001) este fato pode ser explicado pela quantidade de massa apresentada pela fruta na região superior (ponta), deduzindo que nas pontas da banana o resfriamento ocorre em menor tempo que no restante do fruto.

O comportamento não homogêneo da distribuição de temperatura de resfriamento da banana poderá causar dano ao fruto e comprometer a sua qualidade, devido o resfriamento excessivo localizado na sua extremidade durante certo tempo. De acordo com Pinto & Morais (2000), os danos causados a hortifrutícola pelo frio ocorrem em função da temperatura e do tempo de exposição e expressam-se de várias maneiras: através de depressões na superfície, descoloração interna, colapso dos tecidos, aumento da susceptibilidade a doenças e redução da qualidade do fruto. Robinson (1996), citado por Lima e Mendonça (2005), relata que o resfriamento da banana do subgrupo Cavendish à temperatura de refrigeração inferior a $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ pode causar escurecimento do tecido vascular, após 48 horas.

Analisando-se a Figura 4.3a, constata-se que o tempo de resfriamento de 150 s não foi suficiente para a temperatura do centro da banana atingir $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, ao contrário, no seu centro a temperatura ainda continua inalterada ($27,6\text{ }^{\circ}\text{C}$), enquanto que na região próxima a superfície da banana a temperatura é praticamente $7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Observa-se ainda, que aproximadamente na metade do raio a temperatura adimensional é $T^* = 0,70$; neste ponto a temperatura real é $21,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto que, nas camadas mais próximas da superfície em $r = 1,74\text{ cm}$, e $r = 1,89\text{ cm}$, as temperaturas adimensionais verificadas são respectivamente, $T^* = 0,30$ e $T^* = 0,10$; que correspondem a 13 e $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura real, respectivamente.

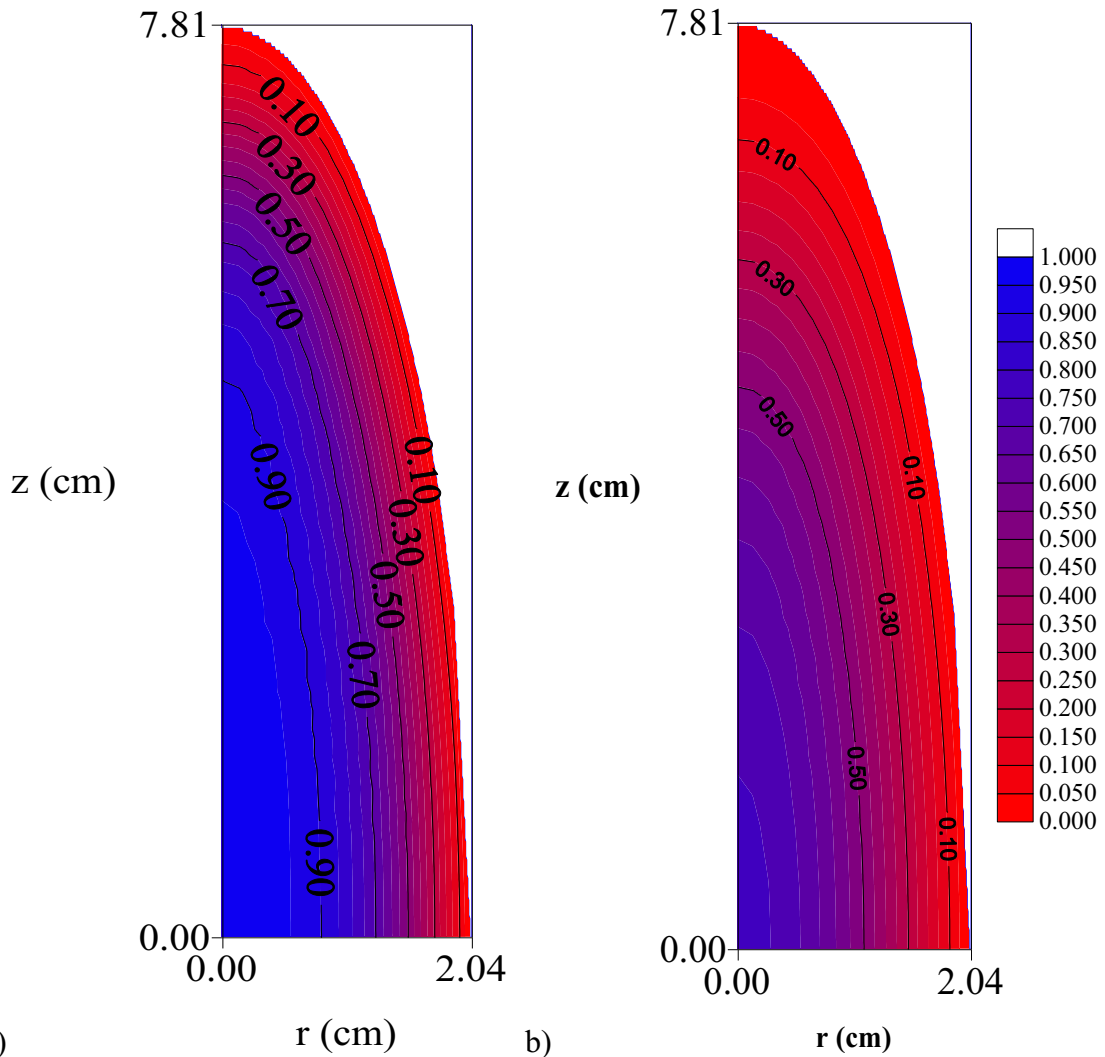


Figura 4.3 - Distribuição da temperatura adimensional dentro da banana em dois intervalos de tempo diferentes: a) $t = 150$ s ($Fo = 0,0511$) e b) $t = 350$ s ($Fo = 0,1192$).

Na Figura 4.3b, verifica-se que o intervalo de tempo de 350 s também não foi suficiente para resfriar por completo a banana, no entanto, pode-se ver que na direção radial, aproximadamente, na metade do raio e em $T^* = 0,50$, a temperatura de resfriamento é 17 °C, menor que o apresentado na Figura 4.2a, no mesmo ponto. Verifica-se ainda que em $r = 1,89$ cm, a temperatura adimensional é $T^* = 0,10$ e a temperatura real 9 °C. Em $r = 1,51$ cm e $T^* = 0,30$ (temperatura adimensional), a temperatura real é 13 °C.

Tomando $r = 1,89$ cm e $z = 0$, nas Figuras 4.3a e 4.3b, observa-se que decorridos 200 s entre as leituras, a temperatura no ponto não variou, enquanto que a temperatura do centro da banana baixou de $27,6$ para 17 °C.

Pode-se observar, na Figura 4.4a, em $t = 500$ s, que a banana ainda continua resfriando, com a temperatura do centro atingindo valores próximos a 13 °C, porém, o tempo de resfriamento utilizado também foi insuficiente para que o centro da banana alcançasse a temperatura desejada, ou seja, a temperatura real de 7 °C. Tomando $r = 1,28$ cm a temperatura adimensional é $T^* = 0,30$ e a temperatura real 13 °C. Continuando a análise dos resultados e observação da figura, deduz-se que, quanto mais próximo da superfície, como por exemplo, em $r = 1,8$ cm, a temperatura adimensional $T^* = 0,10$ que corresponde à temperatura real (9 °C) aproxima-se da desejada.

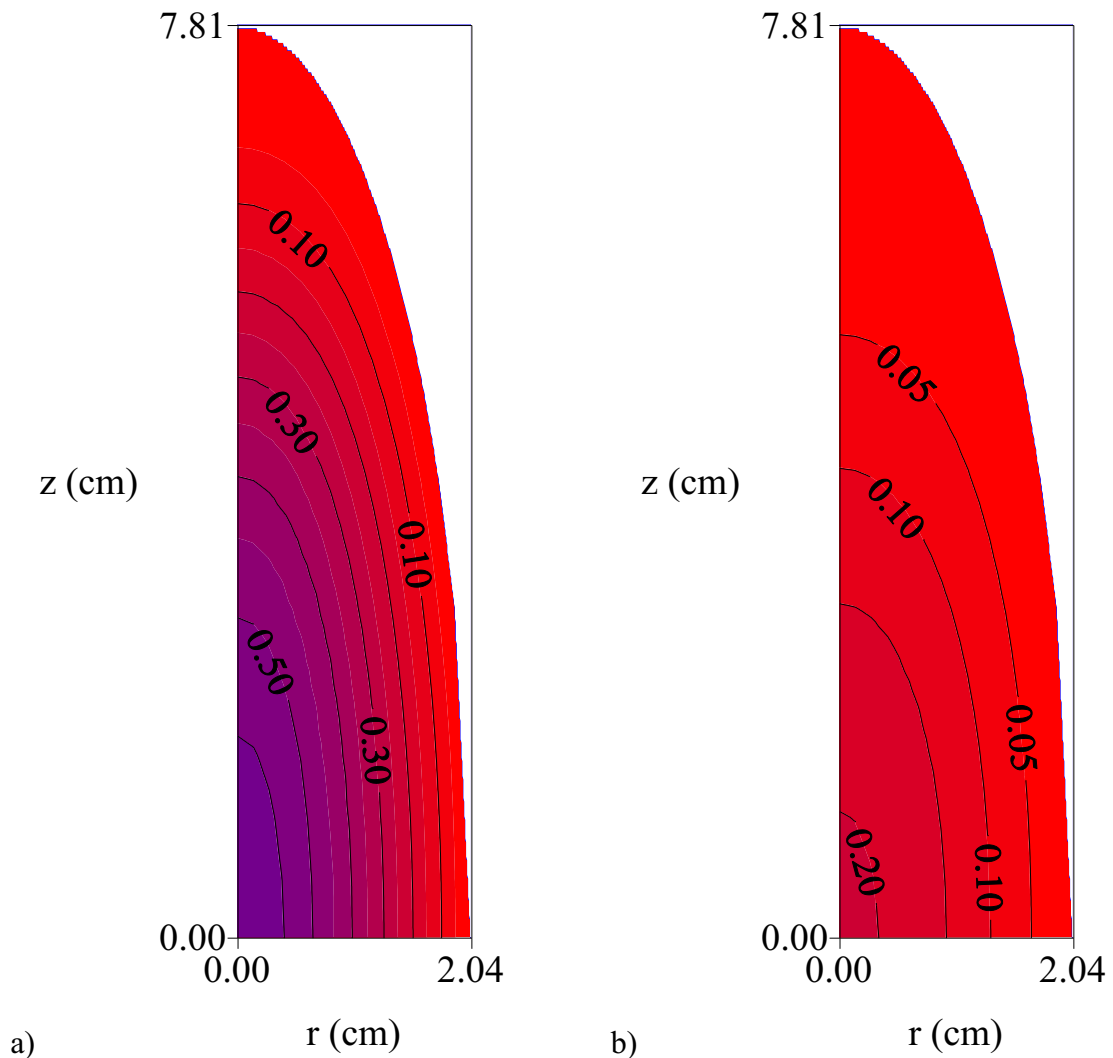


Figura 4.4 - Distribuição da temperatura adimensional dentro da banana em dois intervalos de tempo diferentes: a) $t = 500$ s ($Fo = 0,1703$) e b) $t = 1000$ s ($Fo = 0,3405$).

Observa-se, na Figura 4.4b, que após 1000 s, a temperatura no centro da banana é em torno de 11 °C para $T^* = 0,20$, ou seja, a banana está próxima de se resfriar por completo. A distribuição de temperatura de resfriamento da banana se aproxima da uniformidade.

Nas Figuras 4.5 e 4.6, tem-se a distribuição de temperatura adimensional dentro da laranja em quatro intervalos de tempo diferentes: 350, 500, 1000 e 1500 s. Observa-se que, nos quatro intervalos de tempo, que a distribuição de temperatura adimensional da laranja, durante o resfriamento, ocorreu de forma homogênea na direção angular. A temperatura varia apenas na direção radial. Dessa forma, os problemas causados pelo resfriamento excessivo localizado na extremidade da laranja serão menores do que na banana. De acordo com as dimensões comprova-se que a forma geométrica da laranja aproxima-se de uma esfera.

Nota-se, na Figura 4.5a, que representa a distribuição de temperatura dentro da laranja para 350 s, uma diferença de temperatura de 20,6 °C entre o centro e a superfície da fruta, enquanto que a temperatura próxima da superfície é 7 °C, na região próxima do centro não houve alteração alguma da temperatura da laranja (27,6 °C).

Observa-se na Figura 4.5b, que aos 500 s, a temperatura no centro da laranja ainda é invariável e igual à sua temperatura inicial, predominando a cor azul em torno do centro, no entanto, a temperatura de resfriamento continua decaindo pontualmente, da superfície até o centro, ao longo do processo.

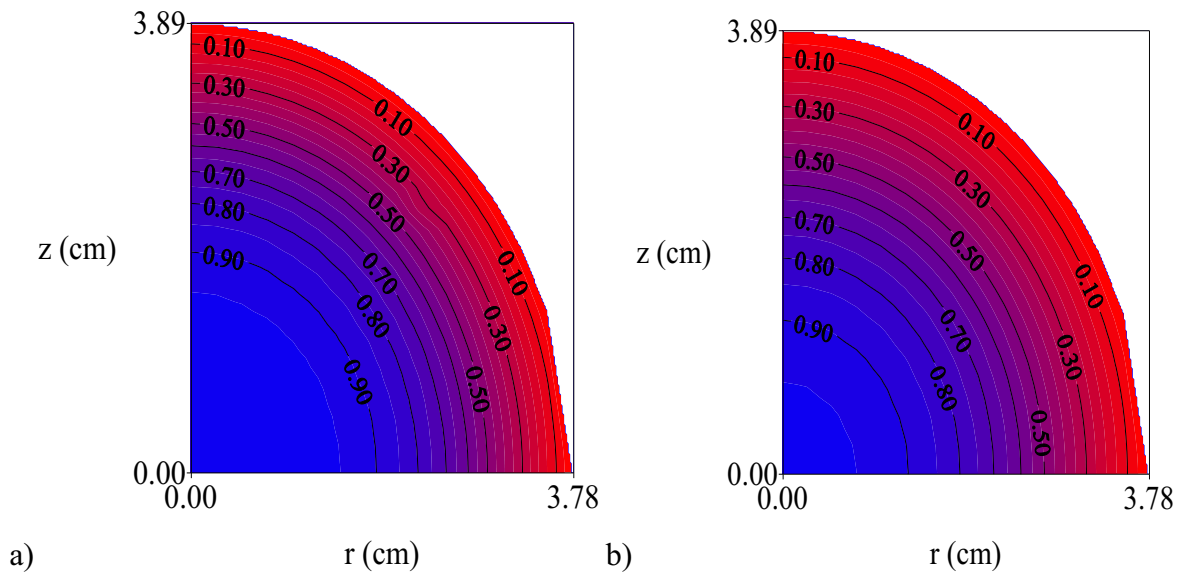


Figura 4.5 - Distribuição da temperatura adimensional dentro da laranja em dois intervalos de tempo diferentes: a) $t = 350$ s ($Fo = 0,0343$) e b) $t = 500$ s ($Fo = 0,0490$).

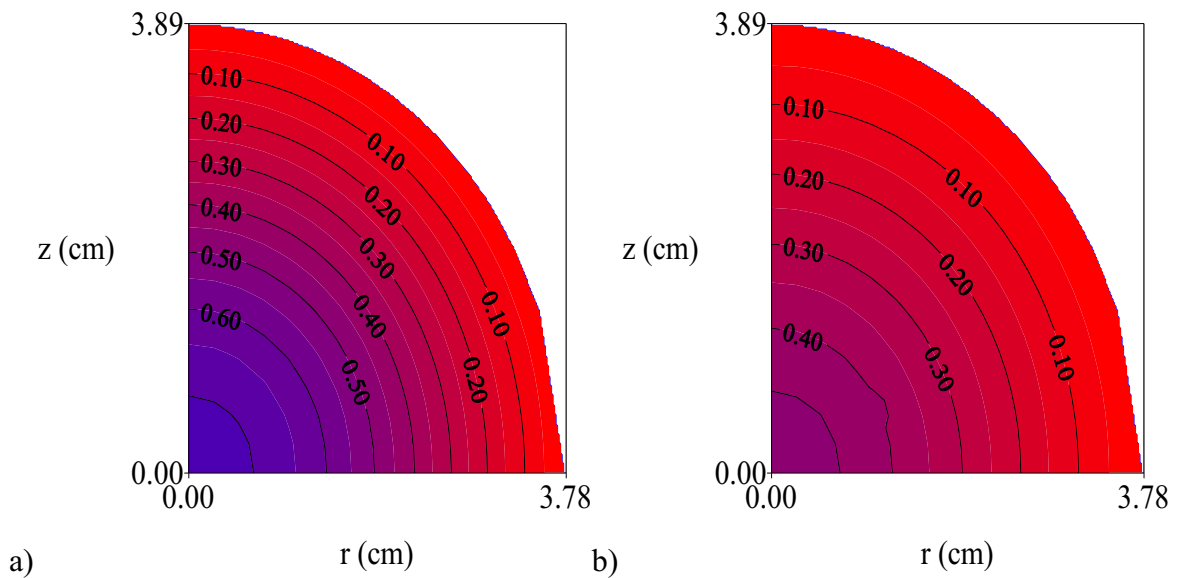


Figura 4.6 - Distribuição da temperatura adimensional dentro da laranja em dois intervalos de tempo diferentes: a) $t = 1000$ s ($Fo = 0,0979$) e b) $t = 1500$ s ($Fo = 0,1469$).

Pode-se verificar, através da Figura 4.6a, em $t = 1000$ s, que a temperatura real em $r = 1,89$ cm (metade do raio) e $T^* = 0,5$, assume valor em torno de 17 °C, ou seja, a

temperatura da fruta continua decaindo com o tempo em direção ao centro, no entanto, esse tempo é insuficiente para que a laranja atinja a temperatura desejada.

Ao contrário do que ocorreu com o resfriamento da banana, na Figura 4.4b ($t = 1000$ s) anterior, a Figura 4.6b apresenta no centro da laranja uma temperatura de resfriamento em torno de 13 °C, para $t = 1500$ s. Assim sendo, baseando-se na curva tempo-temperatura dimensional, a banana tem resfriamento mais rápido que a laranja, em contraste ao informado durante a análise adimensional. Isto é decorrente porque, em uma análise dimensional, os resultados são dependentes das propriedades físicas e térmicas, dimensões e forma dos frutos, o que não ocorre numa análise adimensional.

As Figuras, 4.7 e 4.8, representam a distribuição da temperatura adimensional dentro do morango nos seguintes intervalos de tempo: 40, 68, 90, 100 s. Observa-se, que a distribuição de temperatura no interior do morango, em todos os instantes verificados, ocorre de forma não homogênea em toda a fruta. Conforme pode ser observado, o resfriamento ocorre da superfície para o centro do morango por isso, o resfriamento na superfície da fruta ocorre em menor tempo que no interior do fruto.

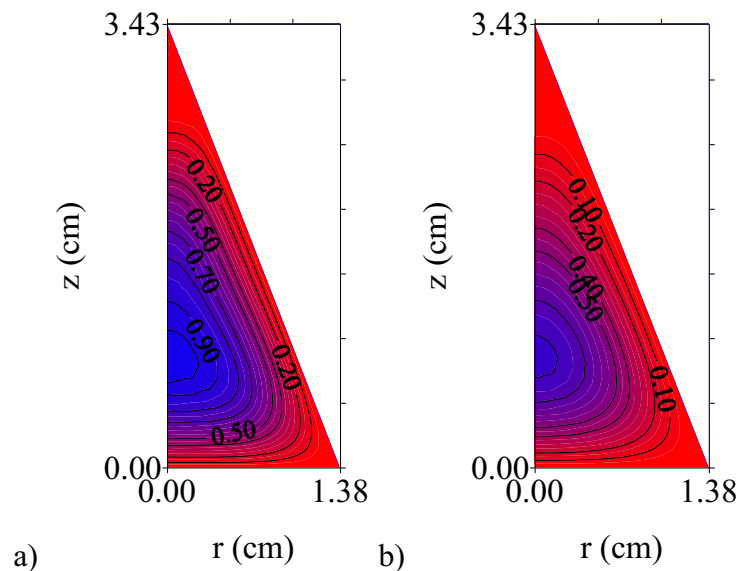


Figura 4.7 - Distribuição da temperatura adimensional dentro do morango em dois intervalos de tempo diferentes: a) $t = 40$ s ($Fo = 0,02799$) e b) $t = 68$ s ($Fo = 0,04759$).

Como o comportamento da distribuição de temperatura de resfriamento do morango é não homogêneo as extremidades da fruta ficarão submetidas a maior tempo de exposição ao frio e conseqüentemente a qualidade da fruta poderá ser comprometida. Analisando-se a Figura 4.7a, nota-se que o tempo de resfriamento de 40 s não foi suficiente para a temperatura do centro do morango atingir 7 °C, ao contrário, no seu centro a temperatura ainda continua inalterada (27,6 °C). Já que na região próxima à superfície a isoterma que representa a temperatura adimensional $T^* = 0,40$ equivalente na escala real a 15 °C.

Na Figura 4.7b, verifica-se que o intervalo de tempo de 68 s, assim como, na Figura 4.7a, também não foi suficiente para resfriar por completo o morango, ou seja, no centro da fruta $r = 0, z = 1,14333$ com $T^* = 0,70$, cuja temperatura real é 21 °C no entanto, pode-se notar que a região de cor vermelha aumentou com relação à Figura 4.7a, confirmando, por conseguinte, que o processo de resfriamento evolui no decorrer do tempo. Com uma variação no tempo de 28 s tem-se uma diminuição da temperatura do centro do morango de 6,6 °C.

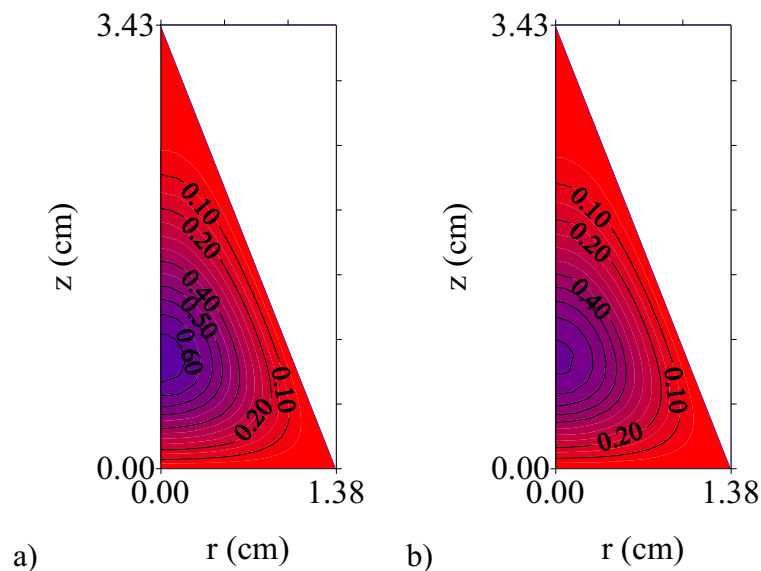


Figura 4.8- Distribuição da temperatura adimensional dentro do morango em dois intervalos de tempo diferentes: a) $t = 90$ s ($Fo = 0,06298$) e b) $t = 100$ s ($Fo = 0,06998$).

Analisando a Figura 4.8a pode-se deduzir que, após 90 s, o resfriamento ainda não ocorreu em toda a fruta. A camada resfriada aumentou, contudo, o centro do morango

ainda não atingiu a temperatura desejada (7 °C). Observa-se, nesse ponto, uma temperatura adimensional $T^* = 0,60$ que corresponde à temperatura real de 19 °C. Considerando as camadas mais próximas da superfície do morango, cujas temperaturas adimensionais (T^*) são respectivamente 0,50, 0,40, 0,20 e 0,10, e as temperaturas reais são: 17, 15, 11 e 9 °C, respectivamente, percebe-se que existem diferentes camadas com temperaturas diferentes no interior da fruta.

Constata-se, na Figura 4.8b, que após 100 s, o centro do morango está a uma temperatura em torno de 17 °C para $T^* = 0,50$; existem outras camadas no interior do morango com temperaturas diferentes. Conforme a representação gráfica da figura pode-se ler algumas, como por exemplo: 0,40, 0,20 e 0,10; essas temperaturas adimensionais demonstram que esse intervalo de tempo não foi suficiente para resfriar completamente o morango, embora o fruto continue resfriando da superfície para o centro.

A temperatura do centro do morango nos primeiros 90 s diminuiu 8,6 °C, enquanto que entre 90 s e 100 s esse resfriamento foi de 2 °C.

Nas Figuras 4.9 e 4.10 comprova-se a distribuição de temperatura adimensional dentro do limão em quatro intervalos de tempo diferentes: 150, 350, 500 e 1000 s. Nos quatro intervalos de tempo, a distribuição de temperatura adimensional do limão, durante o resfriamento, ocorreu de forma homogênea na direção angular. A temperatura varia apenas na direção radial. Dessa forma, os problemas causados pelo resfriamento excessivo localizado na extremidade do limão não existirão, se comparado com o morango.

O resfriamento do limão pode ser analisado pela leitura das Figuras 4.9 (em $t = 150$ s e $t = 350$ s), e 4.10 (em $t = 500$ s e $t = 1000$ s).

No resfriamento do limão no tempo 150 s, conforme a Figura 4.9a, a superfície da fruta em contato com o ambiente, está na temperatura desejada (7 °C), enquanto que o seu centro continua com a temperatura inicial (27,6 °C). De acordo com o gráfico existe uma diferença de temperatura no interior do limão, que pode ser verificada através da leitura das isotermas. Enquanto que próximo a superfície tem-se uma isoterma $T^* = 0,10$ correspondente a 9 °C, na curva seguinte, no sentido radial, tem-se $T^* = 0,20$ que corresponde a 11 °C. Numa outra camada a temperatura adimensional é 0,40 e a temperatura real é 15 °C; no interior do limão várias camadas com temperaturas diferentes comprovam que está acontecendo o processo de resfriamento da superfície para o centro

do limão. O tempo 350 s, Figura 4.9b, constata-se que o limão não foi resfriado completamente, contudo, já existe diminuição da temperatura do seu centro, cujo valor adimensional foi 0,70, que em termos reais é aproximadamente 21 °C. Em outras camadas a temperatura do limão continua diminuindo. Se comparar as isotermas $T^* = 0,80$ (Figura 4.9a) e $T^* = 0,50$ (Figura 4.9b) conclui-se que a temperatura naquela região diminuiu em aproximadamente 6 °C.

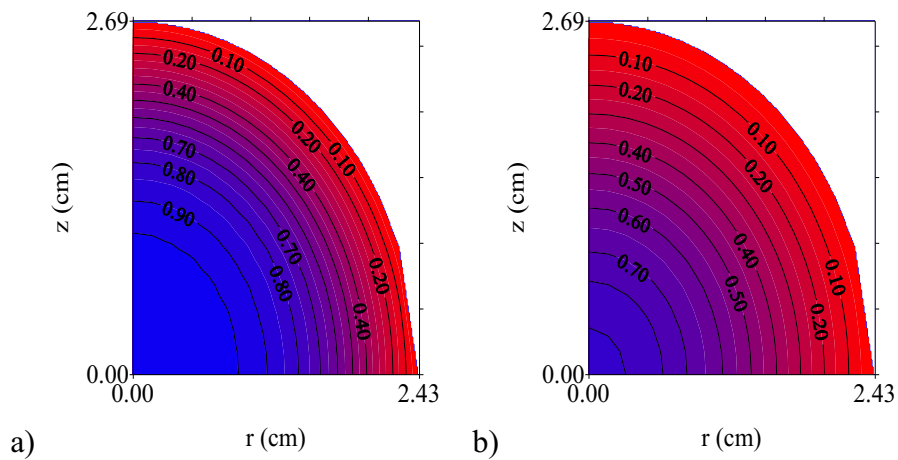


Figura 4.9 - Distribuição da temperatura adimensional dentro do limão em dois intervalos de tempo diferentes: a) $t = 150$ s ($Fo = 0,0370748$) e b) $t = 350$ s ($Fo = 0,0865079$).

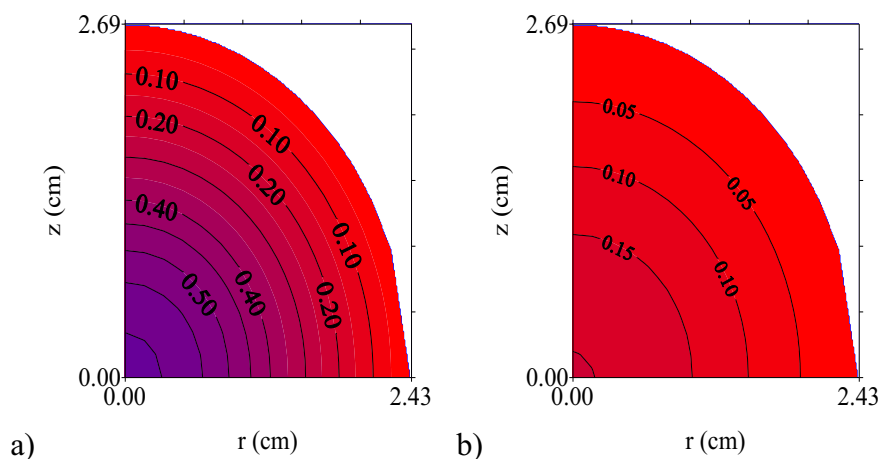


Figura 4.10 - Distribuição da temperatura adimensional dentro do limão em dois intervalos de tempo diferentes: a) $t = 500$ s ($Fo = 0,123583$) e b) $t = 1000$ s ($Fo = 0,247165$).

O centro do limão atingiu a temperatura de 17 °C em $t = 500s$ (Figura 4.10a) fazendo com que no intervalo de 150 s tenha ocorrido um resfriamento de 4 °C no seu centro. Na Figura 4.10a, metade do raio, a temperatura adimensional é 0,40, enquanto que na mesma região da Figura 4.9b, $T^* = 0,60$, portanto, ocorreu um resfriamento, nessa região do interior do limão, de 11 °C. O tempo de 500 s não foi suficiente para resfriar completamente o limão. No tempo $t = 1000$ s, Figura 4.10b a temperatura do centro do limão é de 10 °C, o resfriamento do limão está próximo de ser concluído.

Baseando-se nas Figuras 4.4b, 4.6a e 4.10b, que representam o resfriamento da banana, laranja e limão, respectivamente, cujos respectivos números de Fourier são: $Fo = 0,3405$, $Fo = 0,0979$ e $Fo = 0,247165$, para o tempo 1000 s, na Figura 4.8b, que representa o resfriamento do morango, no tempo 100 s cujo número de Fourier é $Fo = 0,06998$, pode-se afirmar que o morango resfria mais rápido que as demais frutas, o limão resfria um pouco mais rápido que a banana enquanto que a laranja tem um tempo de resfriamento maior do que as outras frutas do estudo. Entretanto, observando as curvas Temperatura adimensional-Fourier da Figura 4.1, pode-se afirmar que o morango resfria mais rápido que as outras três frutas; observa-se ainda que a laranja e o limão têm resfriamento muito próximos e mais rápido que a banana. Baseando-se na curva temperatura dimensional-tempo confirma-se que o morango tem resfriamento mais rápido que as outras três frutas, enquanto que a banana e o limão têm resfriamento mais rápido que a laranja, em contraste ao informado durante a análise adimensional. Isto ocorre porque, em uma análise dimensional, os resultados são dependentes das propriedades físicas e térmicas, dimensões e forma dos frutos, o que não se constata numa análise adimensional.

A Tabela 4.1 apresenta os valores de área, volume e relação área/volume para cada fruta.

Tabela 4.1- Área, volume, relação área/volume, relação eixo maior/eixo menor das frutas.

Fruta	Área	Volume	A/V	b/a
Morango	22,0117	6,84039	3,2179	2,45551
Limão	79,5495	66,5355	1,19559	1,10472
Banana	161,644	136,144	1,18729	3,82843
Laranja	183,047	232,821	0,78621	1,0291

Para melhorar o entendimento, a Tabela 4.2 apresenta a temperatura no centro das frutas em tempos diferentes do processo.

Tabela 4.2- Comparação da temperatura central das frutas ao longo do tempo.

t (s)	Temperatura (°C)			
	Morango	Limão	Banana	Laranja
100	18,56	27,60	27,50	27,60
150	13,69	27,48	27,28	27,60
350	13,67	23,82	22,87	27,51
500	7,12	19,67	18,98	26,99
600	7,03	17,24	16,81	26,32
1000	7,00	11,16	11,29	22,03
1500	7,00	8,32	8,50	16,79
2500	7,00	7,13	7,17	10,84
3500	7,00	7,01	7,02	8,49
4000	7,00	7,00	7,00	7,92

Observa-se em $t = 500$ s que esse intervalo de tempo foi insuficiente para que as frutas atingissem a temperatura de resfriamento. O morango se aproxima do equilíbrio, a temperatura no centro do limão e da banana, continua baixando, contudo esse tempo não foi suficiente para o resfriamento dessas frutas. Verifica-se que a temperatura no centro da laranja permaneceu próxima da temperatura inicial.

Comparar resultados experimentais é bastante difícil, pois depende de vários fatores tais como: natureza do fruto, dimensões, condições ambientais, etc., contudo para se ter uma idéia, a Tabela 4.3 sumariza dados de tempo de resfriamento de alguns frutos.

Tabela 4.3- tempo de resfriamento para várias frutas

Produto	Condições ambientais				Tempo total de resfriamento (min)	Tipo de processo	Fonte
	T _i (°C)	T _f (°C)	T _e (°C)	UR (%)			
Banana**	27,6	7,0	7,0	89,90	200	Ar forçado	Teruel (2000)
Laranja**	25,2	1,0	1,0	88,14			
Figo*	19	1,5	0,0	75,0	100	Água gelada	Amendola (2009)
Morango**	17	1,0	-0,3	87,4	120		Ferrua (2009)
Acerola					20	Água gelada	Teruel (2004)
Ameixa					80		
Goiaba					100		
Laranja	25,1	1,0	1,0	----	100		
Lima					50		
Manga					100		
Melão					>180		

* Caixa de madeira ** Caixa plástica

Como se pode notar por comparação com os resultados obtidos, neste trabalho, existe uma diferença razoável nos tempos de resfriamento. Isto pode ser atribuído ao fato de que se utiliza neste trabalho uma condição de contorno muito severa que na prática só ocorre para o caso de resfriamento em nitrogênio líquido, por exemplo, em que a temperatura da superfície do material entra em equilíbrio instantaneamente com o ambiente de refrigeração, como também as condições experimentais de tais pesquisas, que reduz sensivelmente o coeficiente de transferência de calor.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- A temperatura adimensional média dos frutos (banana, laranja, morango e limão) é atingida mais rapidamente que a temperatura no seu centro.
- O tempo de resfriamento para a banana e o limão foi de 4000 s, para o morango 600 s, enquanto a laranja após 4000 s atingiu 7,92 °C, esse tempo foi insuficiente para resfriar completamente a laranja.
- O morango apresentou menor tempo adimensional de resfriamento comparado com o tempo requerido para resfriar as outras três frutas.
- A distribuição de temperatura na laranja e no limão ocorre de forma homogênea na direção angular, enquanto a distribuição de temperatura da banana varia nesta direção, com a extremidade (ponta) exposta por longo tempo à baixa temperatura (similarmente ocorreu para o morango).
- A temperatura no centro das frutas após 500 s foi 18,98; 26,99; 7,12 e 19,67 °C, para banana, laranja, morango e o limão, respectivamente.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se citar:

- Estudar a distribuição de temperatura durante o resfriamento de produtos que possuam propriedades termofísicas semelhantes e formas diferentes.
- Comparar os resultados obtidos teoricamente, através da modelagem matemática, com os resultados obtidos de forma experimental.
- Aplicar a modelagem matemática desenvolvida para descrever processo de resfriamento em outras condições de contorno, por exemplo, a convectiva.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABANORTE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FRUTICULTORES DO NORTE DE MINAS. Disponível em: <www.abanorte.com.br> Acesso em: 18 de fevereiro de 2010.

ABIA. Sistema agroalimentar. Indústria alimentar. São Paulo, ABIA. 1996, 81p.

AMENDOLA, M.; TERUEL, B. Uso de um esquema implícito e de splines para a simulação numérica do processo de resfriamento de frutas esféricas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.1, p.78-82, 2005.

AMENDOLA, M.; SARRIA, S.D.; RABELLO, A.A. Determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor de figos submetidos ao resfriamento rápido. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n.2, p.176-182, 2009.

ANBF - Anuário Brasileiro de Fruticultura 2005. Santa Cruz do Sul – RS, Editora Gazeta Santa Cruz LTDA, 2005. 136p.

ASHRAE Refrigeration Handbook. Chapter 8 – Thermal properties of foods. American Engineers, INC, Atlanta, 1998, pp. 8.1-8.30.

BAIRI, A.; LARAQUI; N. MARIA, J.M.G. Determination of thermal diffusivity of foods using 1D Fourier cylindrical solution. Journal of Food Engineering, v.78, p.669-675, 2007.

BARBOSA, J.A. Procedência, qualidade e perdas pós-colheita de frutos tropicais no mercado atacadista da empresa de abastecimento e serviços agrícolas de Campina Grande-PB. 2006. 243p. Tese (Doutorado em Agronomia). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Campus Areia-PB.

BARBOZA, L.M.V.; FREITAS, R.J.S.; WASZCZYNSKY, N. Suco de laranja enriquecido com cálcio adoçado com sucralose e acesulfano k. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 19. Recife. Anais... Recife: SBCTA, 2004. CD.

BECK, J.V.; COLE, K.D.; HAJI-SHEIKH, A.; LITKOUHI, B. Heat conduction using Green's functions. Hemispheric Publishing Corporation, New York, USA, Chaper Ten: Galerkin-based Green's functions and solutions, 1992, p. 293-334.

BOLDRINI, J.L.; RODRIGUES COSTA, S.I.; FIGUEIREDO, V.L.; WETZLER, H.G. Álgebra Linear. São Paulo: Marper & Row no Brasil, 1980. 372p.

BROTEL, N.; FREIRE JUNIOR, M.; VASCONCELOS, R.M.; BARBOSA, H.T.G. Inibição do amadurecimento da banana 'prata-anã' com a aplicação do 1-metilciclopropeno. Revista Brasileira de Fruticultura, v.24, n.1, p.0543-0546, 2002.

BROSNAN, T.; SUN, D.W. Precooling techniques and applications for horticultural products: A review. International Journal of Refrigeration, n.24, p.1544-170, 2001.

CAMPOS, R.P.; VALENTE, J.P.; PEREIRA, W.E. Conservação pós-colheita de banana cv. nanicão climatizada e comercializada em Cuiabá-MT e região. Revista Brasileira de Fruticultura, v.254, n.1, p.172-174, 2003.

CASTRO, J.V.; PARK, K.J.; HONÓRIO, S.L. Determinação de curvas de resfriamento de uvas Itália em dois sistemas de acondicionamento. Engenharia Agrícola, v.20, n.1, p.34-44, jan. 2000.

CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; DUARTE BRAGA, M.E.; SILVA, M. Curvas de congelamento de frutos de cajá (*Spondias lútea* L.) a temperaturas semi-criogênicas. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Especial, n.1, p.545-62, 2003.

CARNAHAN, B.; LOTHER, H.A.; WILKES, J.O. Applied numerical methods. New York: John Wiley & Sons, 1969, 627p.

CHITARRA, M.I.F.; CHITARRA, A.B. Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio. 2 ed. Lavras: UFLA, 2005, 785p.

CORTEZ, L.A.B.; HONÓRIO, S.L.; MORETTI, C.L. Resfriamento de frutas e hortaliças. Embrapa Hortaliças, Brasília-DF, Embrapa Informação Tecnológica, 428p., 2002.

- DELGADO, A.E.; SUN, D.W. Heat and mass transfer models for predicting freezing process – a review. *Journal of Food Engineering*, v.47, n.3, p.157-174, 2001.
- DI RIENZO, C. A importância das câmaras frias na hortifruticultura. *Tecnologia da Refrigeração*, n.5, p.6-22, 2001.
- DUSSÁN-SARRIA, S.; HONÓRIO, S. L. Parâmetros de resfriamento rápido do figo (*Ficus carica* L.) cv. Roxo de Valinhos embalado em caixa de exportação. *Revista UDO Agrícola*, v.5, n.96, p.96-102, 2005. v.21, n.2, p.228-235, maio-ago. 2001.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de pesquisa Agro-pecuária, Disponível em: <<http://blog.cnpat.embrapa.br>> Acesso em: 17 de fevereiro de 2010.
- EVANGELISTA, I. *Tecnologia de alimentos*. São Paulo: Atheneu, 1998. 652 p.
- FACHINELLO, J.C.; NACHTIGAL, J.C. *Fruticultura fundamentos e prática*. UFPEL, 1996, 311p.
- FAO – Food Agriculture Organization. 2005. Disponível em: <www.fao.org>. Acesso em: 13 de novembro de 2009.
- FAO – Food Agriculture Organization. 2007. Disponível em; <www.fao.org>. Acesso em: 13 de novembro de 2009.
- FAOSTAT - Food Agriculture Organization Statisc. 2008. Disponível em: <www.faostat.fao.org/faostat>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2010.
- FARIAS, N.F. Secagem de sólidos esferoidais usando o método de Galerkin. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 2002, 65p.
- FERRUA, M.J.; SINGH, R.P. Design guidelines for the forced-air cooling process os strawberries. *International Journal of refrigeration*. n.32, p.932-1943, 2009.
- FERRUA, M.J.; SINGH, R.P. Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, Part III: Experimental validation of the energy model. *International Journal of Refrigeration*, n. 32, p.359-368, 2009.
- FRUTAS. *A caminho de um grande mercado*. (Série Alternativa de Investimento). Salvador, 1996, 1546p.

- GAVA, A. J. Princípios de tecnologia de alimentos. São Paulo: Nobel, 1998. 284p.
- GRUPEX. O cultivo dos citros no Rio Grande do Sul: Referências Tecnológicas. Porto Alegre. FEPAGRO, 2005. 141p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2008, Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2010.
- IBRAF – Instituto Brasileiro de Frutas, 2006. Disponível em: <<http://www.ibraf.org.br>>. Acesso em: 11 de dezembro de 2009.
- INCROPERA, F.P.; DE WITT, P. Fundamentals of heat and mass transfer. New York: John Wiley & Sons, 1998, 455p.
- ITALBRAZ. Disponível em:< <http://italbraz.com.br>> acesso em: 27 de janeiro de 2010.
- KLUGE, R.A.; NACHTIGAL, J.C.; FACHINELLO, J.C.; BILHALVA, A.B.. Fisiologia e manejo pós-colheita de frutas de clima temperado. Ed. Rural. Campinas- SP. 2002. 214 p.
- KLUGE, R.A.; AZEVEDO, R.A.; JOMORI, M.L.L.; ADEGI, F.K.; JACOMINO, A.P.; GAZIOLA, S.A.; AGUILA, J.S. Efeitos de tratamentos térmicos aplicados sobre frutas cítricas armazenadas sobre refrigeração. Ciência Rural, v.36, n.5, p.1388-1396, 2006.
- KLUGE, R.A.; JOMORI, M.L.; EDAGI, F.K.; JACOMINO, A.P.; AGUILA, J.S.D. Danos de frio e qualidade de frutas cítricas tratadas termicamente e armazenadas sob refrigeração. Revista Brasileira de Fruticultura, v.29, n.2, p.233-238, 2007.
- LEITE, J.T.C.; MURR, F.E.X.; PARK, K.J. Transições de fases em alimentos: influência no processamento e na armazenagem. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.7, n.1, p.83-96, 2005.
- LICHTEMBERG, L.A.; MALBURG, J.L.; HINZ, R.H. Suscetibilidade varietal de frutos de bananeira ao frio. Revista Brasileira de Fruticultura, v.23, n.3, p.5468-5472, 2001.
- LIMA, A.G.B.; NEBRA, S.A.; QUEIROZ, M.R. Aspectos científico e tecnológico da banana. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.2, n.1, p.87-101, 2000.

- LIMA, J.D.; MENDONÇA, J.C. Fisiologia e manuseio de frutas em pós-colheita. In: Reunião Fitossanitário do Instituto Biológico – Banana, 13., São Paulo. Anais...São Paulo: Instituto Biológico, p.95-101, 2005.
- LOUZADA, M.I.F.; SESTARI, I.; HELDWEIN, A.B.; BRACKMANN, A. Pré-resfriamento de maçã (*Malus domestica Borkh*), cv. fuji, em função da temperatura e velocidade do ar. Revista Brasileira de Fruticultura, v.25, n.3, p.555-5456, 2003.
- MALISKA, C.R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: Fundamentos e coordenadas generalizadas. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 2004, 453p.
- MALGARIM, M.B.; CANTILLANO, F.R.F.; TREPTOW4, R.O.; SOUZA, E.L. COUTINHO, E.F. Armazenamento na qualidade pós-colheita de ameixas cv. Amarelinha. Revista Brasileira de Fruticultura, v.27, n.1, p.29-354, 2005.
- MASSONI, P.R. Estudo numérico e experimental do resfriamento convectivo de vegetais cilíndricos. Dissertação (Mestrado em Física). Departamento de Física, Instituto de Geociência e Ciência Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro – SP. 2002. 62 f.
- MEDEROS, B.J.T. Estudo teórico-experimental do resfriamento de laranja e banana com ar forçado. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2000. 289f.
- PAYNE, F.R.; CORDUNEANU, C.C.; HAJI-SHIKH, A.; HUANG, T. Integral methods in science and engineering. Hemisphere Publishing Corporation, New York, USA, Chapter: On solution of parabolic partial differential equations using Galerkin functions, 1986, p.467-479.
- PEREDA, J.A.O.; RODRÍGUEZ, M.I.C.; ÁLVARES, L.F.; SANZ, M.L.G.; MINGUILLÓN, G.D.G.F.; PERALES, L.L.H. CORTECERO, M.D.S. Tecnología de alimentos. Porto Alegre: Artemed, 2005. 255 p.
- PINHEIRO, A.C.M.; VILAS BOAS, E.V.B.; MESQUITA, C.T. Ação do metilciclopropeno (1-MCP) na vida de prateleira da banana “maçã”. Revista Brasileira de Fruticultura, v.27, n.1, p.254-28, 2005.
- PINTO, P.M.Z.; MORAIS, A.M.M.B. Boas práticas para a conservação de produtos hortofrutícolas. Edição da ESB/UCP, 2000, 32 p.

PINTO, L.C.B; JORGE, J.T. Utilização de 1-metilciclopropeno e resfriamento rápido na conservação de pêssegos. *Engenharia Agrícola*, v.27, n.1, p.238-246, 2007.

PIROZZI, D.C.Z.; AMENDOLA, M. Modelagem matemática e simulação numérica do resfriamento rápido de morango com ar forçado. *Engenharia Agrícola*, v.254, n.1, p.222-230, 2005.

QUEVEDO, R.; MENDONZA, F.; AGUILERA, J.M.; CHANONA, J.; GUTIÉRREZ-LOPEZ, G. Determination of senescent spotting in banana (*Musa cavendish*) using fractal texture Fourier image. *Journal of Food Engineering*, v.84, p.509-5415, 2008.

RAHMAN, M.S.; GUIZANI, N.;AL-KHASEIBI, M.; AL-HINAI; S.A.; AL-MASKRI, S.S.; AL-HAMHAMI, K. Analysis of cooling curve to determine the end point freezing. *Food Hydrocolloids*, v.16, n.6, p.653-659, 2002.

RAVINDRA, M.R.; GOSWAMI, T.K. Comparative performance of precooling methods for the storage of mangoes (*Mangifera Indica* L. C.V. AMRAPALI). *Journal of Food Process Engineering*, n.31, p.354-371. 2008.

SARIA, S.D. Resfriamento rápido e armazenamento refrigerado do figo(*ficus carica* i.) roxo de Valinhos e seus efeitos na qualidade da fruta. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola/FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP, Campinas. 2003. 150p.

SEAGRI – Secretaria da Agricultura da Bahia. Disponível em: <www.seagri.ba.gov.br>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2010.

SEIBERT, E.; CASAI, M.E.; LEÃO, M.L.; PEZZI, E.; CORRENT, A.R.; BENDER, R.J. Danos de frio e alterações qualitativas durante armazenagem refrigerada de pêssegos colhidos em dois estádios de maturação. *Bragantia*. v.67, n.4, p.1021-1029, 2008.

SILVA, M.; CAVALCANTI MATA, M.E. R.M.; DUARTE, M.E.M.; PEDROZA, J.P.; NASCIMENTO, J.P.T. Resfriamento e propriedades termofísicas do cajá. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*. v.4, n.2, p.175-185, 2002.

SILVA, M.M. da Modelagem e simulação da transferência de calor em alimentos com forma paralelepipedal: estudo de caso: resfriamento e congelamento de batatas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Departamento de Engenharia Agrícola,

Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2005. 64f.

SILVA, L.C. Processamento de alimentos. Boletim Técnico, Alegre-ES, 2006. Disponível em: www.aceso.com. Acesso em 09 de outubro de 2009.

SOUZA, D. Estudo das propriedades físicas de polpas e néctares de pequenos frutos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2008, 198f.

TANABE, C.S.; CORTEZ, L.A.B. Perspectivas da cadeia do frio para frutas e hortaliças no Brasil. In: Congresso de Ar-Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul, Porto Alegre. 1998.

TERUEL, B.; CORTEZ, L.A.; LEAL, P.; LIMA, A.G.B. Estudo teórico do resfriamento com ar forçado de frutas de geometrias diferentes. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.21, n.2, p.228-235, 2001.

TERUEL, B.; CORTEZ, L.; NEVES, FILHO, L. Estudo comparativo do resfriamento de laranja valência, em três sistemas de resfriamento. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.54, n.3, p.481-486, 2001a.

TERUEL, B.; CORTEZ, L.; LEAL, P.; NEVES FILHO, L. Resfriamento de banana-prata com ar forçado. Revista Brasileira de Fruticultura, v.24, n.1, p.142-146, 2002.

TERUEL, B. CORTEZ, L. NEVES FILHO, L. Estudo comparativo do resfriamento de laranja valência com ar forçado e com água. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.23, n.2, p.174-178, 2003.

TERUEL, B.; KIECKBUSCH, T.; CORTEZ, L. Cooling parameters for fruits and vegetables of different sizes in a hydrocooling system. Scientia Agrícola, v.61, n.6, p.655-658, 2004

VAN DER SMAN, R.G.M. Simple model for estimating heat and mass transfer in regular-shaped foods. Journal of Food Engineering, v.60, p.383-390, 2003.

VILELA, N.J. LANA, M.M., NASCIMENTO, E.F.; NOZOMU, M. O peso da perda de alimentos para a sociedade: o caso das hortaliças. (Horticultura Brasileira), v.21, n.2, p. 142-144. ISSN 0102. 2003.