



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Modelagem e simulação do resfriamento do leito de frutas
não climatéricas com ar forçado. Estudo de caso: laranja
valência.**

Autor: Robson Araújo de Queiroz

Orientador: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande-PB
Setembro, 2016

ROBSON ARAÚJO DE QUEIROZ

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO RESFRIAMENTO DO LEITO DE FRUTAS NÃO
CLIMATÉRICAS COM AR FORÇADO. ESTUDO DE CASO: LARANJA
VALÊNCIA.**

Área de Concentração: **Fenômeno de Transporte e Energia**

Orientador: **Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima – UAEM/UFCG**

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

Campina Grande-PB
Setembro, 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

Q3m Queiroz, Robson Araújo de.
Modelagem e simulação do resfriamento do leito de frutas não climatéricas com ar forçado, estudo de caso: laranja valência / Robson Araújo de Queiroz. – Campina Grande, 2016.
123 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.
"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".
Referências.

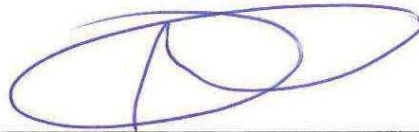
1. Laranja – Resfriamento e Conservação. 2. Modelagem e Simulação – Resfriamento de Frutas. 3. Volumes Finitos. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 664.8.037:634.31(043)

“MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO RESFRIAMENTO DO LEITO DE FRUTAS NÃO CLIMATÉRICAS COM AR FORÇADO. ESTUDO DE CASO: LARANJA VALÊNCIA”

ROBSON ARAÚJO DE QUEIROZ

Dissertação Aprovada em 29/09/2016 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:



Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Orientador

UFCG/CCT/PPGEM/UAEM



Dra. Ivonete Batista dos Santos

Examinadora Externa

UEPB/CCT/DF



Dr. Rennan Pereira de Gusmão

Examinador Externo

UFCG/CTRN/UAEALi

DEDICATÓRIA

A minha querida esposa, Ana Clévia, pela compreensão, paciência, apoio, colaboração e incentivo.

A minha mãe, Maria de Fátima e tia, Anésia, pelos ensinamentos e carinho.

As minhas avós materna e paterna, Maria Do Carmo (in memoriam) e Maria Severina (in memoriam), respectivamente pelo apoio, ensinamentos e momentos inesquecíveis.

A toda minha família pelo apoio incondicional.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

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

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima pela oportunidade, paciência, orientação, ensinamentos e amizade que possibilitaram a elaboração deste trabalho.

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

À Universidade Federal de Campina Grande.

A CAPES, CNPq e FINEP pelo apoio financeiro.

À minha esposa, Ana Clévia, minha fiel companheira, por acreditar em mim, na felicidade e nos momentos mais difíceis. Sempre me apoiando com muita força, otimismo e alegria. Obrigado pela inestimável colaboração.

À minha irmã, Roberta Kelly, e minhas primas Kelly Melo e Simone Queiroz, por serem sempre presentes em minha vida.

Às minhas tias, Eliane Queiroz e Joana Farias e ao meu tio, Josemar Queiroz, pelo apoio e carinho sempre.

Aos amigos Vanderson Agra, Balbina Correia, Wanessa Rafaela, Veralúcia, Mirênia Kalina, Jacinete e Hugo Amorim, pela amizade, companheirismo e colaboração.

Aos colegas de curso, pela amizade e convivência agradável.

À Secretária Executiva do PPGEM/UFCEG, Ivanilda Rodrigues (Vanda) pelas orientações, pelo companheirismo, carinho e amizade.

À todos os meus amigos, sempre presentes, fisicamente ou não, os quais sustentam as minhas alegrias.

Deus os abençoe, muito obrigado.

“O homem inteligente reflete sobre as palavras dos sábios e, com ouvido atento, deseja sabedoria. ”

Eclesiástico 3, 31.

RESUMO

QUEIROZ, Robson Araújo. Modelagem e simulação do resfriamento do leito de frutas não climatéricas com ar forçado. Estudo de caso: laranja valência, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. 123 p. Dissertação (Mestrado).

A fruticultura é uma atividade importante em todo mundo, pois movimenta um grande número de mercados, além de promover o desenvolvimento de muitos países. A laranja é a fruta mais produzida no mundo e a segunda mais consumida onde, o Brasil é o maior produtor mundial. Entre as várias formas de conservação desta fruta, para seu consumo *in natura*, o método de refrigeração por ar forçado é o mais indicado. O objetivo desta pesquisa é estudar teoricamente o resfriamento de leito de frutas não climatéricas com ar forçado, com particular referência a laranja valência (*Citrus sinensis O.*). Foi realizado uma modelagem matemática para descrever as trocas de massa e energia entre o ar e o produto durante o processo. Para a solução numérica das equações governantes utilizou-se o método dos volumes finitos e função de interpolação *upwind*. A obtenção dos resultados foi através do desenvolvido de um código computacional no *software Mathematica®*, onde foram simulados alguns casos distribuídos entre grupos denominados *A*, *B* e *C*. As simulações do grupo *A* serviram para validar a metodologia e apresentou um erro relativo de $0,061 \pm 0,03^\circ\text{C}$ em uma malha de 20 pontos nodais e área específica $A^* = 180 \text{ m}^2/\text{m}^3$. No segundo grupo, variou-se a altura do leito de laranja (*H*). Neste grupo, verificou-se que quanto menor o valor deste parâmetro, maior será a eficiência na troca térmica da temperatura do ar de refrigeração com a temperatura das frutas no interior do leito. O terceiro grupo, o grupo *C*, variou-se o coeficiente de transferência de calor convectivo (h_c). Os grupos analisados permitiram avaliar a influência de alguns parâmetros sobre a cinética de resfriamento do leito de laranja valência, tais como: temperatura do produto e do ar de refrigeração, pressão de vapor de saturação do ar e umidade relativa do mesmo. Os resultados foram mostrados e analisado, onde observou-se uma grande influência do h_c na cinética de resfriamento do leito da laranja. Quanto maior o valor deste parâmetro, maiores são os gradientes de temperatura do leito e mais rápido ocorre o resfriamento do leito das laranjas. Demonstrando sua importância no processo.

Palavras Chave:

Modelagem e simulação. Volumes finitos. Conservação. Resfriamento. Laranja

ABSTRACT

QUEIROZ, Robson Araújo. Modeling and simulation of cooling of not climacteric fruits bed with forced air. Case Study: valencia orange, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. 123 p. Dissertação (Mestrado).

Fruit growing is an important activity worldwide, because it moves a large number of markets, in addition to promoting the development of many countries. Orange is the most widely produced fruit in the world and the second most consumed where, Brazil is the world's largest producer. Among the various forms of conservation of this fruit, for their *in natura* consumption, the forced air cooling method is most suitable. The objective of this research is to theoretically study the non-climatic fruit bed cooling with forced air, with particular reference to orange valence (*Citrus sinensis* O.). A mathematical modeling was performed to describe the mass and energy changes between the air and the product during the process. For the numerical solution of the governing equations the finite volume method and the *upwind* interpolation function were used. The results were obtained through the development of a computer code in *Mathematica*® software, where some cases distributed among groups denominated *A*, *B* and *C* were simulated. The simulations of group *A* served to validate the methodology and presented a relative error of $0.061 \pm 0.03^\circ\text{C}$ in a mesh of 20 nodal points and specific area $A^* = 180 \text{ m}^2/\text{m}^3$. In the second group, the height of the orange bed (*H*) was varied. In this group, it was verified that the lower the value of this parameter, the greater the efficiency in the thermal exchange cooling air temperature with the temperature of the fruit within the bed. The third group, the group *C*, was varied convective heat transfer coefficients (h_c). The groups analyzed to assess the influence of some parameters on the cooling kinetics of valencia orange bed, such as: product temperature and cooling air, air saturation vapor pressure and relative humidity of it. The results were shown and analyzed, where there has been a great influence h_c the cooling kinetics of Orange bed. The higher the value of this parameter, the higher the bed temperature gradients and faster cooling of oranges occurs. Showing its importance in the process.

Key Words:

Modeling and simulation. Finite volume. Conservation. Cooling. Orange

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	6
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 Perdas Pós-Colheita	6
2.2 Métodos de Conservação	8
2.3 O Processo de Refrigeração	11
2.3.1 Fundamentos	11
2.3.2 Pré-resfriamento	14
2.3.3 Métodos de Resfriamento	15
2.3.3.1 Resfriamento por Ar	15
2.3.3.1.1 Câmara fria	16
2.3.3.1.2 Resfriamento por ar forçado	16
2.3.3.2 Hidroresfriamento	18
2.3.3.3 Resfriamento por gelo	18
2.3.3.4 Resfriamento a vácuo	19
2.4 Laranja: Aspectos Científicos e Tecnológicos	20
2.4.1 Características Gerais	20
2.4.2 Laranja Valência (<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck)	24
2.5 Modelagem e Simulação	27
2.6 Parâmetros termofísicos	29

2.6.1 Densidade e Massa específica-----	30
2.6.2 Condutividade térmica-----	30
2.6.3 Difusividade térmica-----	31
2.6.4 Calor específico-----	32
2.6.5 Coeficiente de transferência de calor convectivo-----	33
2.7 Estado da arte sobre resfriamento de frutas.....	34
CAPÍTULO 3-----	39
MODELAGEM TEÓRICA.....	39
3.1 Caracterização do Problema-----	39
3.2 Modelagem Matemática-----	39
3.3 Solução numérica-----	42
3.4 Propriedades termofísicas para a laranja valência e para a água-----	44
CAPÍTULO 4-----	49
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1 Validação da metodologia-----	50
4.2 Efeito da altura do leito na refrigeração-----	51
4.3 Efeito do coeficiente de transferência de calor convectivo na refrigeração-----	72
CAPÍTULO 5-----	93
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	93
5.1 Conclusões-----	93
5.2 Sugestões para futuros pesquisas-----	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Principais técnicas de conservação de alimentos. -----	10
Figura 2.2: (a) Padrões respiratórios após colheita de um caule (aspargo), fruta climatérica (tomate e abacate) e fruta não climatérica (uva). (b) Fases da respiração climatérica: (1) pré-climatérico; (2) mínimo climatérico; (3) aumento climatérico; (4) pico climatérico e (5) fase pós-climatérico. -----	12
Figura 2.3: Curvas de resfriamento generalizadas para sistemas de resfriamento em câmara, ar forçado e vácuo. -----	15
Figura 2.4: Câmara fria / frigorífica. -----	16
Figura 2.5: Túnel de resfriamento por ar forçado. (a) Representação esquemática. (b) Representação experimental. -----	17
Figura 2.6: Túnel de hidrosfriamento de alimentos para banho de água fria. -----	18
Figura 2.7: Técnica de resfriamento por gelo em escama. -----	19
Figura 2.8: Túnel de resfriamento à vácuo. -----	20
Figura 2.9: Partes da laranja. -----	21
Figura 2.10: Período de colheita por variedade e percentual de produção- -----	22
Figura 2.11: Aproveitamento da laranja. -----	24
Figura 2.12: Laranja valência (Citrus cinensis O.). -----	25
Figura 3.1: (a) Esquema do leito de laranja. (b) Esquema de resfriamento com ar forçado. (c) Fração do volume do sólido. -----	40
Figura 3.2: Esquema numérico e volume de controle. -----	42

Figura 3.3: Representação esquemática (vista frontal) onde foram colocados os pontos em que foram introduzidos os termopares nas caixas. -----	48
Figura 4.1: Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura da laranja na posição $Y=0,016$ m (Caso 1). -----	50
Figura 4.2: Temperatura do produto em função do tempo para diferentes alturas do leito avaliadas em $Y=H$ (casos 2 a 5). -----	51
Figura 4.3: Temperatura do ar em função do tempo para diferentes alturas do leito avaliadas em $Y=H$ (casos 2 a 5). -----	52
Figura 4.4: Pressão de vapor no ar em função do tempo para diferentes alturas do leito avaliadas em $Y=H$ (casos 2 a 5). -----	53
Figura 4.5: Umidade relativa em função do tempo para diferentes alturas do leito avaliadas em $Y=H$ (casos 2 a 5). -----	54
Figura 4.6: Temperatura do produto em função do tempo, em três posições no leito para $H=0,1$ m (caso 2). -----	55
Figura 4.7: Temperatura do ar em função do tempo, em três posições no leito para $H=0,1$ m (caso 2). -----	56
Figura 4.8: Pressão de vapor do ar em função do tempo de processo em três posições de altura no leito para $H=0,1$ m (caso 2). -----	56
Figura 4.9: Umidade relativa do ar em função do tempo de processo em três posição de altura do leito para $H=0,1$ m (caso 2). -----	57
Figura 4.10: Temperatura da laranja dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,1$ m (caso 2). -----	58
Figura 4.11: Temperatura do ar de refrigeração dentro do leito em seis tempos de refrigeração $H=0,1$ m (caso 2). -----	58
Figura 4.12: Pressão de vapor do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,1$ m (caso 2). -----	59
Figura 4.13: Umidade relativa do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,1$ m (caso 2). -----	59
Figura 4.14: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito para $H=0,3$ m (caso 3). -----	60
Figura 4.15: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito, para $H=0,3$ m (caso 3). -----	61
Figura 4.16: Pressão de vapor do ar em função do tempo em três posições do leito, para $H=0,3$ m (caso 3). -----	61
Figura 4.17: Umidade relativa do ar em função do tempo em três posições do leito, para $H=0,3$ m (caso3). -----	62
Figura 4.18: Temperatura da laranja dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,3$ m (caso 3). -----	62

Figura 4.19: Temperatura do ar de refrigeração dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,3$ m (caso 3). -----	63
Figura 4.20: Pressão de vapor do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,3$ m (caso3). -----	63
Figura 4.21: Umidade relativa do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,3$ m (caso 3). -----	64
Figura 4.22: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito para $H=0,5$ m (caso 4). -----	64
Figura 4.23: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito para $H=0,5$ m (caso 4). -----	65
Figura 4.24: Pressão de vapor em função do tempo em três posições do leito para $H=0,5$ m (caso 4). -----	65
Figura 4.25: Umidade relativa do ar em função do tempo variando a posição do leito para $H=0,5$ m (caso 4). -----	66
Figura 4.26: Temperatura da laranja dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $H=0,5$ m (caso 4). -----	66
Figura 4.27: Temperatura do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $H=0,5$ m (caso 4). -----	67
Figura 4.28: Pressão de vapor dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $H=0,5$ m (caso 4). -----	67
Figura 4.29: Umidade relativa do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $H=0,5$ m (caso 4). -----	68
Figura 4.30: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito para $H=1,0$ m (caso 5). -----	68
Figura 4.31: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito para $H=1,0$ m (caso 5) -----	69
Figura 4.32: Pressão de vapor do ar em função do tempo em três posições do leito para $H=1,0$ m (caso 5). -----	69
Figura 4.33: Umidade relativa do ar em função do tempo em três posições do leito para $H=1,0$ m (caso 5). -----	70
Figura 4.34: Temperatura da laranja dentro do leito em oito tempos de refrigeração para $H=1,0$ m (caso 5). -----	70
Figura 4.35: Temperatura do ar dentro do leito em oito tempos de refrigeração para $H=1,0$ m (caso 5). -----	71
Figura 4.36: Pressão de vapor do ar dentro do leito em oito tempos de refrigeração para $H=1,0$ m (caso 5). -----	71
Figura 4.37: Umidade relativa do ar dentro do leito em oito tempos de refrigeração para $H=1,0$ m (caso 5). -----	72

Figura 4.38: Temperatura do produto em função do tempo para diferentes coeficientes de transferência de calor convectivo, na posição $Y=0,016$ m (casos 6 a 10). -----	73
Figura 4.39: Temperatura do ar em função do tempo para diferentes coeficientes de transferência de calor convectivo, na posição $Y=0,016$ m (casos 6 a 10). -----	74
Figura 4.40: Pressão de vapor do ar em função do tempo para diferentes coeficientes de transferência de calor convectivo, na posição $Y=0,016$ m (casos 6 a 10). -----	75
Figura 4.41: Umidade relativa do ar em função do tempo para diferentes coeficientes de transferência de calor convectivo, na posição $Y=0,016$ m (casos 6 a 10). -----	75
Figura 4.42: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=5,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 6). -----	76
Figura 4.43: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=5,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 6). -----	77
Figura 4.44: Pressão de vapor do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=5,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 6). -----	77
Figura 4.45: Umidade relativa do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=5,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 6). -----	78
Figura 4.46: Temperatura da laranja dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $h_c=5,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 6). -----	78
Figura 4.47: Temperatura do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $h_c=5,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 6). -----	79
Figura 4.48: Pressão de vapor do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $h_c=5,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 6). -----	79
Figura 4.49: Umidade relativa do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $h_c=5,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 6). -----	80
Figura 4.50: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=10,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 7). -----	80
Figura 4.51: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=10,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 7). -----	81
Figura 4.52: Pressão de vapor do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=10,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 7). -----	81
Figura 4.53: Umidade relativa do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=10,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 7). -----	82
Figura 4.54: Temperatura da laranja dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=10,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 7). -----	82
Figura 4.55: Temperatura do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=10,0$ W/m^2 $^{\circ}C$ (caso 7). -----	83

Figura 4.56: Pressão de vapor do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=10,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (Caso 7). -----	83
Figura 4.57: Umidade relativa do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=10,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 7). -----	84
Figura 4.58: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 9). -----	85
Figura 4.59: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 9). -----	85
Figura 4.60: Pressão de vapor do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 9). -----	86
Figura 4.61: Umidade relativa do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 9). -----	86
Figura 4.62: Temperatura da laranja dentro do leito em sete tempos de resfriamento para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 9). -----	87
Figura 4.63: Temperatura do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 9). -----	87
Figura 4.64: Pressão de vapor do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 9). -----	88
Figura 4.65: Umidade relativa do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 9). -----	88
Figura 4.66: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 10). -----	89
Figura 4.67: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 10). -----	89
Figura 4.68: Pressão de vapor do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 10). -----	90
Figura 4.69: Umidade relativa do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 10). -----	90
Figura 4.70: Temperatura da laranja dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 10). -----	91
Figura 4.71: Temperatura do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 10). -----	91
Figura 4.72: Pressão de vapor do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 10). -----	92
Figura 4.73: Umidade relativa do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 10). -----	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Índice de perdas das principais frutas no Brasil. -----	7
Tabela 2.2: Classificação de frutos de acordo com os padrões respiratórios -----	13
Tabela 2.3: Composição centesimal da laranja valência por 100 g da parte comestível. -----	25
Tabela 2.4: Composição centesimal dos minerais da laranja valência por 100 g da parte comestível. -----	25
Tabela 2.5: Composição centesimal das vitaminas da laranja valência por 100 g da parte comestível. -----	26
Tabela 2.6: Condições de temperatura e umidade relativa recomendados para o armazenamento comercial, ponto de congelamento e tempo de conservação da laranja. -----	26
Tabela 2.7: Valores de h_c citados pela literatura (resfriamento com ar forçado). -----	34
Tabela 3.1: Parâmetros termofísicos e geométricos da laranja utilizados na pesquisa. -----	45
Tabela 3.2: Parâmetros termofísicos dos fluidos utilizados nas simulações. -----	46
Tabela 3.3: Grupos estudados no resfriamento do leito de laranja valência com ar forçado. -----	47
Tabela 4.1: Dados usados na simulação de resfriamento do leito de laranja valência. -----	49

NOMENCLATURA

A* - área superficial do sólido por unidade de volume do leito	[m ² m ⁻³]
A_p, A_s, A_p^o, A_w – coeficientes	[-]
c - calor específico	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
c_a - calor específico do ar seco à pressão constante	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
c_v - calor específico do vapor d'água, à pressão constante	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
c_w - calor específico da água	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
dM/dt; ∂M/∂t - taxa de difusão	[s ⁻¹]
h_{fg}[*] - calor latente de vaporização da água do produto	[J kg ⁻¹]
h_c - coeficiente de transferência de calor por convecção	[W m ⁻² K ⁻¹]
h_{fg}[*] - calor latente de vaporização da água livre	[J kg ⁻¹]
M̄ - teor de umidade médio	[kg kg ⁻¹]
N, S, E, W, P - pontos nodais	[-]
S - área superficial do sólido	[m ²]
t – tempo	[s]
T – temperatura	[°C]
UR - umidade relativa	[%]
V – volume	[m ³]

P - pressão	[Pa]
P_{vs} – pressão de vapor de saturação	[Pa]
P_{atm} – pressão atmosférica	[Pa]
W_a – velocidade do ar	[m s ⁻¹]
X - razão de umidade do ar (adimensional)	[kg kg ⁻¹]
x, y, z - coordenadas cartesianas	[m]
X₀ - umidade absoluta do ar nas condições ambientes	[kg kg ⁻¹]
ε - porosidade do leito (decimal)	[-]
θ̄ - temperatura do produto	[°C]
ρ - densidade (massa específica)	[kg m ⁻³]

Sobrescritos

* - adimensional

o - anterior

Subscritos

a - ar

abs - absoluta

as - ar seco

c - calor

e - equilíbrio

e, w, n, s - faces dos pontos nodais

i, j - posição do ponto nodal na malha

ent - entrada

f - final; superfície

o - Inicial

P - ponto nodal

p - produto

s - seco

t - tempo

u - úmido

v - vapor

w - água

wa - umidade do ar

Abreviações

Exp - experimental

Num – numérico

Ent - entrada

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A fruticultura é uma atividade importante em todo o mundo, visto que movimenta um grande número de mercados, além de promover o desenvolvimento de muitos países. As frutas são indispensáveis na dieta humana para fornecer vitaminas essenciais, por exemplo, vitamina A, B₆, C, E, tiamina, niacina; bem como minerais e fibras alimentares (SINHA, 2012).

De acordo com Andrade (2015), a produção mundial de frutas tem apresentado um crescimento contínuo. No triênio 89/91 era de 420,0 milhões de toneladas, ultrapassou as 500,0 milhões de toneladas em 1996 e em 2009 colheu-se um volume de 724,5 milhões de toneladas. A produção de 728,4 milhões de toneladas em 2010 é superior apenas em 0,5% em relação ao ano anterior.

Andrade (2015), ainda afirma que em 2012, os três maiores produtores de frutas foram: a China, a Índia e o Brasil que, juntos, respondem por 44,2% do total mundial e têm suas produções destinadas principalmente aos seus mercados internos.

O Brasil produziu, em 2013, aproximadamente 43,6 milhões de toneladas de frutas; trata-se da terceira maior produção de frutas do mundo. A produção brasileira de frutas frescas teve um aumento de produção de 30% no período de 14 anos, o que demonstra a evolução e importância econômica desta atividade (IBRAF, 2015).

A fruticultura está presente em todos os 26 estados brasileiros e no Distrito Federal, variando em quantidade e espécies mais cultivadas. O Estado de São Paulo está muito à frente das demais unidades federativas, com produção de 15,183 milhões de toneladas de frutas frescas, conforme o dado mais recente divulgado pela pesquisa Produção Agrícola Municipal (PAM/2014), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Grande parte da produção paulista continua sendo de laranja, que respondeu por 12,290 milhões de toneladas do total estadual em 2014 (TREICHEL, 2016). Anualmente, são produzidas no Brasil cerca de 18 milhões de toneladas da fruta, sendo que o Estado de São Paulo é responsável por 74% desse total (IBGE, 2012).

No País, conforme dados do IBGE (2012), são utilizados para a fruticultura cerca de 2,2 milhões de hectares, isto é, 1,5% do total da área agricultável no Brasil. Observa-se também que a produção de frutas está distribuída ao longo de todo território brasileiro. Este fato se deve a proximidade dos portos (visando a exportação) e as características edafoclimáticas¹ favoráveis.

A laranja é a fruta mais produzida no mundo sendo o Brasil, o maior produtor da fruta, com cerca de 28,8% do total produzido no mundo em 2012. O segundo maior produtor de laranja são os Estados Unidos, com aproximadamente 15,15% produzida no mesmo ano. Esses dois países concentram quase a metade da produção mundial. Os demais produtores são: China (12,80%), México (6,23%) e Espanha (4,06%) (USDA, 2012; IBGE, 2012).

O cultivo de laranja está presente em todos os Estados brasileiros. Com mais de 800 mil ha, a laranja é a fruta mais plantada no país. Comparativamente, os pomares de laranja ocupam uma área 20 vezes maior do que os pomares de maçã, 10 vezes

¹ Relativo aos solos e ao clima.

superior aos de manga e às plantações de uva e quase o dobro das terras destinadas ao cultivo de banana. Os pomares de laranja estão aumentando fora de São Paulo, Estado que detém 70% da área plantada (NEVES, 2012).

Porém, em paralelo com o aumento na produção de frutas também houve aumento nas perdas. Segundo Soares (2014), essas perdas somam em média 30% da produção total dos principais frutos. As principais razões dessas perdas são atribuídas à falta de pessoal habilitado, ao desconhecimento de técnicas de seleção de sementes, a erros no preparo de solo, a técnicas inadequadas de manuseio, à falha ou ausência de tratamento de pragas, a moléstias durante as fases pré e pós-colheita, ao desconhecimento do ponto ideal de colheita para alguns frutos, ao uso de tecnologias inadequadas de colheita, armazenamento, embalagem e transporte.

Segundo Kienholz e Edeogu (2002), produtos frescos começam a deteriorar-se imediatamente após a colheita. A respiração devido a oxidação enzimática continua a aumentar após a colheita. Este processo resulta no consumo de açúcares, amidos e umidade, sem reposição pela planta. O dióxido de carbono e outros gases, juntamente com o calor é gerado no processo. Se o calor não é removido, o processo é acelerado. Crescimento de fungos e a perda de umidade do produto também são aceleradas pelo calor.

Hematomas do produto acelera ainda mais estes processos, o que resulta na perda de textura, consistência, cor, sabor e aparência. Além disso, algum valor nutritivo também pode ser perdido. Quando ocorrem essas perdas, o produto é geralmente considerado ter perdido a sua frescura e qualidade (KIENHOLZ e EDEOGU, 2002).

A qualidade pós-colheita dos frutos está relacionada com a minimização da deterioração, manutenção da firmeza, cor e aparência, visando mantê-los atraentes ao consumidor por um período de tempo mais longo, desde que se utilizem técnicas de armazenamento que reduzam as taxas respiratórias e retardem, portanto, o amadurecimento, como o emprego do frio e a modificação da atmosfera ambiente, imediatamente após a colheita (OLIVEIRA, 2010).

A utilização de baixas temperaturas para conservar alimentos é um método antigo. Na pré-história os homens já armazenavam a caça em meio ao gelo para comê-la posteriormente. A produção de frio para a indústria de alimentos foi um grande avanço e possibilitou o armazenamento e transporte de produtos perecíveis (ORDÓÑEZ, 2005). Essa tecnologia oferece alimentos e produtos alimentícios dotados de qualidades nutritivas e sensoriais durante longo período de tempo (EVANGELISTA, 1998). O frio conserva o alimento pela inibição total ou parcial dos principais agentes causadores de alterações: atividade microbiológica, enzimática e metabólica dos tecidos animais e vegetais após sacrifício e colheita.

A aplicação do frio pode ocorrer pelo resfriamento ou congelamento do produto fresco ou processado (ORDÓÑEZ, 2005). Uma das formas do uso do frio na conservação de alimentos é a refrigeração, nesse processo, o alimento tem sua temperatura reduzida para valores entre -1 e 8° C, ou seja, implica em mudanças no calor sensível do produto. Desse modo, é possível reduzir a velocidade das transformações microbiológicas e bioquímicas nos alimentos, prolongando assim a sua vida útil por dias ou semanas (TOLEDO, 1991; FELLOWS, 2006).

Vários são os equipamentos responsável pelo abaixamento de temperatura, que, geralmente, funcionam através do sistema de compressão de vapor. De acordo com ROCHA, (2001), câmaras frigoríficas são ambientes especialmente projetados para a armazenagem de produtos predominantemente em baixas temperaturas e em grandes volumes. Podem ser reguladas para trabalhar mantendo as mais diversas temperaturas, tanto positivas quanto negativas.

Essencial para a maioria dos produtos perecíveis, o pré-resfriamento é a rápida remoção do calor antes que o produto seja transportado, armazenado ou levado ao processamento. Uma vez na câmara à frio, o produto irradiará para o ambiente o denominado calor de campo e, também, o calor liberado durante o processo de respiração. Assim, enquanto o produto não atingir a temperatura ótima de armazenamento, a respiração não estará controlada, a perda de água se elevará e o tempo máximo de armazenamento será diminuído. O calor liberado pelo produto passará para o ar e daí será transferido para o evaporador, que o eliminará no ciclo normal de refrigeração (SILVA, 2008).

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 grandes não linearidades matemáticas, que limita a obtenção de soluções exatas das equações que descrevem 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 (PESSÔA, 2010).

Ainda de acordo com Pessôa (2010), 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

Diante da escassez de trabalhos envolvendo resfriamento de leito de frutas, este trabalho tem como objetivo geral estudar teoricamente o resfriamento de leito de frutas não climatéricas com ar forçado, com particular referência a laranja valência.

Como objetivos específicos pode-se citar:

- desenvolver uma modelagem matemática para descrever as trocas de calor e massa entre os frutos e o ar circulante;
- apresentar a formulação e solução numérica de equações diferenciais pelo método dos volumes finitos;
- desenvolver um código computacional em linguagem do *Mathematica*[®] para simular o resfriamento do leito das frutas;
- avaliar os efeitos da temperatura do produto, umidade relativa, temperatura, velocidade do ar refrigerante e altura do leito sobre a cinética de resfriamento das frutas;
- comparar os resultados teóricos e experimentais da temperatura das frutas durante o resfriamento em várias condições operacionais, afim de validar a metodologia;
- avaliar teoricamente a qualidade física inicial e final dos frutos pós-resfriamento.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Perdas Pós-Colheita

Sabe-se que as perdas pós-colheita começam na colheita e ocorrem em todos os pontos da comercialização até o consumo, ou seja, durante a embalagem, o transporte, o armazenamento, e em nível de atacado, varejo e consumidor. Portanto, o produtor deve gerenciar a cadeia produtiva, enfatizando os principais aspectos que interferem na qualidade do produto, como entregas mais rápidas, gerenciamento da cadeia de frio e o uso de embalagens melhoradas (CENCI et al., 2006).

Ainda de acordo com Cenci et al. (2006), a qualidade da fruta ou hortaliça está relacionada à fatores envolvidos nas fases pré-colheita e pós-colheita, ou seja, na cadeia produtiva. Dentre eles pode-se destacar os problemas de manuseio, como danos mecânicos e exposição dos produtos em temperaturas elevadas prejudiciais a sua conservação, o uso indiscriminado de agrotóxicos, as contaminações microbiológicas dos produtos provenientes, principalmente de fontes de contaminação no cultivo e da falta de higiene, sanitização no manuseio e processamento dos mesmos.

Chitarra e Chitarra (1990) afirmam que as perdas pós-colheita de todos os tipos de alimentos são geralmente consideradas maiores em países menos desenvolvidos, sendo as zonas tropicais incluídas nessa categoria. Os produtos vegetais compreendem aproximadamente 25% das principais safras de alimentos produzidos nesses países, incluindo raízes, bulbos, frutas e hortaliças. A importância desses produtos na dieta deve-se ao fato de serem não apenas uma fonte substancial de carboidratos e proteínas, mas também um excelente suprimento de vitaminas e minerais. Portanto, as perdas pós-colheita têm importante significado não só do ponto de vista econômico, como também nutricional, sendo um problema de complexidade científica e tecnológico.

O conhecimento e aplicação de métodos para reduzir os danos e perdas pós-colheitas são medidas usuais nos países desenvolvidos, enquanto que nos países em desenvolvimento a aquisição do conhecimento e suas aplicações nem sempre são bem-sucedidos, uma vez que a solução para muitos problemas de manuseio e armazenamento, está ligada a fatores educacionais e sociológicos. A pós-colheita se inicia no momento da separação do produto comestível de seu meio por ato deliberado, com a intenção de utilizá-lo como alimentos e termina quando o mesmo é submetido ao processo de preparação para o consumo final. (CHITARRA e CHITARRA, 1990). Encontra-se na Tabela 2.1, o índice de perda de algumas frutas produzidas no Brasil.

Tabela 2.1: Índices de perdas das principais frutas no Brasil

FRUTA	VALOR (% POR ANO)	
	Reetz, et al. (2015)	Soares (2014)
LARANJA	23%	22 %
BANANA	42%	40 %
MORANGO	40%	40 %
ABACAXI	26%	20 %
MANGA	28%	25 %
MAMÃO	32%	21 %
ABACATE	34%	26 %

FONTE: Reetz, et al. (2015); Soares (2014)

A produção dos principais frutos frescos comercializados no Brasil é aproximadamente de 17,7 milhões de toneladas/ano. A perda desses principais frutos é em média de 30%. Isso dá um total de 5,3 milhões de toneladas/ano de produtos que não são consumidos. Partindo do princípio que o Brasil possui cerca de 150 milhões de habitantes, tem-se que o índice de perdas em frutos é da ordem de 35 kg/hab/ano. Considerando-se um valor médio de 412 dólares/ton., preço médio das exportações de frutos do Brasil com seus respectivos pesos na balança comercial, tem-se um valor de 2,2 bilhões de dólares considerados como perda (SOARES, 2014). De acordo com o último levantamento do IBGE (2012) sobre aquisição domiciliar de frutas, o Brasil consome 33 quilos por habitante ao ano, quando o recomendado seria ingerir próximo de 100 quilos/habitante/ano.

As principais razões dessas perdas são atribuídas à falta de pessoal habilitado, ao desconhecimento de técnicas de seleção de sementes, a erros no preparo de solo, a técnicas inadequadas de manuseio, à falha ou ausência de tratamento de pragas, a moléstias durante as fases pré e pós-colheita; ao desconhecimento do ponto ideal de colheita para alguns frutos, ao uso de tecnologias inadequadas de colheita, armazenamento, embalagem e transporte (SOARES, 2014).

A qualidade pós-colheita dos frutos está relacionada com a minimização da deterioração, manutenção da firmeza, cor e aparência, visando mantê-los atraentes ao consumidor por um período de tempo mais longo, desde que se utilizem técnicas de armazenamento que reduzam as taxas respiratórias e retardem, portanto, o amadurecimento, como o abaixamento da temperatura e a modificação da atmosfera ambiente, imediatamente após a colheita (OLIVEIRA, 2010).

2.2 Métodos de Conservação

Atualmente, novas técnicas de preservação estão sendo desenvolvidas para satisfazer as demandas atuais da economia, preservação e satisfação do consumidor em aspectos nutricionais e sensoriais, conveniência, segurança, ausência de conservantes químicos, preço e segurança ambiental. Compreender os efeitos de cada método na preservação de alimentos tornou-se assim fundamental em todos os aspectos (RAHMAN, 2007).

Gava (1978) explica que a maior parte dos alimentos de origem vegetal tem a propriedade de se deteriorar com facilidade. Ao longo dos séculos, sempre existiu técnicas empíricas² de preservação de alimentos. Uma parte dessas técnicas sobreviveu ao presente: a secagem, a defumação, o emprego do sal, do ácido acético e do álcool, são alguns exemplos.

No início do século XIX começou a surgir o que se pode chamar de técnica moderna de conservação de alimentos. Em 1809, Nicolas Appert tira patente do processo de conservação de alimentos pelo calor em recipientes hermeticamente fechados (GAVA, 1978), conhecido como apertização, devido ao seu nome, ou popularmente como enlatamento.

Os alimentos, para serem conservados, devem impedir toda alteração bioquímicas e devida aos microrganismos. O desenvolvimento dos microrganismos é possível somente em ambientes nutritivos, com taxa de umidade, oxigênio, temperatura e outras condições favoráveis, de acordo com a espécie microbiana (GAVA, 1978).

Assim, os processos de conservação são baseados na eliminação total ou parcial dos agentes que alteram os produtos ou na modificação ou supressão de um ou mais fatores essenciais, de modo que o meio se torne não propício a qualquer manifestação vital. Isso ainda pode ser conseguido pela adição de substâncias em qualidade e quantidade, que impeçam o desenvolvimento dos microrganismos (GAVA, 1978).

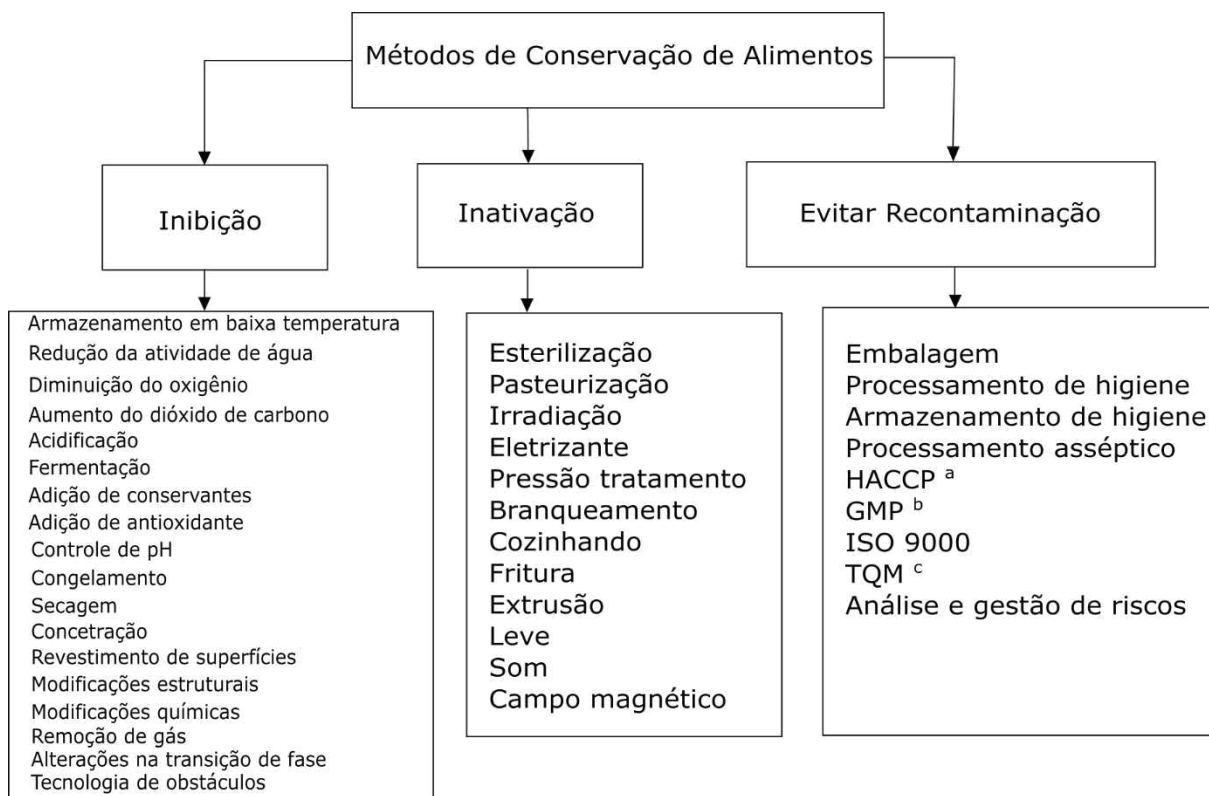
Muitas vezes, são usados tratamentos simultâneos de destruição e modificação das condições ambientais. Dentro desses princípios se situam os processos ou métodos de conservação, difíceis, às vezes, de serem convenientemente classificados, em face das variações que apresentam. Alguns, como a esterilização e a pasteurização, agem diretamente, destruindo total ou parcialmente a flora microbiana; outros lançam mão de meios que dificultam a proliferação, tais como o

² Baseado na experiência e na observação, metódicas ou não.

emprego do frio ou a redução do teor de água, diretamente como na secagem, ou indiretamente, como no emprego do sal e do açúcar. Em outras modalidades, subtrai-se o contato com o ar (embalagem a vácuo), ou lança-se mão de substâncias nocivas ao desenvolvimento microbiano (defumação, aditivos), ou ainda, submetem-se o produto a fermentações especiais, como a láctica (chucrute, pickles) e a alcoólica (vinhos), que os transformam e garantem uma melhor conservação. Muitas vezes usa-se os processos de conservação misto, utilizando dois os mais métodos, como nos concentrados, geleias, doces em massa, pickles, leite condensado, etc. (GAVA, 1978).

Com base no modo de ação, as principais técnicas de conservação de alimentos podem ser classificadas como (1) retardar ou inibir a deterioração química e o crescimento microbiano, (2) inativação de bactérias, leveduras ou enzimas, e (3) evitar a recontaminação antes e após o processamento. Um número de técnicas ou métodos para as categorias acima referidas estão apresentados na Figura 2.1 (RAHMAN, 2007).

Figura 2.1: Principais técnicas de conservação de alimentos. Fonte: Adaptado de Rahman (2007).



^a Hazard Analysis and Critical Control Point; ^b Good Manufacturing Practices; ^c Total Quality Management

Como regra geral, os melhores processos são aqueles que, garantindo uma satisfatória conservação, alteram menos as condições naturais dos produtos. Após alguns tratamentos, a conservação é assegurada pelo uso de uma embalagem apropriada (GAVA, 1978).

O uso do frio no processamento de alimentos age de maneira inibitória. De modo geral, as reações químicas, enzimáticas e o crescimento microbiológico são apenas inibidos com a diminuição da temperatura. Esse tipo de processamento não melhora a qualidade dos produtos, desse modo, apenas tecidos saudáveis e de qualidade devem ser refrigerados, uma vez que a temperatura baixa não destrói o patógeno, apenas diminui sua atividade (ORDÓÑEZ, 2005). A refrigeração é uma operação unitária em que através da redução da temperatura de um alimento é possível reduzir a velocidade das transformações microbiológicas e bioquímicas no mesmo, prolongando assim a sua vida útil (TOLEDO, 1991).

2.3 O Processo de Refrigeração

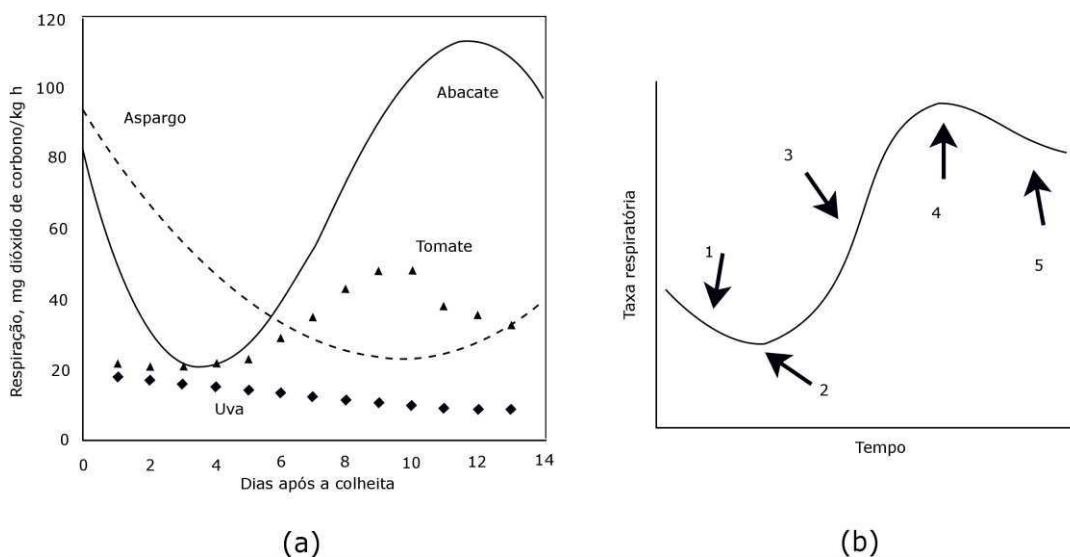
2.3.1 Fundamentos

O resfriamento é a operação unitária na qual a temperatura do alimento é reduzida entre -1 e 8°C . É usada para reduzir as taxas de variações biológicas e microbiológicas e, assim, prolongar a vida de prateleira de alimentos frescos e processados. Isso causa mudanças mínimas nas características sensoriais e nas propriedades nutricionais dos alimentos e, como resultado, os alimentos resfriados são percebidos pelos consumidores como convenientes, fáceis de preparar, de alta qualidade, “saudáveis”, “naturais” e “frescos” (FELLOWS, 2006).

A temperatura é o fator ambiental mais importante para a determinação da vida pós colheita de um produto. Como a velocidade de respiração reduz de 2 a 3 vezes para cada 10°C diminuídos, as temperaturas baixas têm um efeito significativo sobre a diminuição da respiração e, portanto, aumenta a vida útil de vários produtos (FENNEMA et al., 2010).

A taxa de respiração de frutas frescas não é necessariamente constante a uma temperatura de armazenagem constante. Frutas que passam por um amadurecimento “climatérico” apresentam um curto, porém abrupto, aumento na taxa de respiração próximo ao ponto de amadurecimento ideal (FELLOWS, 2006), antes de finalmente diminuir, à medida que o tecido entra em senescência, como mostra graficamente a Figura 2.2 (b) (FENNEMA, 2010).

Figura 2.2: (a) Padrões respiratório após a colheita de um caule (aspargo), fruta climatérica (tomate e abacate) e fruta não climatérica (uva). (b) Fases da respiração climatérica: (1) pré-climatérico, (2) mínimo climatérico, (3) aumento climatérico, (4) pico climatérico e (5) fase pós-climatérico. Fonte: adaptado de Fennema (2010).



Um grande aumento na produção de etileno precede ou é concorrente ao aumento climatérico. O etileno é um hormônio vegetal gasoso que age na promoção e na sincronização do processo de senescência. Concomitantemente ao climatérico, as frutas climatéricas têm uma fase distinta de amadurecimento que envolve a conversão de amido em açúcares simples, amolecimento de tecidos, diminuição da acidez, mudanças de cor, etc. A Tabela 2.2 lista diversas frutas, classificando-as como possuidoras de padrão respiratório climatérico ou não climatérico.

Tabela 2.2: Classificação de frutas de acordo com padrões respiratórios.

CLIMATÉRICAS		NÃO CLIMATÉRICAS	
Maçã	Melão	Laranja	Amora preta
Damasco	Nectarina	Limão	Abacaxi
Banana	Papaia	Lima	Romã
Fruta-pão	Maracujá	Amora	Framboesa
Carambola	Pêssego	Tâmara	Morango
Figo	Pera	Uva	Nêspera
Goiaba	Caqui	Toranja	Cacau
Jaca	Ameixa	Cereja	
Kiwi	Sapoti		
Manga	Graviola		
Pinha			

A maioria dos produtos não climatéricos (Figura 2.2-a) produz níveis muito baixos de etileno o que reduz a produção de calor realizado na respiração, facilitando, assim, o processo de resfriamento, mas geralmente são sensíveis à exposição a ele. Essa exposição pode causar disfunções fisiológicas e deterioração rápida (FENNEMA, 2010).

Segundo Kluge et al. (2002), desde que colhidas no seu estágio ideal, as frutas climatéricas são capazes de completar o seu amadurecimento quando destacadas da planta, enquanto que as não climatéricas devem ser colhidas quando atingem a completa qualidade comestível. Não existem diferenças fundamentais entre os dois grupos de frutos quanto ao mecanismo de amadurecimento (CHITARRA e CHITARRA, 2005). Para os autores, os frutos não climatéricos apresentam amadurecimento mais lento, necessitando de mais tempo para completar o processo, sem demanda súbita na demanda de energia; já nos frutos climatéricos os eventos ocorrem rapidamente e com grande demanda de energia, responsável pela súbita ascensão na taxa respiratória.

Dos fatores externos, a temperatura é o que exerce o maior efeito sobre a taxa respiratória sendo que seu gerenciamento adequado é o modo mais efetivo para reduzir a respiração e prolongar a vida útil de produtos perecíveis (FENNEMA et al., 2010) como, por exemplo, a laranja, o limão, entre outros.

Após a colheita, é importante resfriar os produtos perecíveis o mais rápido possível. Produtos aquecidos provenientes do campo têm elevadas taxas de

respiração e, se não refrigerados, continuarão a envelhecer fisiologicamente com rapidez, acelerando a senescência do tecido. O resfriamento rápido remove o calor do campo (também chamada de calor sensível), reduzindo o calor liberado pela respiração (calor vital). Até mesmo poucas horas de atraso no resfriamento podem resultar em reduções significativas de vida útil (FENNEMA et al., 2010).

2.3.2 Pré-resfriamento

Janick (1986) definiu o pré-resfriamento como sendo a remoção do calor do campo de produtos recém-colhidos, a fim de retardar o metabolismo e reduzir a deterioração prévia antes do transporte ou armazenagem. Essa técnica reduz rapidamente a transpiração de produto colhido e resulta na manutenção da qualidade do produto a ser comercializado (Brosnan e Sun, 2001). O pré-resfriamento, também chamado de resfriamento rápido, é uma das técnicas de maior custo efetivo e de maior eficiência entre os métodos de preservação de qualidade disponíveis na produção dos cultivos comerciais (SULLIVAN et al., 1996).

Este processo pode ser realizado em tempos razoavelmente curtos, que vão desde minutos até algumas horas (SPANOL e SIGRIST, 1988). O resfriamento rápido deve ser o primeiro passo a ser dado logo após a colheita onde, para este processo, não deverá ser usado câmaras convencionais, pois não há movimentação de ar necessária para o rápido resfriamento do produto. O uso de resfriamento rápido permite reduzir a quantidade de energia que se gasta durante o armazenamento e garante a qualidade para os produtos (ASHRAE, 1993).

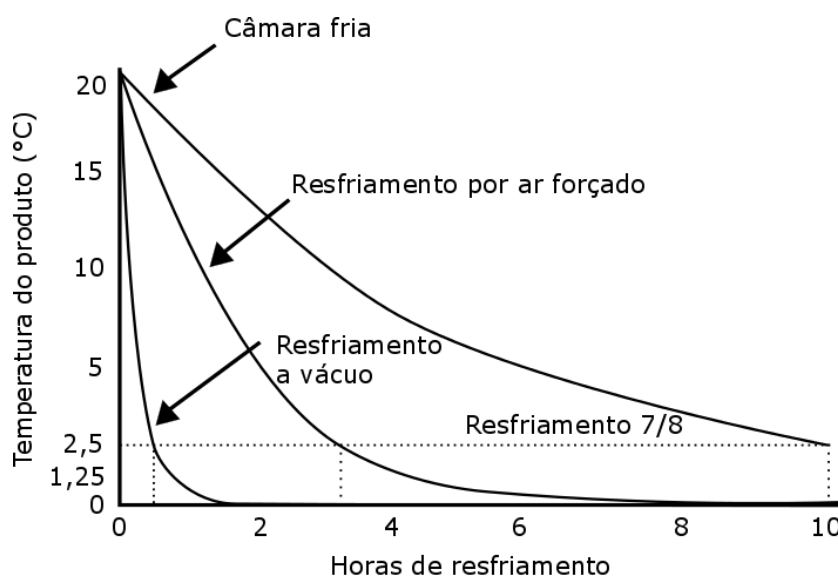
Teruel (2000) afirma que o método de resfriamento deve ser escolhido em dependência com a perecibilidade e requerimento de refrigeração do produto, sua adaptabilidade ao método, disponibilidade de instalações e equipamentos, adequada compatibilidade entre o método usado e a embalagem, temperatura do produto após a colheita, entre outros fatores.

2.3.3 Métodos de Resfriamento

Comercialmente, existem vários de métodos de resfriamento que são utilizados, cada qual com suas próprias variantes, tais como: resfriamento por ar (câmara fria e ar forçado), vácuo, hidrorresfriamento e por gelo. A escolha particular do método que será usado depende de muitos fatores, como velocidade do resfriamento (Figura 2.3), requisitos do produto, custo, portabilidade, etc. (FENNEMA et al., 2010).

Portanto, é importante conhecer o princípio de cada método de resfriamento, a fim identificar os riscos potenciais associados a eles e selecionar o melhor método de resfriamento para cada produto (CENCI, 2006).

Figura 2.3: Curvas de resfriamento generalizadas para sistemas de resfriamento em câmara, ar forçado e vácuo. Fonte: Adaptado Fennema et al. (2010).



2.3.3.1 Resfriamento por Ar

Nesse método, o ar é usado como meio refrigerante. Esses sistemas de resfriamento são relativamente baratos, pois o ar é gratuito e de fácil movimentação. Entretanto, devido à baixa capacidade térmica e à condutividade do ar, o resfriamento pode ser muito demorado. Dois tipos de resfriamento por ar são conhecidos: as câmaras frias e o resfriamento com ar forçado (FENNEMA et al., 2010).

2.3.3.1.1 Câmara fria

De acordo com ROCHA (2001), câmaras frigoríficas são ambientes especialmente projetados para a armazenagem de produtos predominantemente em baixas temperaturas e em grandes volumes (Figura 2.4). Podem ser reguladas para trabalhar mantendo as mais diversas temperaturas, tanto positivas quanto negativas.

A câmara fria envolve a colocação do produto dentro de uma câmara refrigerada, permitindo que ele resfrie pelo movimento passivo de ar frio por dentro de si mesmo. Esse método requer menos capacidade de refrigeração, pois a remoção de calor ocorre em maiores períodos de tempo (i.e., overnight). O produto também pode ser estocado no local onde será resfriado. Entretanto, esse é o mais lento de todos os métodos de resfriamento (FENNEMA et al., 2010).

Figura 2.4: Câmara fria/frigorífica. Fonte: Grako Engenharia.



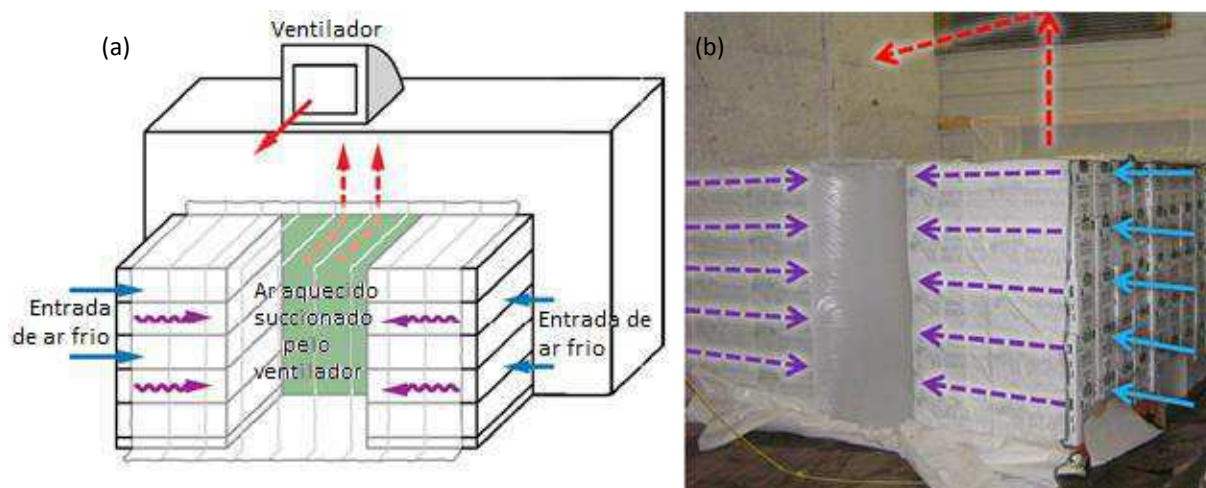
2.3.3.1.2 Resfriamento por ar forçado

O resfriamento por ar forçado envolve movimentação ativa de ar frio sobre o produto por meio do uso de um gradiente de pressão para forçar o ar pelos interstícios do produto (Figura 2.5). Esse é o método de resfriamento mais adaptado para diferentes produtos, sendo muito mais rápido que a câmara fria (costuma demorar de um quarto a um décimo do tempo). O produto pode ser embarcado mais rápido, ocupando menos área, etc. No entanto, tal método requer maior capacidade de refrigeração para que se lide com o pico de remoção de calor (FENNEMA et al., 2010).

Esse método tem a vantagem de evitar a contaminação dos frutos com microrganismos causadores de podridões eventualmente presentes na água do resfriador (BRACKMANN et al., 2001). Portanto, deve-se sempre manter as condições de higiene adequadas nas dependências do refrigerador e do local de onde provém o ar (CENCI, 2006).

O túnel de resfriamento por ar forçado é formado por duas fileiras de caixas contendo os produtos em um ambiente ventilado onde são organizados de modo que uma via de retorno de ar entre elas é deixada aberta para a circulação do ar de refrigeração. Uma lona é colocada sobre o produto para forçar o fluxo do ar de refrigeração a passar através do produto em uma única direção. Pode-se observar que a abertura dos páletes está bloqueado pelo excesso de lona e por materiais bloqueadores nas laterais. O ar retorna para a câmara pela abertura da parede, ao fundo, acima do produto (FRASER et al., 2014).

Figura 2.5: Túnel de resfriamento por ar forçado. (a) Representação esquemática. (b) Representação experimental. Fonte: Fraser et al. (2014).



A perda de água pode ser um problema se o resfriamento do produto demorar muito tempo (câmara fria) ou se o movimento rápido de ar sobre o produto continuar após ele ser resfriado (resfriamento por ar forçado) (FENNEMA et al., 2010). O processo de convecção forçada pode ser aplicado em cogumelo, ervilha, couve-flor, vagem, abobrinha, frutas diversas e milho-verde (CHITARRA e CHITARRA, 2005).

2.3.3.2 Hidroresfriamento

Diferentemente do ar, a elevada capacidade térmica da água faz dela um meio eficiente para o resfriamento de produtos. Além disso, a perda de água de produtos é prevenida durante o resfriamento. Entretanto, os produtos e seus recipientes devem tolerar água livre e qualquer produto químico (p. ex., sanitizantes) da água. Os hidroresfriadores geralmente resfriam o produto por banho com água fria (Figura 2.6), ou por imersão dele em água fria. Em alguns locais, o bom resfriamento da água pode ser usado para resfriamento inicial do produto. Os hidroresfriadores não costumam funcionar bem em produtos que flutuam ou têm grande espaços intercelulares que promovem a captura da solução durante o resfriamento (FENNEMA et al., 2010).

Figura 2.6: Túnel de hidrorresfriamento de alimentos por banho de água fria. Fonte: Fennema et al. (2010)



Como a água é um bom vetor para organismos patogênicos, a manutenção da boa sanitização dela é necessária. Sendo assim, o sistema de recirculação de água deve ser tratado com cloro ou outro sanitizante e a água deve ser monitorada com frequência e trocada com regularidade para a redução de seus níveis patogênicos (FENNEMA et al., 2010).

2.3.3.3 Resfriamento por gelo

O gelo é um dos métodos mais eficientes de resfriamento devido ao seu elevado calor de fusão que absorve 80 cal/g de calor quando derrete. Entretanto, é difícil obter-se contato completo entre o gelo e o produto, o que resulta em resfriamento *uneven*. Existem técnicas que aumentam o contato do produto com o gelo que aumenta a

velocidade de resfriamento (p. ex., uso de pequenas peças de gelo, alternando camadas de gelo e produto, gelo líquido, entre outras.) (Figura 2.7). Do mesmo modo que no hidrosfriamento, o produto e o contêiner devem tolerar água livre e produtos químicos, se necessário boa sanitização da água. Outros problemas incluem a necessidade de se transportar massa adicional (gelo), insuficiência (questão sanitária) de liberação de água conforme o gelo derrete dos recipientes e a necessidade de renovação periódica de gelo nos recipientes (FENNEMA et al., 2010).

Chitarra e Chitarra (2005) afirmam que o processo de pré-resfriamento com gelo é eficiente em produtos que não se danificam pelo contato direto com o gelo como brócolis, couve, espinafre, rabanete, cebolinha, couve-de-bruxelas, melão e cenoura.

Figura 2.7: Técnica de resfriamento por gelo tipo escama. Fonte: GEA Group.



2.3.3.4 Resfriamento a vácuo

O resfriamento a vácuo (Figura 2.8) é o único método que não usa recirculação do meio de resfriamento (água ou ar) para refrigerar o produto. Em vez disso, o produto é colocado em câmaras grandes, herméticas, sendo aplicado vácuo ao conteúdo. A cerca de 5 mm de mercúrio, a água entra em ebulição a aproximadamente 0°C e, conforme ela evapora, o calor latente de vaporização da água remove em torno de 580 cal/g do produto (FENNEMA et al., 2010).

Isso é mais benéfico em produtos com elevada relação superfície-volume, como a alface, sendo capaz de, inclusive, refrigerar o centro do produto. Como se perde

água durante esse processo, às vezes ela é pulverizada sobre o produto antes do resfriamento, para que a água usada na refrigeração venha principalmente da que é adicionada, e não do produto em si (FENNEMA et al., 2010).

De acordo com Chitarra e Chitarra (2005), este método sob pressão reduzida é utilizado comercialmente em alface, aspargo, brócolis, couve-flor, repolho, aipo e milho doce.

Figura 2.8: Túnel de resfriamento a vácuo de alimentos. Fonte: Coldmax Refrigeration.



2.4 Laranja: Aspectos Científicos e Tecnológicos

2.4.1 Características Gerais

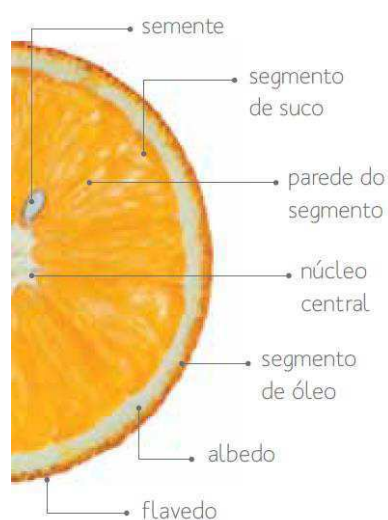
A laranja (*Citrus sinensis*) é uma das frutas mais cultivadas em todo o mundo, produzida pela laranjeira, uma árvore da família *Rutaceae* e divisão *Angiospermae* de porte médio e copa densa, arredondada e ciclo de vida perene. Originária da Ásia e Arquipélago Malaio, estendendo-se desde a Índia, Norte da China até a Austrália - por volta de 4.000 anos atrás. A laranja foi introduzida no Brasil pelos portugueses na época da colonização no século XVI, que a utilizavam para combater o escorbuto, doença que afetava marinheiros carentes de vitamina C (CitrusBR, 2016).

Essencialmente, uma laranja é composta por diversas vesículas de suco protegidas por uma película de cera, a casca. É na casca que estão as substâncias responsáveis pelo aroma e pela cor da fruta. Já a parte comestível é composta por segmentos que possuem vesículas de suco, além de sementes (Figura 2.9). O suco

natural da fruta contém açúcares, ácidos, vitaminas, minerais, pectinas, pigmentos, dentre outros componentes (CitrusBR, 2016).

O que se chama genericamente de laranja são diferentes variedades das espécies cítricas. Apesar de compartilharem essas características gerais, os tipos de laranja divergem em tamanho, cor, quantidade de açúcares, de sementes, acidez, época de colheita, etc. São mais de 100 variedades de laranjas cultivadas pelo mundo. No Brasil, as mais comuns são as laranjas Bahia, Pêra, Natal, Valência, Hamlin, Westin e Rubi (CitrusBr, 2016).

Figura 2.9: Partes da Laranja. Fonte: CitrusBR



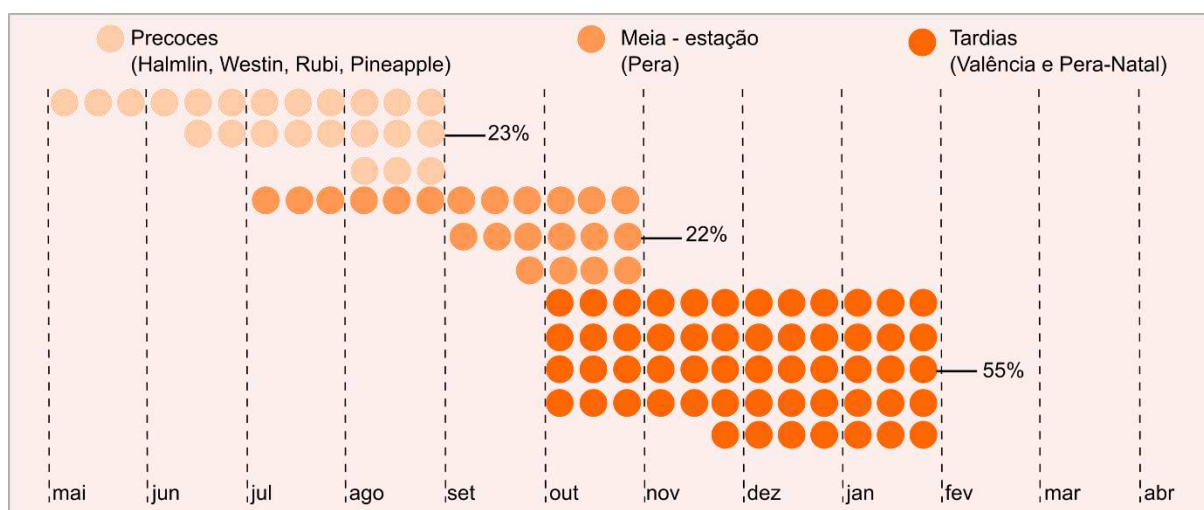
Os frutos cítricos estão entre os mais produzidos e consumidos no mundo, gerando milhares de empregos em vários seguimentos dos diversos setores da economia, estando presente praticamente na mesa de todos os brasileiros. Suas cultivares variam desde frutos com o teor de acidez extremamente alto e outros com teor de acidez muito baixo. No entanto o grupo das laranjas-doces, dentre elas as de baixa acidez, são aquelas que possuem maior interesse comercial tanto para consumo fresco, quanto para a industrialização (KOLLER, 2006).

São Paulo, como principal polo citrícola do País, é o maior produtor geral de laranja, com volume que supera a 16 milhões de toneladas, representando 39% da produção total de frutas brasileiras. Além da laranja, principal fruta produzida no Estado, destaca-se a colheita de banana, com mais de um milhão de toneladas. Com

extensão territorial de 8,5 milhões de quilômetros quadrados, o Brasil segue como o terceiro maior produtor de fruta no mundo. Atualmente, os pomares do Estado de São Paulo apresentam 55% das plantas com as variedades Natal e Valência e outras variedades tardias; 23% Hamlin e outras precoces; e 22% com Pera e outras variedades de meia-estação como mostra a Figura 2.10 (CitrusBr, 2016).

A preferência dos citricultores pelas variedades tardias, em função da sua maior produtividade, ocorreu em detrimento das variedades de meia-estação, que são bem aceitas no mercado in natura, levando a um déficit de oferta de fruta principalmente no mês de setembro e, conseqüentemente, a uma maior competição entre a indústria e o mercado in natura nesse período como mostra a Figura 2.10 (CitrusBR, 2016).

Figura 2.10: Período de colheita por variedade e percentual de produção. Fonte: Adaptado de Markestrat a partir de CitrusBR.



O consumo da laranja *in natura* é muito comum no Brasil, onde a fruta é abundante. Porém, na maioria dos outros países o que se consome é o suco de laranja - que pode ser fresco (espremido em casa, diretamente da fruta) ou industrializado. Na indústria processadora, o suco também pode ser de dois tipos: suco concentrado congelado (FCOJ³), cuja água é retirada do suco natural; ou não-concentrado (NFC⁴), suco pasteurizado sem a retirada de água.

³ Sigla em inglês Frozen Concentrate Orange Juice

⁴ Sigla em inglês Not-from-concentrate.

Além do suco, existem alguns componentes da laranja que, não sendo utilizados na produção, são aproveitados pela indústria como subprodutos, que também podem ser exportados como ilustra na Figura 2.11. Os principais subprodutos do processamento industrial de suco são:

- a) Comminuted Citrus Base: Produto resultante da moagem da fruta inteira ou de um pouco de suco concentrado misturado à casca moída, utilizado como ingrediente para bebidas à base de frutas.
- b) Polpa: São os gomos de suco rompidos e paredes internas do fruto que sobram após o processo de extração do suco. Pode ser re-adicionada ao suco.
- c) Suco extraído da polpa: Suco obtido após a lavagem da polpa, contendo sólidos provenientes da fruta. Pode ser usado em bebidas à base de frutas ou como fonte de açúcares.
- d) Óleo da casca de laranja (Cold-Pressed Oil): Óleo extraído da casca de laranja, utilizado na produção de compostos para bebidas, cosméticos e produtos químicos.
- e) Essência: Composta pelos componentes resultantes do processo de evaporação, separados em uma fase aquosa e uma oleosa. Ambas as fases são matérias primas para as indústrias de bebidas e alimentos e podem ser re-adicionadas ao suco.
- f) D-Limoneno ou Terpeno Cítrico: O principal componente do óleo da casca da laranja. É utilizado nas indústrias de plásticos como matéria-prima para a fabricação de resinas sintéticas e adesivos.
- g) Farelo de Polpa Cítrica: Produto resultante do processamento do suco, formado a partir dos resíduos úmidos do fruto, que passam por processo de secagem e formam uma forragem concentrada transformada em Pellets, os quais servem de alimentação fibrosa de ovelhas e gado.
- h) Pectina: Produto menos comum, proveniente da casca de laranja e utilizado em geléias, marmelada, e gelatinas.
- i) Álcool: A prensagem do bagaço de laranja produz um líquido cuja fermentação resulta em álcool.

Figura 2.11: Aproveitamento da Laranja. Fonte: CitrusBR.



2.4.2 Laranja Valência (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck)

De acordo com Teruel (2000), supõe-se que essa variedade é de origem espanhola (da região de Valência, na Espanha), mas não se tem evidências concretas. As árvores são de porte médio à grande, com folhagem abundante. As plantas podem chegar a produzir 200 kg de frutos por árvore.

Rodriguez e Viégas (1980) e Teruel (2000) afirmam que os frutos têm formas quase esféricas, com 5 a 6 sementes e peso médio de 150 g. A casca é de cor laranja forte, de espessura média e vesículas de óleo quase em nível, apresentando casca de textura firme (Figura 2.12). O suco representa aproximadamente 50% do peso do fruto, com teores médios do °Brix de 11,8% e acidez de 1,05%, resultando no ratio⁵ de 11,2.

O conhecimento da composição dos alimentos consumidos no Brasil é fundamental para se alcançar a segurança alimentar e nutricional. As informações de uma tabela de composição de alimentos são pilares básicos para a educação

⁵ Razão entre os sólidos solúveis totais e acidez titulável.

nutricional, o controle da qualidade dos alimentos e a avaliação da ingestão de nutrientes de indivíduos ou populações (TACO, 2011).

Figura 2.12: Laranja valência (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck). Fonte: Citricola Lucato.



As frutas em geral têm um importante papel na alimentação humana, especialmente por serem fontes ricas em vitaminas (C, A, entre outras), tiamina, niacina, minerais e fibra dietética. Papel destacado tem as frutas cítricas, entre elas a laranja, que contém uma importante fonte de vitamina C em forma de ácido ascórbico. Este é o componente nutricional mais importante da laranja, sendo sugerido como indicador do valor nutricional das frutas cítricas (ROCHA et al., 1995).

Tabela 2.3: Composição centesimal da laranja valência por 100 g da parte comestível.

Laranja valência	Energia		Umidade (g)	Carboidrato (g)	Proteína (g)	Lipídeo (g)	Fibra alimentar (g)	Cinzas (g)	Colesterol (mg)
	Kcal	kJ							
Crua	46	193	86,9	11,7	0,8	0,2	11,7	0,4	NA
Suco	36	151	90,5	8,6	0,5	0,1	0,4	0,3	NA

Na: não aplicável.

Fonte: taco (2011).

Tabela 2.4: Composição centesimal dos minerais da laranja valência por 100 g da parte comestível.

Laranja valência	Cinzas (g)	Cálcio (mg)	Magnésio (mg)	Manganês (mg)	Fósforo (mg)	Ferro (mg)	Sódio (mg)	Potássio (mg)	Cobre (mg)	Zinco (mg)
Crua	0,4	34	14	0,06	20	0,1	1	158	0,04	0,1
Suco	0,3	9	10	0,03	17	Tr	Tr	143	0,02	Tr

Tr: traços.

Fonte: taco (2011)

Tabela 2.5: Composição centesimal das vitaminas da laranja valência por 100 g da parte comestível.

Laranja valência	Retinol (µg)	Tiamina (mg)	Riboflavina (mg)	Piridoxina (mg)	Niacina (mg)	Vit. C (mg)
Crua	NA	0,07	0,04	0,03	Tr	47,8
Suco	NA	*	*	0,03	Tr	*

Na: não aplicável. Tr: traços. *análises em reavaliação.
 Fonte: taco (2011).

As Tabelas 2.3, 2.4 e 2.5 mostram a composição centesimal da laranja valência (crua e de seu suco) por 100 gramas da parte comestível, bem como a composição de material inorgânico, vitaminas e colesterol. Os níveis dos componentes analisados estão influenciados por fatores climáticos, grau de maturidade, posição da fruta na árvore, manuseio e colheita.

Após a colheita as perdas da qualidade nutricional, particularmente vitamina C, aumentam com os danos fisiológicos, armazenamento prolongado, altas temperaturas, umidade relativa baixa e injúrias pelo frio, quando as frutas são estocadas à temperatura abaixo da recomendada (KADER, 1992).

A tabela 2.6 apresenta algumas propriedades recomendadas para o armazenamento comercial de laranja.

Tabela 2.6: Condições de temperatura e umidade relativa recomendadas para o armazenamento comercial, ponto de congelamento e tempo de conservação de laranja.

Produto	Temperatura (°C)	Ur (%)	Ponto de congelamento (°C)	Tempo de conservação	Fonte
Laranja	3 a 9	85-90	-1,2	3 – 8 Semanas	Chitarra (1990).
	0 a 1	85-90	-2,2	56 – 84 Dias	Strobel (1998).
	0 a 1,11	85-90	-0,78	8 – 12 Semanas	Potter et al. (1986)
	0 a 1,11	85-90	-	8 – 12 Semanas	Ashrae (1998).

2.5 Modelagem e Simulação

As ferramentas que estão disponíveis para resolução de um determinado problema físico, são: os métodos analíticos, métodos numéricos (experimentação numérica) e experimentação em laboratório.

De acordo com Maliska (2004), os métodos analíticos e numéricos formam a classe dos métodos teóricos, pois ambos objetivam resolver equações diferenciais que formam o modelo matemático. A diferença está na complexidade da equação que cada método pode atacar. Os métodos analíticos, apesar de apresentarem uma série de restrições e simplificações, não devem ser descartados, pois uma de suas importantes aplicações é validar casos limites de modelos numéricos e também auxiliar no desenvolvimento de métodos numéricos mais robustos.

Rabi (2011) também afirma que modelagem e simulação podem desempenhar papel estratégico frente às limitações dos métodos experimentais e analíticos. Atualmente, graças à disponibilidade de computadores de alto desempenho aliada ao uso de métodos numéricos eficientes e robustos, tem sido possível obter soluções numéricas evitando-se introduzir simplificações ou restrições que afastam o problema da realidade. Em outras palavras, tem sido possível simular problemas levando-se em conta influências amiúde relaxadas (ou sumariamente ignoradas) em soluções analíticas.

A experimentação em laboratório, por sua vez, tem a grande vantagem de tratar o fenômeno físico em sua configuração real, sendo recomendada sempre que possível. No entanto, ela apresenta alguns inconvenientes como os custos envolvidos, dificuldade de reprodução das condições reais, questões envolvendo segurança, dentre outros. Porém, na ausência de modelos matemáticos estabelecidos e em geometrias extremamente complexas, muitas vezes esta é a única alternativa disponível (MALISKA, 2004).

Rabi (2011) relata que a simulação numérica foi usada inicialmente para fins acadêmicos e tem evoluído de modo expressivo e sua aplicação como ferramenta para pesquisa, desenvolvimento e inovação não apenas tem se intensificado como também avançado para as mais diversas áreas. Dentre os exemplos de aplicação das técnicas numéricas, Maliska (2004) enumera processos de combustão, previsão climática, engenharia aeronáutica, simulação de reservatórios de petróleo e poluição ambiental.

Quanto a processos envolvendo alimentos ou produtos biotecnológicos com formatos irregulares, propriedades não-lineares e/ou anisotrópicas⁶, as técnicas computacionais tornam-se ferramentas relevantes para investigar a influência de diferentes condições iniciais e/ou de contorno que dependam do tempo (WANG et al., 2003). De fato, modelos para tais processos podem ser complexos a ponto de as técnicas numéricas se tornarem imprescindíveis (DATTA, 2007).

Visto que os processos na indústria de alimentos podem ser regidos por equações não-lineares a serem resolvidas em domínios irregulares, heterogêneos ou com fronteiras móveis, os métodos numéricos surgem como alternativa viável (ROMANO, 2005). Este autor também sugere que a simulação numérica pode beneficiar o setor de alimentos quanto ao controle da produção, à qualidade do produto e à otimização do processo. Como apontam Norton et al. (2007) e Scott et al. (1997), tem sido crescente o uso de programas de fluidodinâmica computacional (“computational fluid dynamics”, CFD) na indústria de alimentos.

Dentre os métodos numéricos difundidos na indústria de alimentos, Wang et al. (2003) destacam os de diferenças finitas, de elementos finitos e de volumes finitos. Dada a sua relativa simplicidade, o método de diferenças finitas é usado quando os produtos não apresentam variações de propriedades ao longo do domínio de discretização (MIGLIORI et al., 2005) ou quando podem ser aproximados por formas geométricas elementares como fatias, blocos, cilindros ou esferas (AMENDOLA e TERUEL, 2005).

⁶ Certas propriedades físicas (dureza, resistência mecânica, refração da luz, por exemplo) dependem da direção em que são medidas.

Puri e Anantheswaran (1993) afirmam que em aplicações envolvendo materiais heterogêneos, com propriedades variáveis, formas irregulares ou condições de contorno complexas como por exemplo: fronteiras móveis, o método dos elementos finitos tem bom desempenho.

Scott et al., (1997) e Van Der Sman (1999) relatam que o uso do método dos volumes finitos para simular o processamento térmico de alimentos tem sido crescente e Teruel et al., (2001) completam que esse método se mostra adequado mesmo para alimentos apresentando formas geométricas distintas. Esse método tem a conveniente tendência físico-numérica de conservar massa e energia uma vez que, no processo de discretização, envolve a integração das equações de transporte sobre volumes de controle servindo como plataforma para elaborar softwares comerciais de CFD voltados à indústria de alimentos (FERZIGER et al., 2002).

2.6 Parâmetros termofísicos

As propriedades térmicas dos produtos hortícolas resumem-se à sua habilidade de transferir calor, sendo essenciais na análise da transferência de calor que ocorre em processos térmicos tais como refrigeração, congelamento e aquecimento, bem como otimização do desempenho de equipamentos de transferência de calor. Sendo o conhecimento destas propriedades essencial para o desenvolvimento da ciência de alimentos (CASTRO, 2004; NUNES et al., 2002).

As propriedades do meio de resfriamento são muito importantes, seja ar, água ou outro, destacando-se a condutividade térmica e o calor específico, as quais têm sido determinadas experimentalmente. Por outro lado, propriedades de transporte são também de grande relevância no desenvolvimento de cálculos de transferência de calor (TERUEL, 2000).

A condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico de frutos *in natura*, são propriedades térmicas importantes para que se tenha um conhecimento adequado das necessidades e condições de operação de equipamentos de resfriamento. A temperatura e as propriedades do produto estão estritamente ligadas

ao processo de resfriamento e o efeito destas influencias na precisão dos resultados (DUSSÁN e HONÓRIO, 2005).

2.6.1 Densidade e Massa específica

Segundo Fellows (2006), a densidade do material é igual a sua massa dividida por seu volume. A densidade dos materiais não é constante e altera-se com a temperatura (temperaturas mais elevadas reduzem a densidade dos materiais) e com a pressão. Isso é particularmente importante para fluidos, nos quais diferenças de densidades causam correntes de convecções.

A densidade de líquidos é uma medida direta de relação massa/volume sob uma determinada temperatura, porém para sólidos particulados e pós existem duas formas de densidade: a densidade dos pedaços individuais e a densidade do conjunto de material, que também incluem os espaços de ar entre os pedaços. Esta última medida é denominada de densidade aparente e é a massa de sólidos dividida pelo volume bruto. A fração do volume que é ocupada pelo ar é chamada de porosidade (ε) e é calculada por:

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_b}, \quad (2.1)$$

em que, V_a = volume de ar (m^3) e V_b = volume bruto (m^3).

A densidade a granel do material depende da densidade do sólido e da geometria, do tamanho e das propriedades superficiais das partículas individuais (FELLOWS, 2006).

2.6.2 Condutividade térmica

A taxa de calor transferida por condução é determinada pela diferença de temperatura entre o alimento e o meio de aquecimento ou resfriamento e a resistência total à transferência de calor. A resistência a transferência de calor é expressa como a condutância do material ou, mais comumente, como sua recíproca, que é denominada de condutividade térmica (FELLOWS, 2006).

A condutividade térmica de um alimento é de 20 a 30 vezes menor que a de um aço, por exemplo e não limita a taxa de transferência de calor. A condutividade térmica dos alimentos é influenciada por uma série de fatores relacionados com a natureza do alimento (p. ex. estrutura da célula, quantidade de ar preso entre as células e teor de umidade) e com a temperatura e pressão do ambiente. A redução no teor de umidade causa uma diminuição substancial na condutividade térmica, o que tem implicações importantes nas operações unitárias envolvendo a condução de calor pelo alimento para a remoção de água, como na secagem, por exemplo (FELLOWS, 2006).

A condutividade térmica apresenta uma relação com o teor de água. A mesma aumenta com o aumento do teor de água (NUNES et al., 2002). Para frutos e hortaliças, a Equação 2.2 relaciona a condutividade térmica (k), expressa em $W/m^{\circ}C$, em função do teor de água (U) do produto expresso em percentagem em base úmida (SWEAT, 1974; DÚSSAN, 2003).

$$k = 0,00493 U + 0,148 \quad (2.2)$$

2.6.3 Difusividade térmica

A difusividade térmica indica como um calor se difunde através de um material, sendo uma variável mais importante para o controle térmico do que a condutividade, pois expressa quão rapidamente um corpo se ajusta por inteiro à temperatura de seu entorno. A determinação dessa propriedade é de grande importância para os produtos agroalimentares por ser indispensável para a predição de processos de transferência de calor, tal como resfriamento (VENÂNCIO et al., 2006). Segundo Nunes et al. (2002), essa propriedade é afetada pela temperatura, composição, conteúdo de água, homogeneidade e estrutura física do material e é o valor deste que determina com que velocidade o calor se propaga e como ele se difunde através do material.

Quando o teor de água é maior do que 30%, a difusividade aumenta linearmente com o aumento do teor de água, devido ao aumento linear da condutividade térmica (NUNES et al., 2002). Conforme verificado por Riedel (1969), a difusividade térmica de alimentos com teor de água maior que 40%, como é o caso da goiaba, é fortemente

dependente do teor de água (U). Tal propriedade é definida matematicamente pela Equação 2.3:

$$\alpha = 0,088 \times 10^{-6} + [(\alpha_w - 0,088 \times 10^{-6}) \times U / 100], \quad (2.3)$$

em que, α é dada em m^2/s e α_w é a difusividade térmica da água à temperatura do produto, para 20°C. Pode-se assumir $\alpha_w=0,148 \times 10^{-6} m^2/s$, segundo Ashrae (1993).

A difusividade térmica está associada à difusão de calor dentro do produto durante as mudanças da temperatura com o tempo, portanto, um elevado valor da difusividade térmica significa uma rápida transferência do calor dentro do produto e pouco tempo para o calor sair do corpo (DÚSSAN e HONÓRIO, 2004).

2.6.4 Calor específico

O calor específico corresponde à energia necessária para alterar a temperatura da massa unitária do produto em um grau, baseada estritamente na quantidade de energia requerida e não na taxa em que ocorre essa mudança de temperatura (FONTANA et al., 1999). Segundo Ashrae (1993), o calor específico é diretamente proporcional ao teor de água em frutos e hortaliças, como pode ser observado na Equação 2.4 de Siebel para o cálculo do calor específico (C_p) dos materiais com base no conteúdo de água (U):

$$C_p = 0,0335 U + 0,837 \quad (> 0^\circ\text{C}), \quad (2.4)$$

em que o C_p é expresso em $\text{kJ} / \text{kg } ^\circ\text{C}$ e U expresso em %.

Em materiais sólidos de origem vegetal, as propriedades térmicas, tais como condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico, são funções do tipo, temperatura e teor de água do material. Em frutos e hortaliças in natura com alto teor de água, os valores da condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico são influenciados fortemente pelo teor de água. Nos produtos de origem vegetal a condutividade térmica é muito mais dependente da estrutura celular, massa específica e teor de água que da temperatura.

2.6.5 Coeficiente de transferência de calor convectivo

O coeficiente convectivo de transferência de calor é a taxa de transferência de calor para cada grau de diferença de temperatura através da interface sólido-fluido por unidade de área da superfície do material sólido (CASTRO, 2004).

O coeficiente superficial de transferência de calor (h_c) não é uma propriedade térmica dos alimentos, mas é necessário para projetar equipamentos para alimentos onde se envolve a transferência de calor por convecção, bem como para validar os resultados gerados, via simulação numérica do processo de resfriamento rápido com ar forçado (ASHRAE, 1993; PIROZZI e AMENDOLA, 2005).

Ashrae (1993) afirma que o resfriamento com ar forçado de produtos hortícolas depende da velocidade de ar e das condições termodinâmicas do ar circundante, os quais influenciam diretamente o coeficiente de transferência de calor convectivo. O tipo de embalagem, dimensões, área de abertura e o tipo de arranjo das mesmas no resfriamento também influenciam nos valores deste parâmetro (DÚSSAN, 2003; THOMPSON et al., 1998), além das características dos frutos, tais como temperatura, teor de água, calor específico e forma geométrica (THOMPSON et al., 1998).

A importância da determinação experimental dos valores da condutividade e da difusividade térmica para o cálculo do coeficiente de transferência de calor convectivo e taxa de resfriamento durante o processo de resfriamento de produtos hortícolas é ressaltada por Chau (2001).

Teruel (2000) realizou diversas pesquisas acerca do coeficiente de transferência de calor e constatou que, em geral, durante o resfriamento de produtos agrícolas, o coeficiente de transferência de calor convectivo, pode ser grande quando comparado com a condutividade térmica. Isto significa que a temperatura na superfície muda mais rapidamente que a temperatura no interior do corpo. Desta forma, estabelece-se um gradiente de temperatura, neste caso se cumpre a Lei de Fourier. Na Tabela 2.3, mostra-se alguns valores de h_c :

Tabela 2.7: Valores de h_c citados pela literatura (resfriamento com ar forçado).

Produto	Geometria	h_c ($W/m^2\text{°C}$)	Autores
Laranja, Tangerina	Esférica	50 - 68	Soule et al. (1966)
Laranja	Esférica	21,23 - 56,48	Teruel (2000)
Laranja	Esférica	62	Bennet et al. (1966)
Laranja	Esférica	8 - 55	Baird e Gaffney (1976)
-	-	20 - 35	Mohsenin (1980)
Pepino	Cilíndrica	28 - 52	Dincer e Genceli (1994)
Figo	Esférica	21 - 38	Dincer (1995)
Pêra, Pepino	Esférica, Cilíndrica	12 - 19 18 - 28	Dincer e Genceli (1995)

Fonte: Teruel (2000)

2.7 Estado da arte sobre resfriamento de frutas

Pirozzi e Amendola (2005), em estudo do resfriamento rápido de morango com ar forçado por simulação numérica, utilizaram um modelo matemático escrito em coordenadas esféricas na 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.

Siqueira (2009) realizou uma pesquisa que avaliou o resfriamento rápido por ar forçado de goiaba, o autor analisou o processo e sua influência na vida útil deste fruto através de parâmetros físicos, físico-químicos e sensoriais. Foram avaliados os parâmetros: perda de massa, firmeza, vitamina C, acidez titulável, pH, sólidos solúveis e análise sensorial. Os produtos foram submetidos a diferentes experimentos de resfriamento rápido por ar forçado variando os parâmetros: tempo entre colheita e resfriamento rápido e área de abertura das embalagens, definidos através de

planejamento experimental. O resfriamento rápido com ar forçado de goiaba apresentou boa eficiência de resfriamento.

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. (2001) 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).

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 com 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.

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 e 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.

Teruel et al. (2001) desenvolveram um estudo numérico, para a obtenção das curvas de resfriamento de laranja Valência (*Citrus sinensis O.*) e banana prata (*Mussa 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.

Amendola et al. (2009) determinou o valor do coeficiente convectivo de transferência de calor através da metodologia de modelagem matemática e simulação numérica associada ao processo experimental previamente realizado, de resfriamento rápido com ar forçado de figos “Roxo de Valinhos”. O objetivo foi comparar o resultado com o definido pelo ajuste entre os dados experimentais e o uso de equação empírica da literatura, já realizado. Para a predição da temperatura próximo ao centro das frutas, considerou-se o modelo da lei de Fourier em coordenadas esféricas e se implementaram algoritmos segundo os métodos de diferenças finitas e dos elementos finitos para os modelos unidimensional e tridimensional, respectivamente. O estabelecimento do referido valor se deu a partir da comparação desses dados simulados com os dados experimentais. Os autores constataram que os valores resultantes dos dois modelos foram coincidentes e resultaram menores valores residuais que o obtido pela equação empírica; além disso, a representatividade da curva simulada mostrou que a atual metodologia é mais precisa que a anteriormente realizada e, portanto, adequada para este e trabalhos futuros.

Massoni (2002) desenvolveu um modelo numérico unidimensional usando-se um método explícito de aproximação das derivadas de equações diferenciais por diferenças finitas, para solucionar a equação da condução de calor em sólidos com alto teor de água e de formato cilíndrico, que estejam submetidos a um fluxo de ar resfriado. Utilizando o modelo desenvolvido o autor simulou a influência de variáveis físicas e geométricas na distribuição das temperaturas radiais em cilindros hipotéticos, obtendo-se resultados coerentes com o comportamento previsto para tal situação.

Foram feitas medidas experimentais das temperaturas em diferentes localizações radiais em alguns vegetais com formato aproximadamente cilíndrico e, os resultados dessas medidas, comparados com as previsões numéricas, revelando boa concordância dentro da faixa do erro experimental.

Pessoa, 2010 simulou 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.). Onde, 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. O autor mostrou e analisou resultados das cinéticas de resfriamento e distribuição de temperatura no interior das frutas. 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.

Ferrua e 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 e 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.

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).

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%.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM TEÓRICA

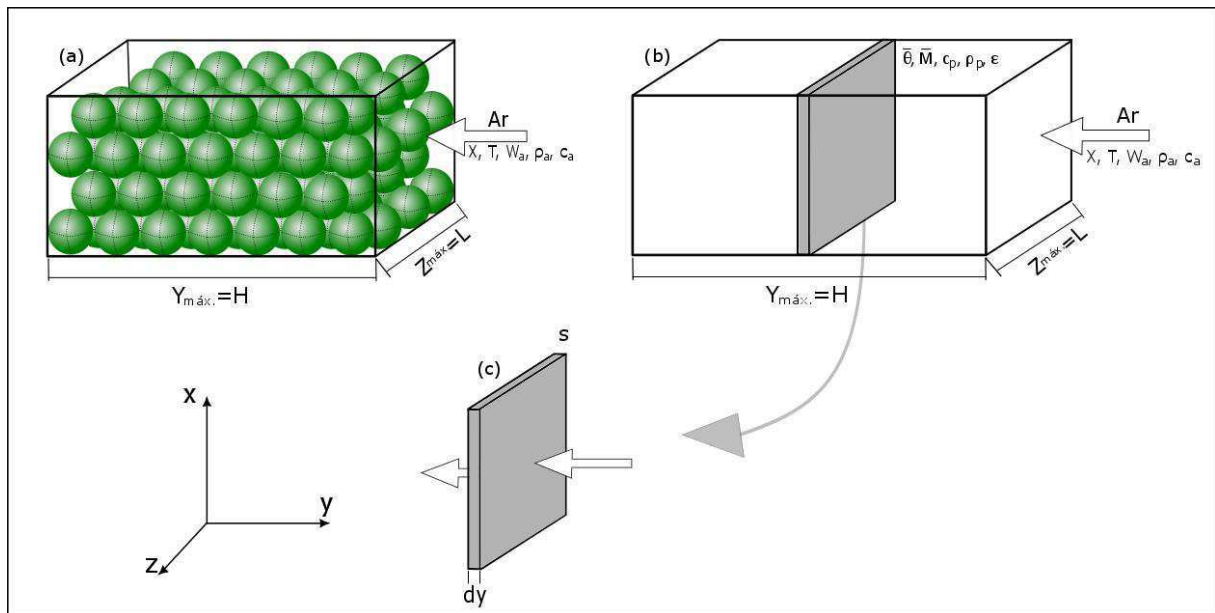
3.1 Caracterização do Problema

O problema abordado nesta pesquisa, está direcionado a modelagem matemática e simulação numérica do resfriamento de leito de frutas não climatéricas (laranja valência). Nessas condições foi desenvolvido um modelo matemático de acordo com os balanços de massa e energia para o ar e para o produto, considerando propriedades termofísicas variáveis, e porosidade constante.

3.2 Modelagem Matemática

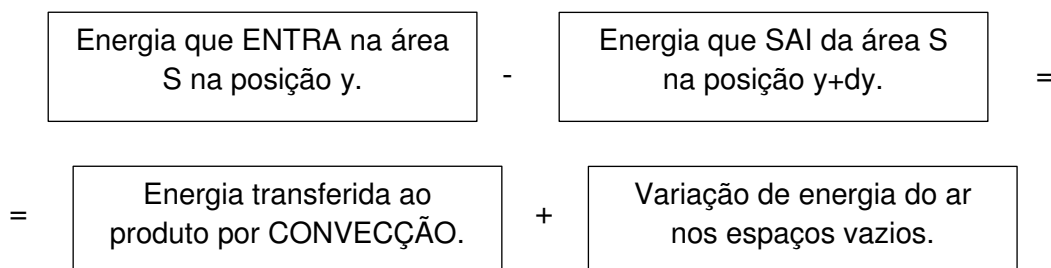
Para se obter as equações governantes, que representam os balanços de massa e energia para o produto e para o ar, neste caso, fluido de resfriamento, considere a Figura 3.1 que apresenta um esquema de um túnel de refrigeração (a) e uma fração volumétrica desde túnel utilizado na obtenção das equações na forma diferencial (b), respectivamente.

Figura 3.1: (a) Esquema do leito de laranja. (b) Esquema do resfriamento com ar forçado e (c) Fração do volume do sólido. Fonte: elaboração própria.



Assim, baseado no elemento diferencial do leito de frutas, tem-se:

a) Balanço de Energia para o ar



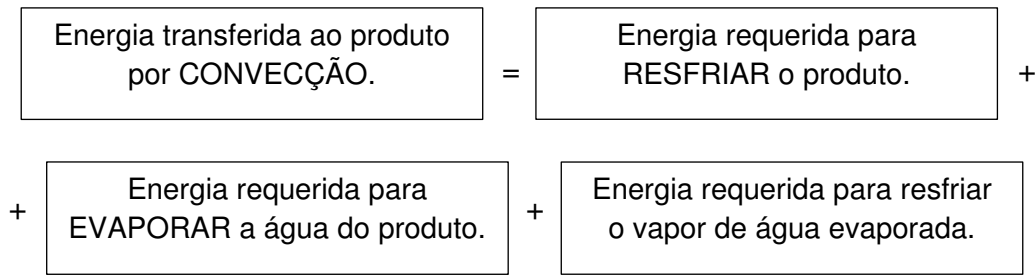
Na simbologia matemática:

$$\begin{aligned}
 \rho_a w_a c_a T S dt + \rho_a w_a x c_v T S dt - (\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a x c_v) \left(T + \frac{\partial T}{\partial y} dy\right) S dt \\
 = A^* h_c (T - \bar{\theta}) + (\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \epsilon S dy \frac{\partial T}{\partial t} dt
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Reagrupando os termos e fazendo as possíveis simplificações, tem-se:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{w_a}{\epsilon} \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{A^* h_c (T - \bar{\theta})}{(\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \epsilon} \tag{3.2}$$

b) Balanço de energia para o produto



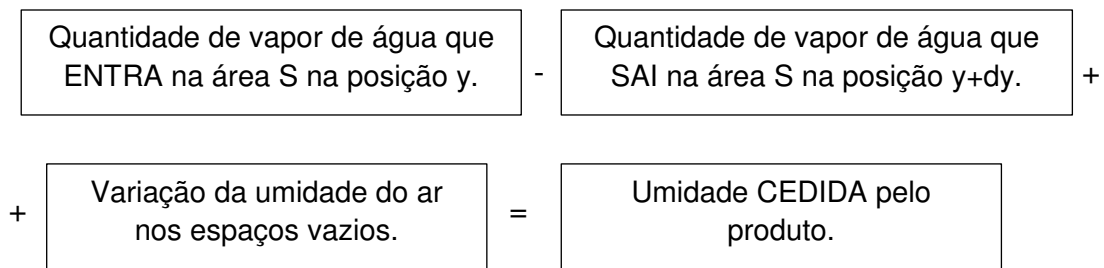
Matematicamente:

$$\begin{aligned}
 A \cdot h_c (T - \bar{\theta}) S \, dy \, dt &= (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}) S \, dy \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) + (-h_{fg}^* \rho_p) S \, dy \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \, dt \\
 &+ (-\rho_p c_v) (T - \bar{\theta}) S \, dy \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \, dt
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Reagrupando os termos e fazendo as possíveis simplificações, tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{A \cdot h_c (T - \bar{\theta})}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} + \frac{[h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})] \rho_p}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \tag{3.4}$$

c) Balanço de massa para o ar:



$$(\rho_a w_a x) S \, dt - (\rho_a w_a) S \left(x + \frac{\partial x}{\partial y} \, dy \right) \, dt + (\rho_a \varepsilon) S \left(dy + \frac{\partial x}{\partial t} \, dt \right) = \rho_p S \left(dy \frac{\partial M}{\partial t} \, dt \right) \tag{3.5}$$

Reagrupando os termos e fazendo as possíveis simplificações, tem-se:

$$-\rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} - \rho_a \varepsilon \frac{\partial x}{\partial t} = \rho_p \frac{\partial M}{\partial t} \tag{3.6}$$

d) Balanço de massa para o produto

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = 0 \quad (3.7)$$

Considera-se que não houve perda de massa do produto durante o processo de refrigeração, pelo fato do tempo de processo ser muito curto para que este fenômeno possa ocorrer intensamente.

Para os modelos de resfriamento do leito por ar forçado, as condições iniciais e de contorno são as seguintes:

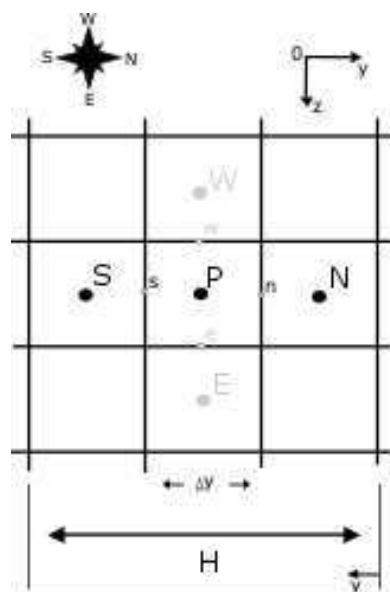
$$\text{Condições Iniciais:} \quad T(y=0, z, t) = T_{\text{ent}} \quad x(y=0, z, t) = x_0$$

$$\text{Condições de Contorno:} \quad \bar{M}(y, z, t=0) = \bar{M}_0 \quad \theta(y, z, t=0) = \bar{\theta}_0$$

3.3 Solução numérica

Para obter a solução numérica desse problema transiente foi utilizado o método numérico dos volumes finitos (MALISKA, 2004; PATANKAR, 1980). A Figura 3.2 ilustra um esquema numérico e o volume de controle interligado neste trabalho.

Figura 3.2: Esquema numérico e o volume de controle. Fonte: elaboração própria.



Depois que integrar as equações diferenciais parciais, que compreendem as equações 3.1, 3.4 e 3.6, no volume e no tempo, tem-se como resultado um sistema de equações lineares, na sua forma discretizada como mostrada a seguir.

a) Balanço de energia para o ar

Integrando a Equação 3.1 no volume e no tempo, obtém-se a equação linear:

$$A_p T_p = A_s T_s + A_p^0 T_p^0 + S_c^t \quad (3.8)$$

em que:

$$A_p = \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{w_a}{\varepsilon} + \frac{A^* h_c \Delta y}{(\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \varepsilon} \quad (3.9)$$

$$A_s = \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.10)$$

$$A_p^0 = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.11)$$

$$S_c^t = \frac{A^* h_c \Delta y}{(\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \varepsilon} \quad (3.12)$$

b) Balanço de energia para o produto

Integrando a equação 3.4 no volume e no tempo, obtém-se a equação linear:

$$A_p \theta_p = A_p^0 \theta_p^0 + S_c^\Phi \quad (3.13)$$

em que:

$$A_p = \frac{1}{\Delta t} + \frac{A^* h_c}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} + \frac{c_v \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t}}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} \quad (3.14)$$

$$A_p^0 = \frac{1}{\Delta t} \quad (3.15)$$

$$S_c^\Phi = \frac{(h_{fg}^* + c_v T_p) \rho_p}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} + \frac{A^* h_c T_p}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} \quad (3.16)$$

c) Balanço de massa para o ar

Integrando a equação 3.6 no volume e no tempo, obtém-se a equação linear:

$$A_p x_p = A_s x_s + A_p^0 x_p^0 + S_c^x \quad (3.17)$$

em que:

$$A_p = \frac{\rho_a w_a}{\varepsilon} + \frac{\rho_a \Delta y}{\Delta t} \quad (3.18)$$

$$A_s = \frac{\rho_a w_a}{\varepsilon} \quad (3.19)$$

$$A_p^0 = \frac{\rho_a \Delta y}{\Delta t} \quad (3.20)$$

$$S_c^x = -\frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy \quad (3.21)$$

3.4 Propriedades termofísicas para a laranja valência e para a água

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 a estrutura física do material, ou seja, depende do estado físico em que a matéria se encontra (INCROPERA e DE WITT, 1998).

Os valores dos parâmetros termofísicos e geométricos da fruta e dos fluidos (água e ar), usadas neste trabalho, encontram-se nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1: Parâmetros termofísicos e geométricos da laranja utilizados na pesquisa.

Propriedades	Simbolo	Valor/Fórmula	Unidade	Fonte
Temperatura inicial do produto	$\bar{\theta}$	25,0	°C	Teruel (2000)
Densidade	ρ_p	650	Kg/m ³	
Calor específico	C_p	3115	J/kg °C	
Díâmetro	d	0,08	m	
Porosidade	ε	0,48	-	
Coeficiente de transferência de calor por convecção	h_c	50,0	W/m ² °C	Keey (1992)
Área superficial do sólido por unidade de volume do leito	A^*	$\frac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d}$	m ² /m ³	

A Tabela 3.2 resume os valores dos parâmetros termofísicos da água e do ar de refrigeração.

Para a obtenção dos resultados, foi desenvolvido um código computacional no ambiente do software *Mathematica*®, com base nas equações obtidas na solução numérica, realizada no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, LCTF, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica do CCT/UFCG.

Para a presente pesquisa, foram analisados três grupos distintos onde, o primeiro utiliza os dados experimentais apresentados por Teruel (2000), que foram para validar a metodologia desta pesquisa. No segundo grupo, foi variado a altura do leito da fruta e no terceiro grupo, variou-se o coeficiente de transferência de calor convectivo. Com essas variações, pode-se avaliar a influência que cada parâmetro tem em relação a refrigeração do leito de laranja valência. A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros que foram variados e os fixados em cada grupo em estudo:

Tabela 3.2: Parâmetros termofísicos dos fluidos usados nas simulações.

Propriedades	Simbolo	Valor/Fórmula	Unidade	Fonte
Velocidade do ar	W_a	3,0	m/s	Teruel (2000)
Temperatura do ar	T	1,0	°C	
Umidade relativa	UR	0,877	-	
Calor latente de vaporização da água do produto	h_{fg}^*	$352,58*(374,14 - T)^{0,33052}$	J/kg	Pakanski et al. (1991)
Calor específico do ar seco a pressão constante	c_a	$1,00926 - 4,0403310^{(-5)} * T_a + 6,17596*10^{(-7)}*T_a^2 - 4,09723*10^{(-7)}*T_a^3$	kJ/kg.K	Jumah et al. (1996)
Calor específico do vapor d'água a pressão constante	c_v	$1,8830 - 0,16737*10^{-3} (T_a+273,15) + 0,84386*10^{-6} (T_a+273,15)^2 - 0,26966*10^{-9} (T_a+273,15)^3$	kJ/kg.K	
Calor específico da água a pressão constante	c_w	$2,82232 + 1,18277*10^{-2} (T_a+273,15) - 3,5047*10^{-5} (T_a+273,15)^2 + 3,6010*10^{-8} (T_a+273,15)^3$	kJ/kg.K	
Densidade do ar	ρ_a	$\frac{\rho_{atm} M_a}{RT_{abs}}$	Kg/m ³	
Temperatura absoluta	T_{abs}	$T_a + 273,15$	K	
Constante universal dos gases	R	8.314,34	J/kg	
Pressão atmosférica	P_{atm}	101.325	P_a	
Pressão de vapor de saturação	P_{vs}	$22.105.649,25 * \text{Exp}^{[-27405,53 + 97,541*(T_a+273,15) - 0,146244*(T_a + 273,15)^2 + 0,12558*10^{-3}*(T_a+273,15)^3 - 0,4850210^{-7}*(T_a+273,15)^4]} / [4.34903((T_a+273,15) - 0.39381*10^{-2}(T_a+273,15))]$	P_a	Rossi (1987)

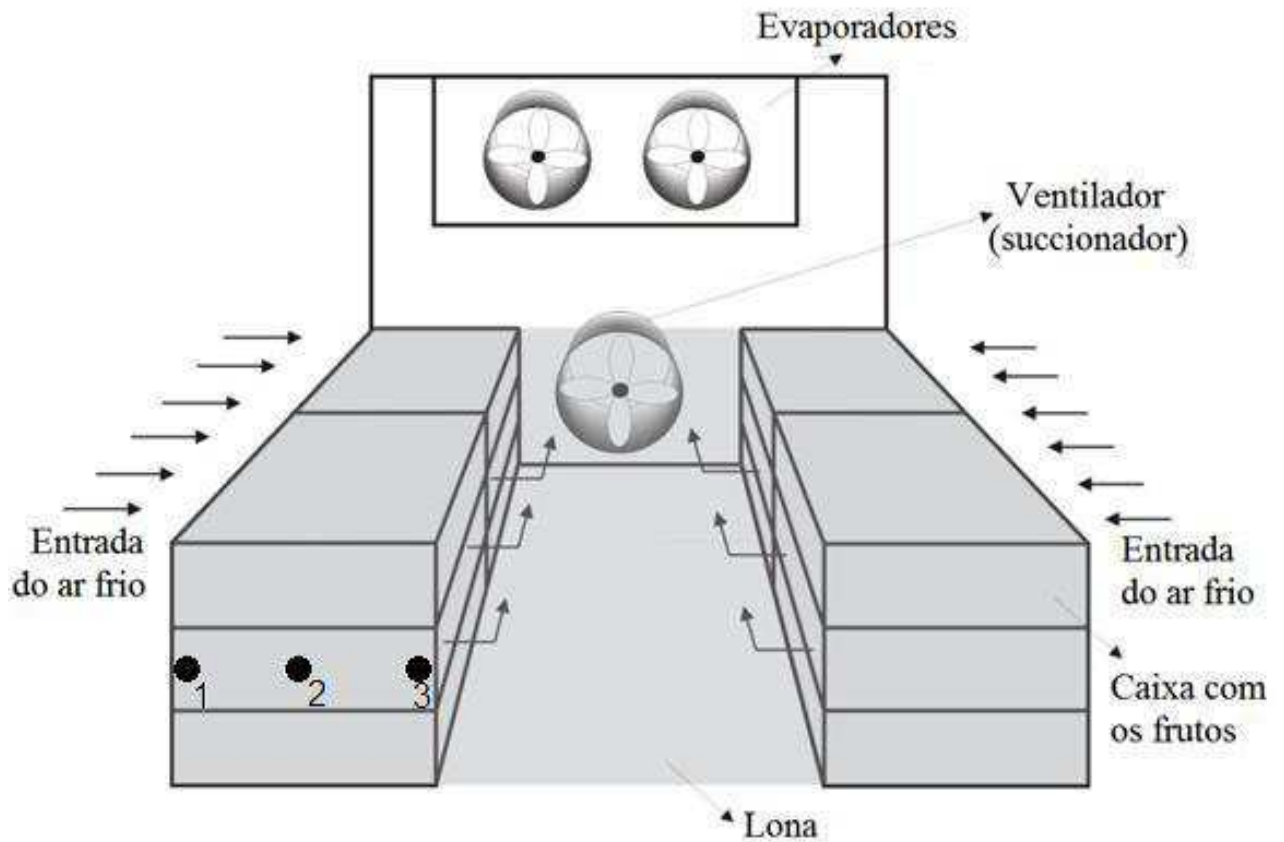
Tabela 3.3: Grupos estudados no resfriamento de leite de laranja valência com ar forçado.

Grupo	Parâmetro Variados	Parâmetros Fixados
A	Dados experimentais	
B	H	$\bar{\theta}$, T, UR, W_a e h_c
C	h_c	$\bar{\theta}$, T, UR, H e W_a

O experimento realizado por Teruel (2000) foi feito da seguinte maneira: inicialmente o sistema foi ligado, com a câmara sem produtos, até estabilizar a temperatura em 1,0°C. Depois que o ar no interior da mesma estabilizou, sendo monitorado através do sistema de aquisição de dados via computador. O processo de inserção dos termopares nas amostras de laranjas selecionadas, de duas caixas, se fazia depois de tirar os frutos da caixa até a fileira em que iam ser colocados os termopares, e depois colocou-se novamente os frutos respeitando o arranjo alternado.

As 10 caixas de laranjas restantes foram mantidas perto da porta de entrada da câmara, até o momento de serem colocadas no interior da mesma, no menor tempo possível, cuidadosamente, para evitar que os termopares não saíssem do lugar. Uma vez colocados as 12 caixas, foram cobertas com uma lona, fechando o túnel e ligando o ventilador do sistema de ar forçado e foi fechada a porta da câmara. Desta forma, e dentro das possibilidades que a montagem experimental permitiu, os experimentos foram realizados, garantindo um mínimo de desestabilização da temperatura do ar, provocada pela abertura e colocação das caixas no interior da câmara.

Figura 3.3: Representação esquemática (vista frontal) onde foram colocados os pontos em que foram introduzidos os termopares nas caixas. Fonte: Siqueira, 2009.



As caixas foram dispostas em duas colunas, em duas fileiras e com três caixas de altura. A face de maior área das caixas, foi colocada no sentido da passagem do fluxo de ar, permitindo assim que, a troca de calor fosse mais eficiente e em consequência, a obtenção de melhores taxas de resfriamento, como mostra a Figura 3.3. Os termopares foram inseridos no centro de 3 laranjas da fileira do meio em duas caixas distintas. A temperatura foi medida no ponto 1 correspondente a entrada do ar na caixa, no ponto 2 (fruto no meio da caixa) e no ponto 3 (que corresponde a posição mais afastada da entrada do ar na caixa).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para analisar os efeitos das condições do ar de refrigeração e da temperatura do leito de laranja valência, três condições foram escolhidas para simulação, constituindo os denominados grupos A, B e C. A tabela 4.1 apresenta todas as condições de refrigeração por ar forçado usadas neste trabalho. Observa-se na tabela que o caso 3 do grupo B é igual ao caso 8 do grupo C.

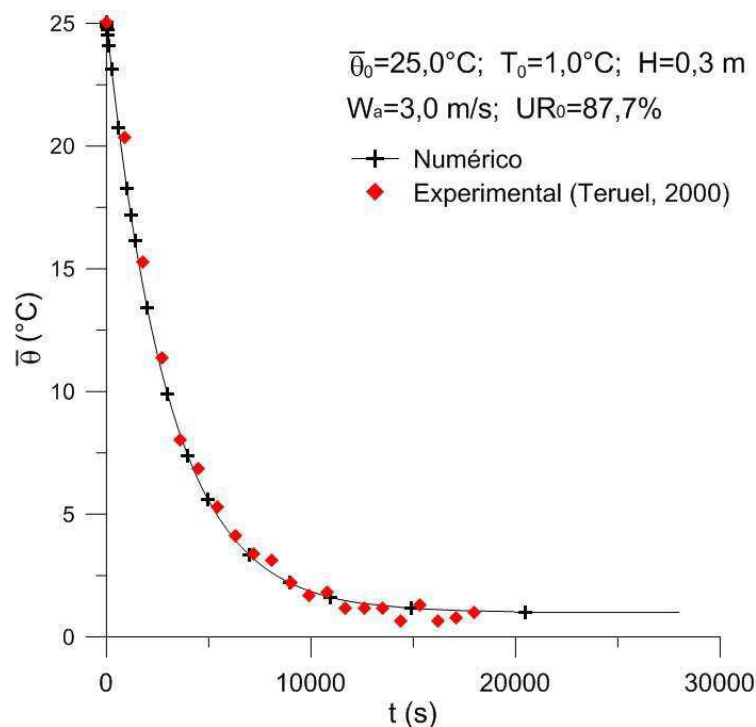
Tabela 4.1: Dados usados nas simulações de resfriamento de leito de laranja valência.

Grupo	Parâmetro Variado	Caso	H (m)	h_c (W/m ² °C)	W_a (m/s)	$\bar{\theta}_0$ (°C)	T_0 (°C)	UR ₀ (%)
A	Validação	1	0,3	56,48	3,0	25,0	1,0	87,7
B	H	2	0,1	50,00	3,0	25,0	1,0	87,7
		3	0,3	50,00	3,0	25,0	1,0	87,7
		4	0,5	50,00	3,0	25,0	1,0	87,7
		5	1,0	50,00	3,0	25,0	1,0	87,7
		6	0,3	5,00	3,0	25,0	1,0	87,7
C	h_c	7	0,3	10,00	3,0	25,0	1,0	87,7
		8	0,3	50,00	3,0	25,0	1,0	87,7
		9	0,3	100,00	3,0	25,0	1,0	87,7
		10	0,3	200,00	3,0	25,0	1,0	87,7

4.1 Validação da metodologia

O grupo A (caso 1) foi usado para validar a metodologia. Foram comparados resultados numéricos da temperatura do leito das laranjas com os dados experimentais apresentados por Teruel (2000), para resfriamento de leito de laranja com ar forçado. A área específica utilizada nesta validação foi de $A^* = 180 \text{ m}^2/\text{m}^3$. A Figura 4.1, mostra graficamente a comparação dos dados experimentais com os resultados numéricos obtidos na simulação do resfriamento com ar forçado, próximo à entrada do leito ($Y=0,016 \text{ m}$) usando uma malha com 20 pontos nodais. Observa-se que pequenos erros foram obtidos, sendo a média do erro relativo na ordem de $0,061 \pm 0,03^\circ\text{C}$, validando, assim, esta metodologia.

Figura 4.1: Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura da laranja na posição $Y=0,016 \text{ m}$ (Caso 1).

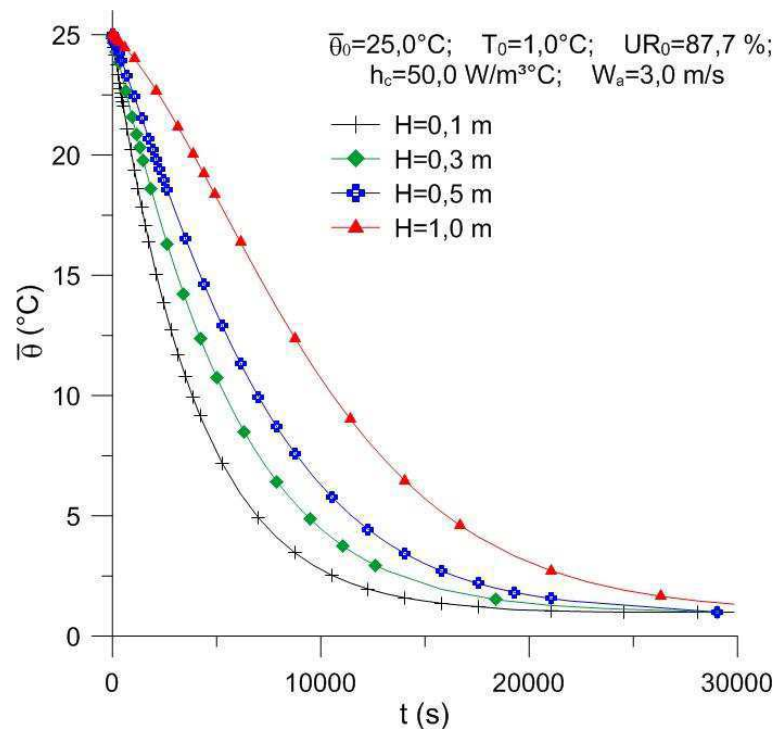


Observa-se ainda na Figura 4.1 que houve uma oscilação nos dados experimentais a partir do tempo $t=7800 \text{ s}$ ficando mais intenso próximo de $t=10000 \text{ s}$. Uma das explicações para este fato pode ser devido ao erro de leitura dos termopares usados na obtenção dos dados durante o experimento.

4.2 Efeito da altura do leito na refrigeração

No estudo do grupo B (casos 2 a 5) foram analisadas quatro distintas alturas do leito (H) e manteve-se constantes os demais parâmetros. Para cada valor de H foi feita uma simulação numérica e, dos dados obtidos, foram avaliados o efeito deste parâmetro na temperatura do produto em relação ao tempo de processo e posição da fruta dentro do leito. O efeito da altura do leito na refrigeração foi avaliado na saída do mesmo, onde, sabe-se que, quando a temperatura neste ponto entrar em equilíbrio térmico, garante-se que todo o leito também esteja em equilíbrio. A Figura 4.2 ilustra o comportamento transiente da temperatura da laranja na saída do leito.

Figura 4.2: Temperatura do produto em função do tempo para diferentes alturas do leito avaliadas em $Y=H$ (casos 2 a 5).

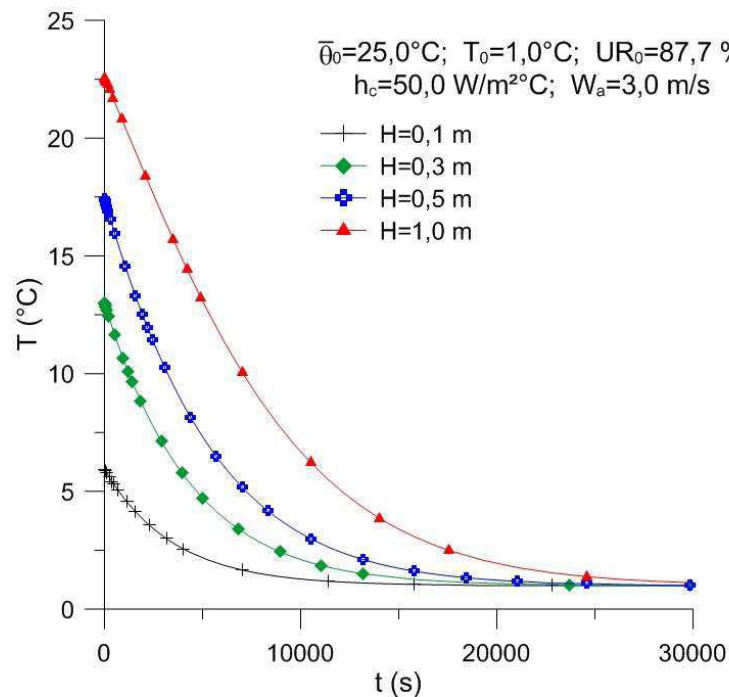


Analisando a Figura 4.2 verifica-se que, para $H=0,1$ m, ou seja, para pequenas alturas do leito há uma maior taxa de resfriamento das laranjas em função do tempo. Quando se aumenta o tamanho do leito, essa taxa diminui, aumentando o tempo de processo e fazendo com que a temperatura do produto, no final do leito, atinja o equilíbrio ($H=1,0$ m) em um maior tempo de processo. Observa-se que houve um decaimento da temperatura do produto em função do tempo, alcançando o equilíbrio térmico a partir do tempo $t=23000$ s (aproximadamente 6,9 horas) para as três

primeiras alturas ($H= 0,1; 0,3$ e $0,5$ m) e para a altura de $H=1,0$ m, o tempo onde se atingiu o equilíbrio foi superior a $t=30000$ s.

A Figura 4.3 apresenta graficamente a temperatura do ar de refrigeração na saída do leito em função do tempo para quatro valores de H (m). O ar de refrigeração, inicialmente a $T_0=1,0$ °C, entra em contato com o produto que se encontra a uma temperatura inicial de $\bar{\theta}_0=25,0$ °C onde este último cede calor para o ar de refrigeração, fazendo com que a temperatura do ar aumente, principalmente na entrada do leito.

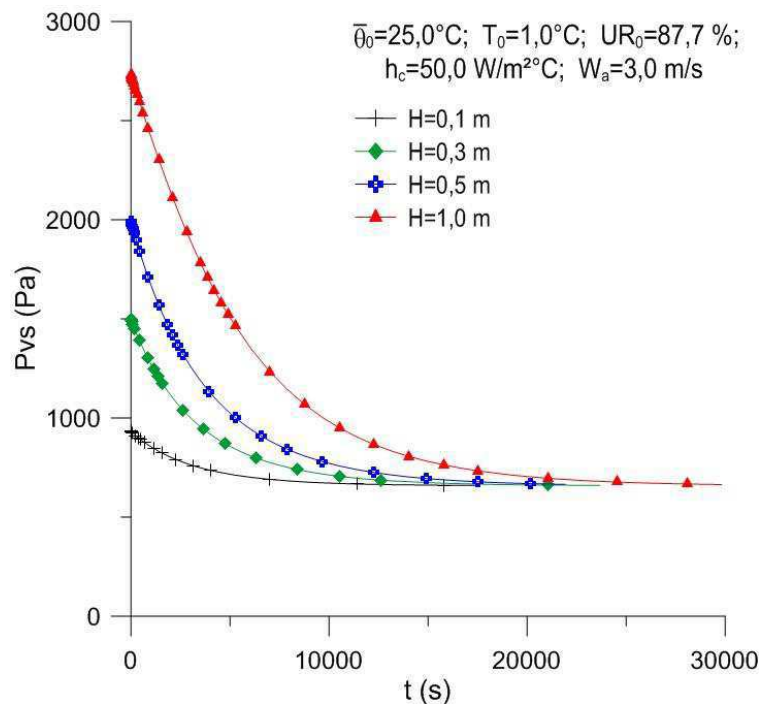
Figura 4.3: Temperatura do ar em função do tempo para diferentes alturas do leito avaliadas em $Y=H$ (casos 2 a 5).



Observa-se ainda na Figura 4.3 que, quanto menor for a altura do leito maior é a variação de temperatura entre os tempo inicial e final do processo. Para $H=1,0$ m, a temperatura do ar no início do processo é de aproximadamente $T= 22,5$ °C e com o avanço do tempo, essa temperatura decai até o ar entrar em equilíbrio a partir de $t= 29000$ s. Diminuindo H , a variação de temperatura do ar na saída do leito, no início do processo, também é menor, aumentando a eficiência da troca térmica entre o produto e o ar, proporcionando a fruta entrar em equilíbrio térmico mais rápido.

No processo de resfriamento, quando há um decréscimo da temperatura (T) deste, há também um decréscimo em sua pressão de vapor (P_{vs}). A Figura 4.4, mostra um gráfico de P_{vs} (P_a) em função do tempo de processo (t) na saída do leito. Observa-se que no início do mesmo, P_{vs} é maior que no final do processo. Isso se deve ao fato de que, no início do processo, as laranjas transferem calor para o ar que atravessa o leito, aquecendo-o com o tempo, fazendo com que a temperatura das laranjas diminua, até atingir o equilíbrio térmico com o ar. Com uma temperatura mais elevada, o ar tem pressão de vapor mais alta. Esse fato é visivelmente maior quando a altura do leito é maior ($H=1,0$ m). Os três valores seguintes de $H= 0,1; 0,3$ e $0,5$ m, respectivamente, mostram que há uma variação significativa entre si, comprovando uma refrigeração mais eficiente para alturas do leito menores, pois atinge o equilíbrio término mais rapidamente, consumindo um menor tempo de processo.

Figura 4.4: Pressão de vapor no ar em função do tempo para diferentes alturas do leito avaliadas em $Y=H$ (casos 2 a 5).

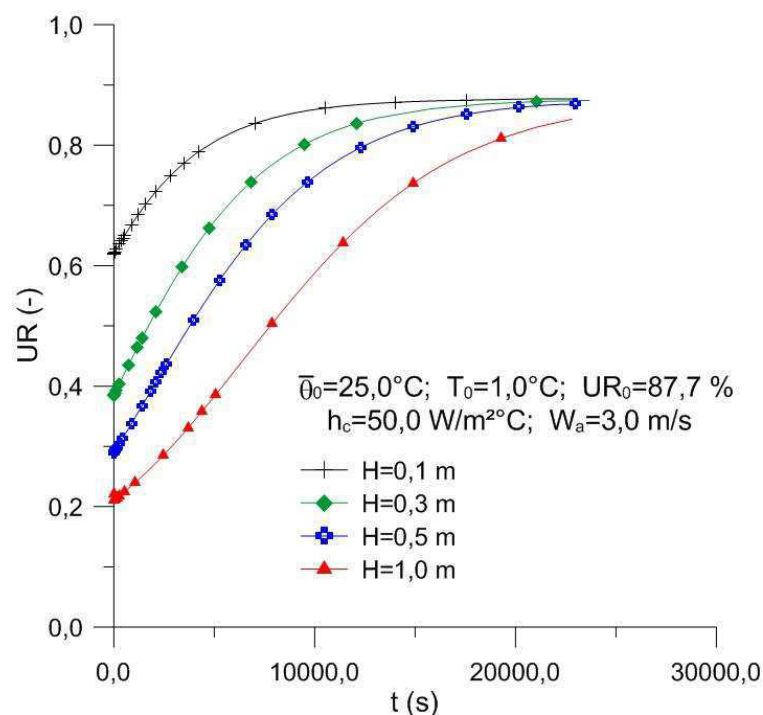


De acordo com os processos psicrométricos, tanto no resfriamento sensível quanto no aquecimento sensível, sempre que há mudança no estado do ar, neste caso, na variação de sua temperatura, as demais propriedades do ar também sofrem alterações, com exceção da razão de mistura que permanece constante para estes

casos. Observou-se nas Figuras anteriores (4.2, 4.3 e 4.4) que, quanto maior for a altura do leito, maior será a variação de temperatura e pressão do mesmo.

Diante disto, quanto menor for a altura do leito de laranjas na refrigeração menor será a variação da umidade relativa do processo. Quando se aumenta H , a variação de temperatura do ar entre o início e o final do processo aumenta fazendo com que a variação da umidade relativa também aumente, como ilustra a Figura 4.5. Essa variação na umidade relativa no processo que refrigeração não é interessante, pois pode causar perda de massa (ressecamento superficial do flavedo da laranja). Porém, o tempo com que este fenômeno acontece é pequeno. Para $H=1,0$ m, o tempo de processo não ultrapassa de $t=35000$ s (9,7 horas) para a umidade relativa atingir a faixa aceitável descrita pela literatura que é de, no mínimo, $UR=0,85$. Os outros três valores simulados para H apresentam esse fenômeno de uma forma mais suave.

Figura 4.5: Umidade relativa em função do tempo para diferentes alturas do leito avaliadas em $Y=H$ (casos 2 a 5).

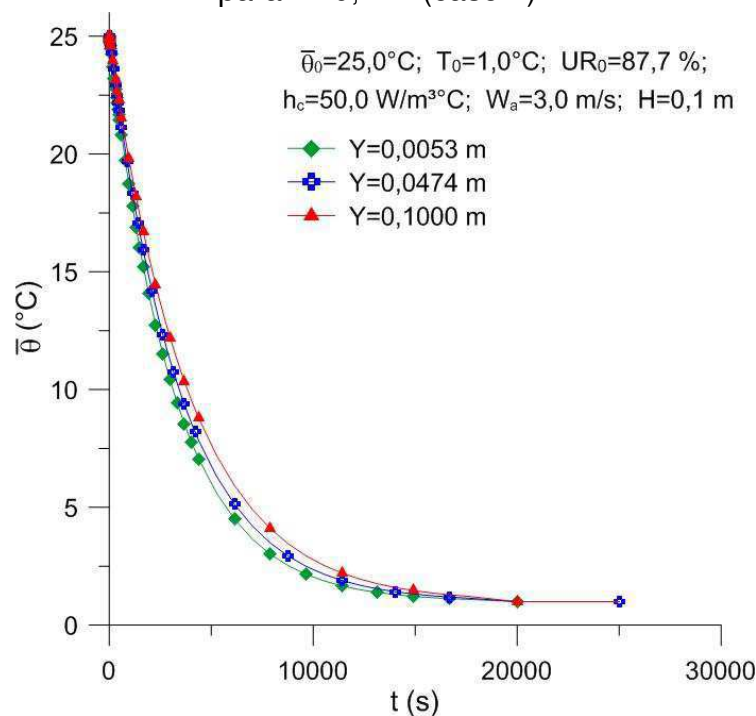


Como foi realizado uma simulação para cada valor da altura do leito, pôde-se analisar o comportamento do mesmo ao longo de todo o leito, estudando as variações das propriedades em função do tempo e dentro do leito de forma individual. Portanto,

foi plotado gráficos mostrando o comportamento dos parâmetros no início do leito ($Y=0,0053$ m), no meio ($Y=0,0474$ m) e no final ($Y=0,1$ m) para o caso 2.

A Figura 4.6 ilustra o gráfico da temperatura do produto em função do tempo de processo no início, meio e fim do leito para a altura de $H=0,1$ m. Percebe-se que há uma diferença de temperatura muito pequena entre o início e o fim do leito, assim tem-se um processo de refrigeração mais uniforme.

Figura 4.6: Temperatura do produto em função do tempo, em três posições no leito para $H=0,1$ m (caso 2).



A Figura 4.7 ilustra o comportamento da temperatura do ar dentro do leito em função do tempo de resfriamento.

Pode-se observar que, a diferença de temperatura entre o início e o final do leito não é alta e entra em regime permanente mais rápido no tempo de aproximadamente $t=13000$ s (3,6 h) para o ponto $Y=0,1$ m. Há também uma pequena variação tanto no gráfico da pressão de vapor (Figura 4.8) quanto no gráfico da umidade relativa em função do tempo (Figura 4.9), mesmo assim, as imagens apresentam uma variação temporal de seus parâmetros nos primeiros instantes do processo. Essas baixas variações podem ser facilmente explicadas pela pequena altura do leito. Considerando uma laranja com diâmetro de 0,08 m (em média) ao longo do eixo Y,

só comporta apenas uma unidade do produto nesta altura ($H=0,1$ m). Facilitando, assim, o resfriamento do leito de laranjas valência.

Figura 4.7: Temperatura do ar em função do tempo, em três posições no leito para $H=0,1$ m (caso 2).

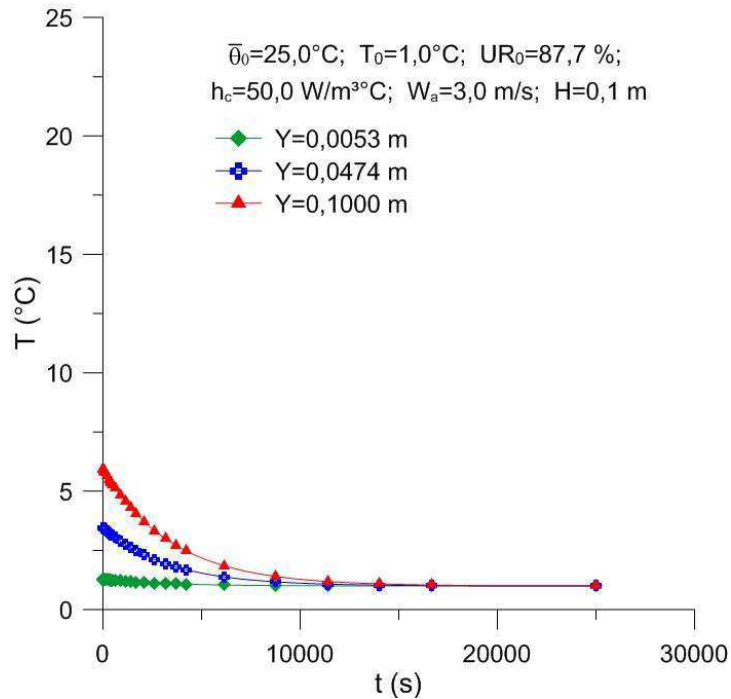
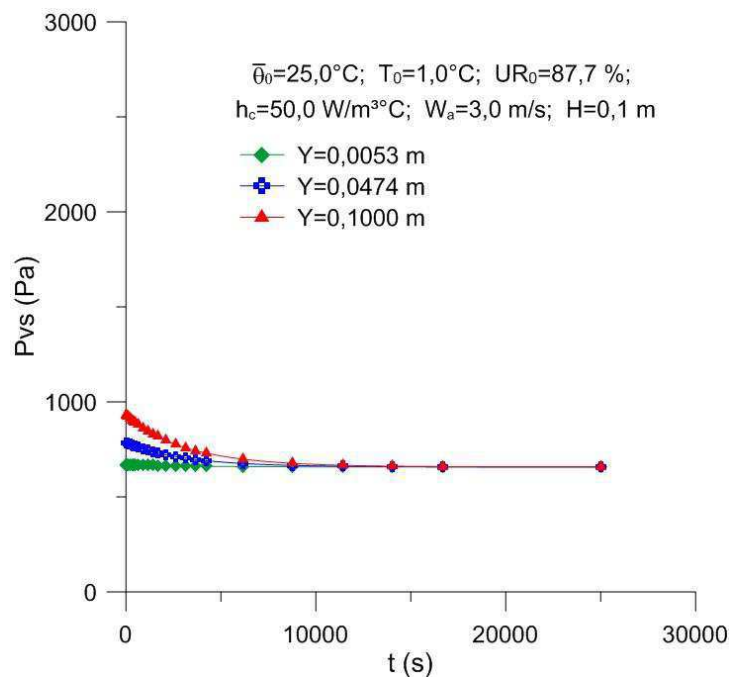
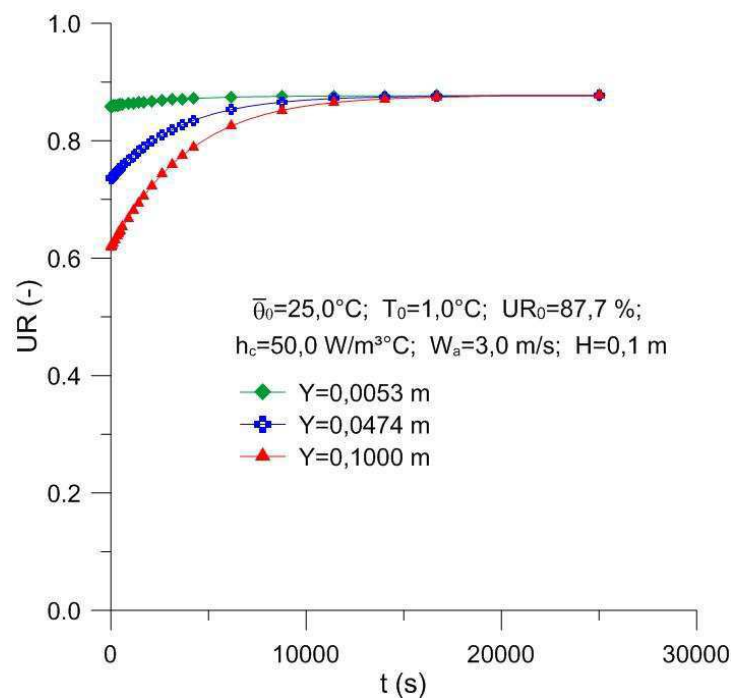


Figura 4.8: Pressão de vapor do ar em função do tempo de processo em três posições de altura no leito para $H=0,1$ m (caso 2).



A Figura 4.10 mostra a variação da temperatura da laranja dentro do leito, onde se observa que, no tempo inicial a temperatura é constante. Os dois tempos posteriores são os que apresentam os maiores gradientes. Em seguida, nos três últimos tempos, o gradiente diminui e não há mais gradientes de temperatura, pois o sistema já entrou em equilíbrio. O tempo total do processo não ultrapassou de $t=17543,9$ s (4,9 h).

Figura 4.9: Umidade relativa do ar em função do tempo de processo em três posição de altura do leito para $H=0,1$ m (caso 2).



Uma análise para a temperatura do ar de refrigeração, observada pela Figura 4.11, permite verificar pequenas variações da temperatura entre o início e o fim do leito. Os maiores gradientes de temperaturas ocorrem nos primeiros instantes de tempo do processo. A mesma análise pode ser feita para as Figuras 4.12 e 4.13, que mostram os gráficos da pressão de vapor e da umidade relativa do ar de refrigeração, respectivamente, para uma altura do leito de $H=0,1$ m.

Figura 4.10: Temperatura da laranja dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,1$ m (caso 2).

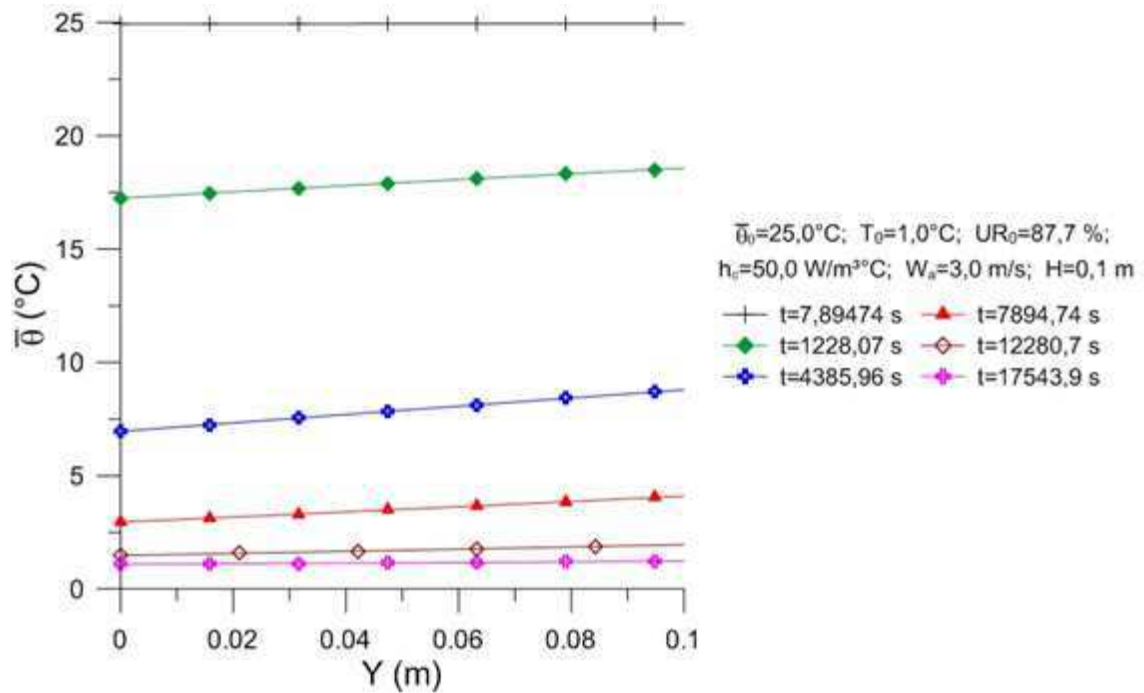


Figura 4.11: Temperatura do ar de refrigeração dentro do leito em seis tempos de refrigeração $H=0,1$ m (caso 2).

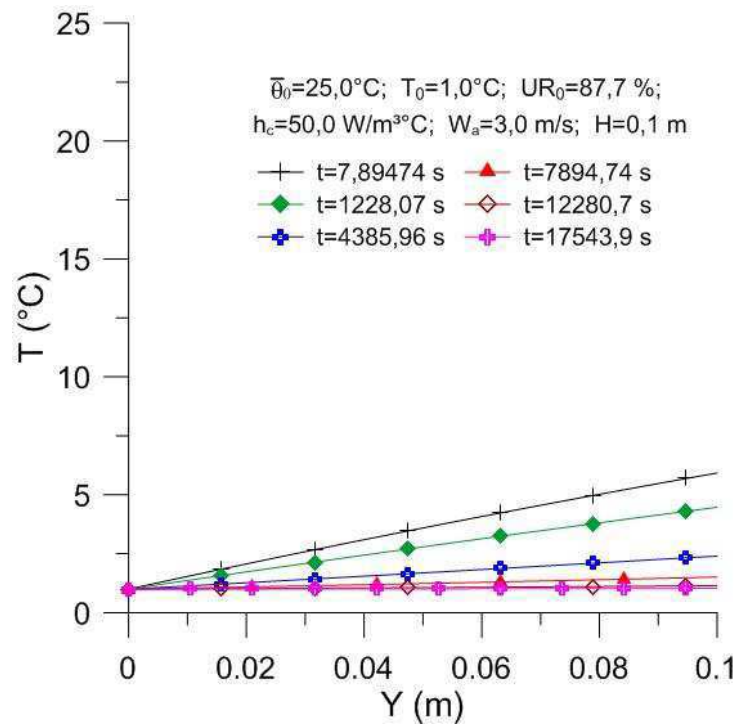


Figura 4.12: Pressão de vapor do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,1$ m (caso 2).

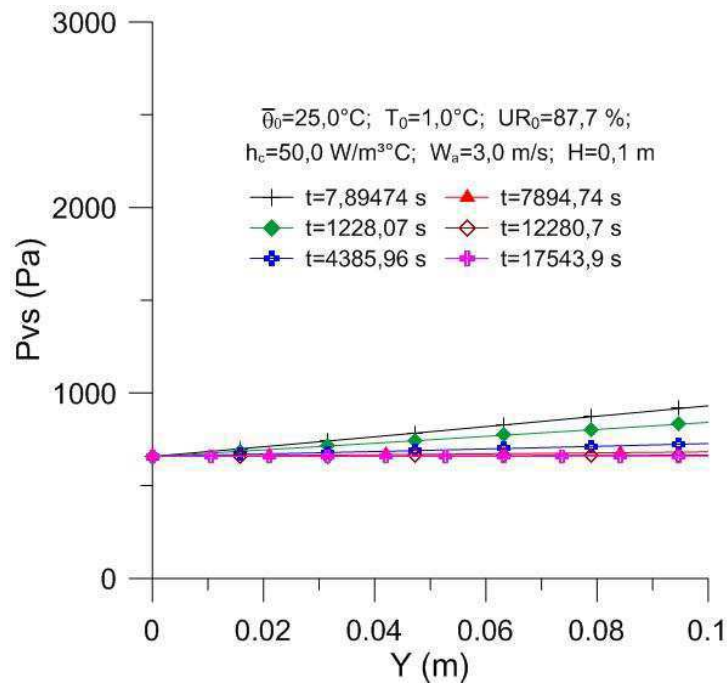
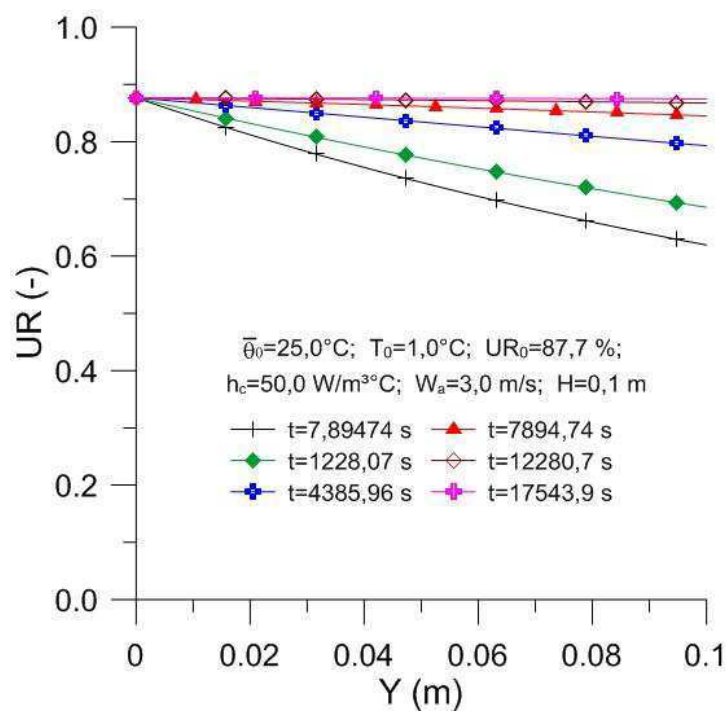


Figura 4.13: Umidade relativa do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,1$ m (caso 2).



As demais alturas estudadas foram três: $H=0,3$ m; $H=0,5$ m e $H=1,0$ m. Para cada um desses valores observou-se que quanto maior for o leito, maior será o gradiente de temperatura do produto em função do tempo, como se observa nas Figuras 4.14, 4.22 e 4.30. Ao observar-se a temperatura do produto dentro do leito, Figuras 4.18, 4.26 e 4.34, verifica-se que, quando o valor de H aumenta as inclinações das linhas dos gráficos também aumentam, conseqüentemente o seu gradiente de temperatura do produto, respectivamente. Em relação à temperatura do ar de refrigeração em função do tempo (Figuras 4.15, 4.23 e 4.31) e em função da posição dentro do leito (Figuras 4.19, 4.27 e 4.35) que quanto maior a altura do leito, mais calor é transferido para o ar de refrigeração pelo produto, aumentando assim, a diferença de temperatura entre o início e o fim do leito. Ao observar-se o último ponto nodal dos três gráficos se vê claramente esse aumento nos primeiros instantes de tempo de processo. Uma análise semelhante pode ser feita para os demais parâmetros $Pvs \times t$ (Figuras 4.16, 4.24 e 4.32), $Pvs \times Y$ (4.20, 4.28 e 4.36), $UR \times t$ (Figuras 4.17, 4.25 e 4.33) e $UR \times Y$ (Figuras 4.21, 4.29 e 4.37), respectivamente. Observa-se ainda que, quando se aumenta a altura do leito, aumenta-se o tempo de processo e conseqüentemente, diminui-se a eficiência do sistema.

Figura 4.14: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito para $H=0,3$ m (caso 3).

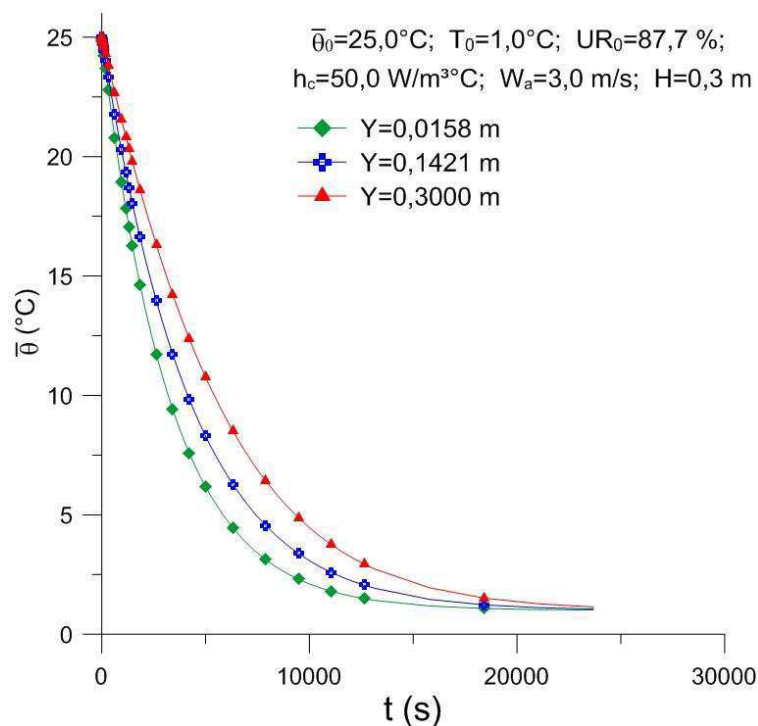


Figura 4.15: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito, para $H=0,3$ m (caso 3).

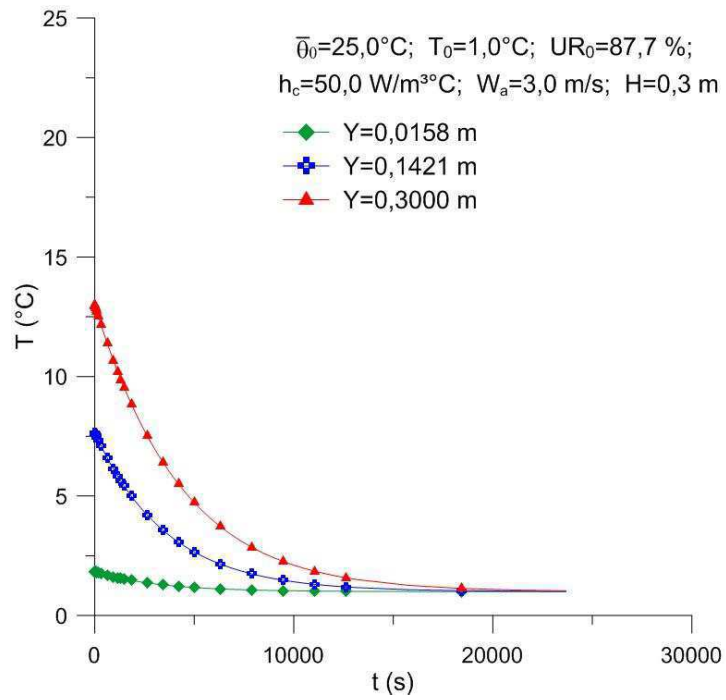


Figura 4.16: Pressão de vapor do ar em função do tempo em três posições do leito, para $H=0,3$ m (caso 3).

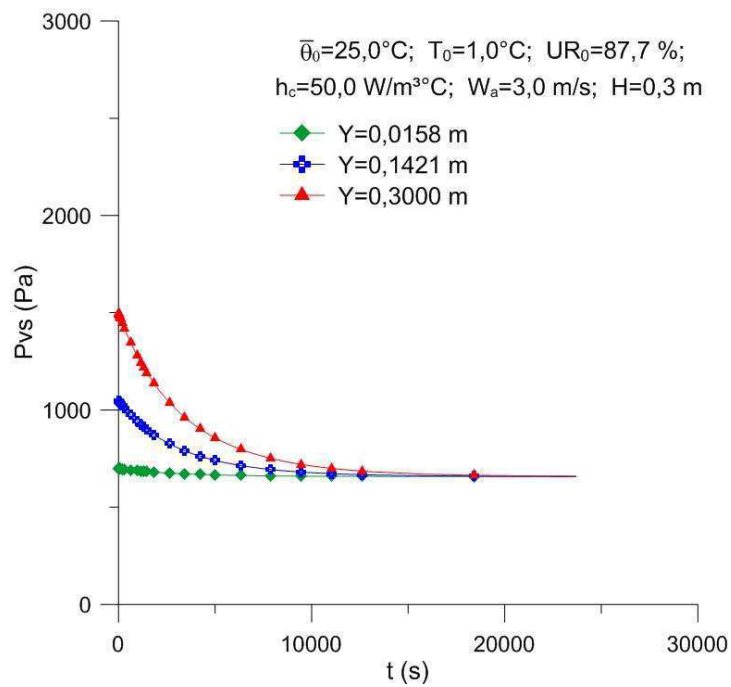


Figura 4.17: Umidade relativa do ar em função do tempo em três posições do leito, para $H=0,3$ m (caso3).

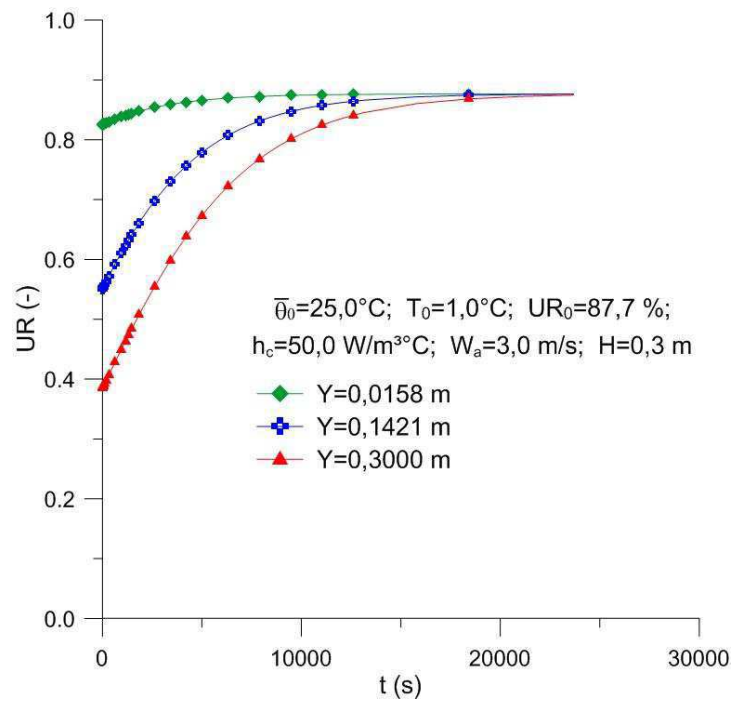


Figura 4.18: Temperatura da laranja dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,3$ m (caso 3).

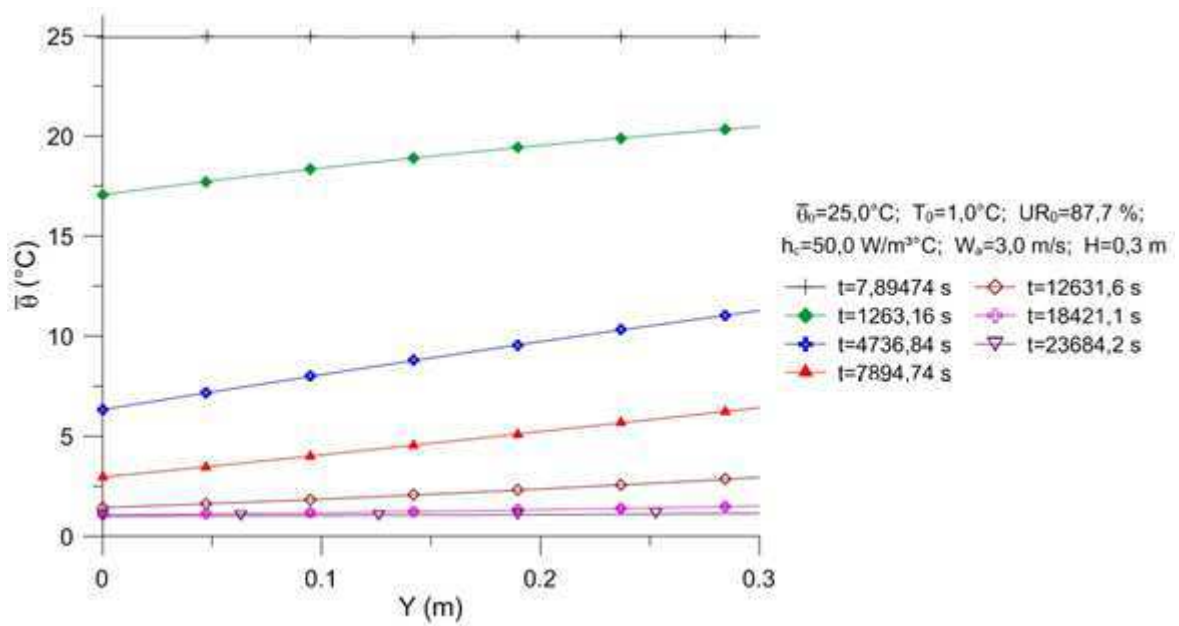


Figura 4.19: Temperatura do ar de refrigeração dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,3$ m (caso 3).

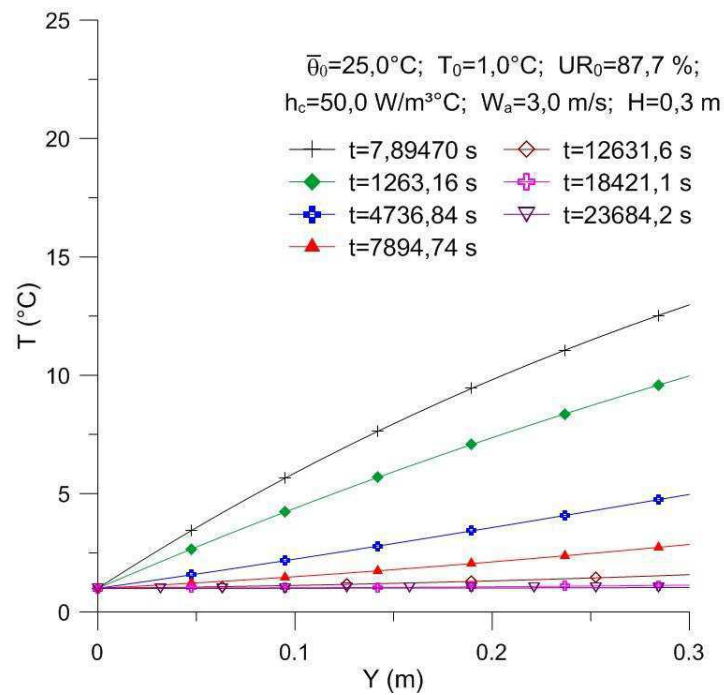


Figura 4.20: Pressão de vapor do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,3$ m (caso3).

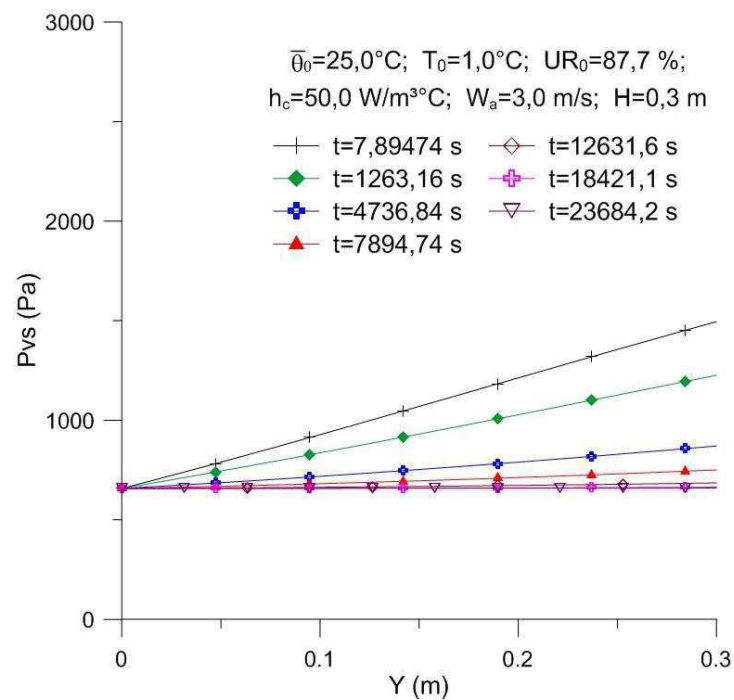


Figura 4.21: Umidade relativa do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $H=0,3$ m (caso 3).

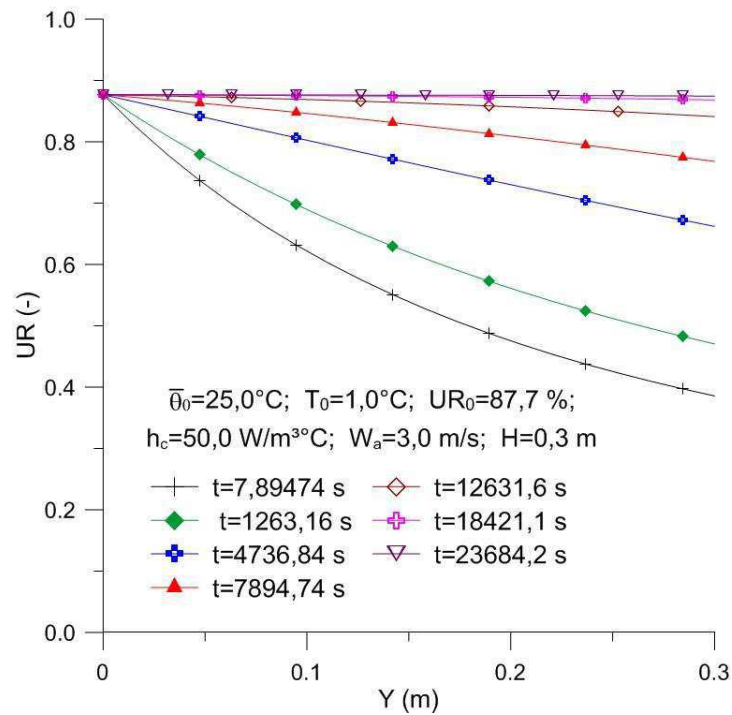


Figura 4.22: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito para $H=0,5$ m (caso 4).

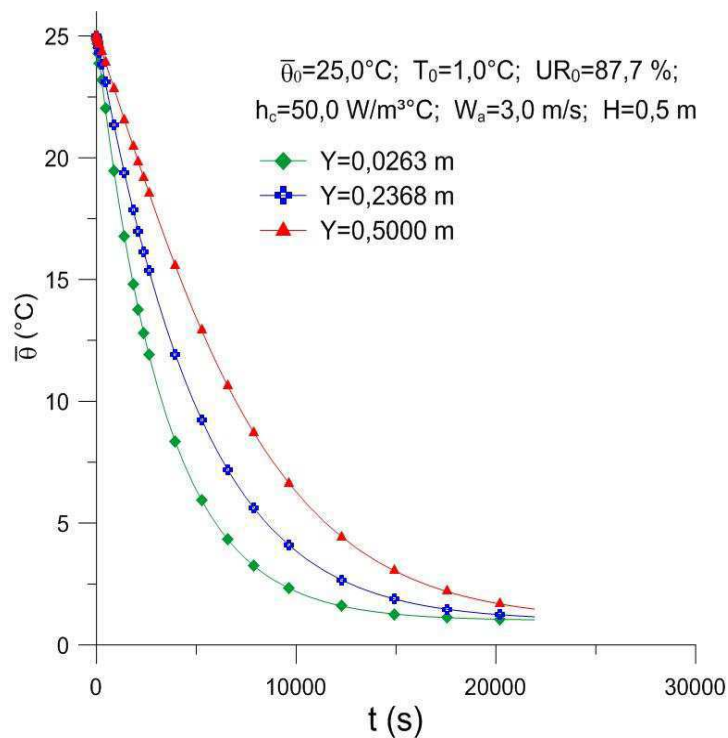


Figura 4.23: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito para $H=0,5$ m (caso 4).

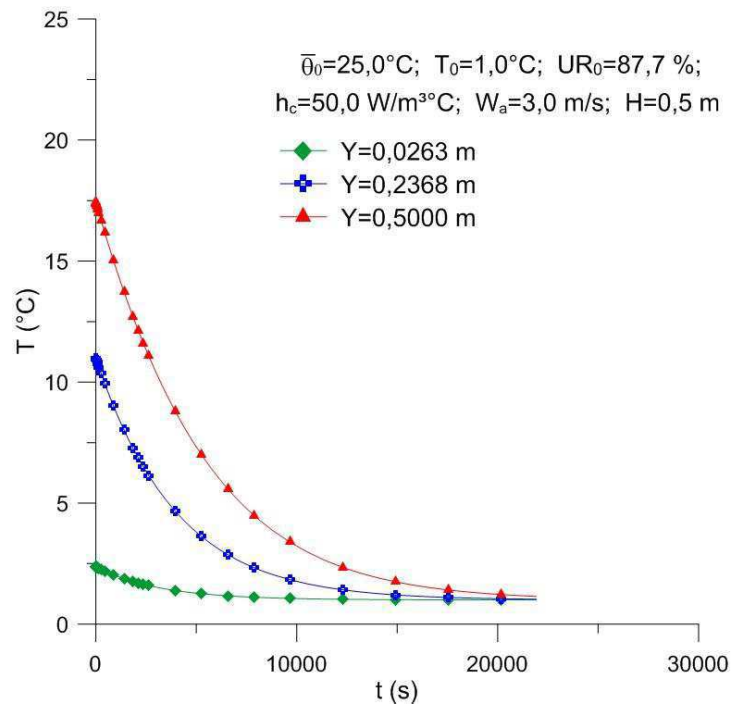


Figura 4.24: Pressão de vapor em função do tempo em três posições do leito para $H=0,5$ m (caso 4).

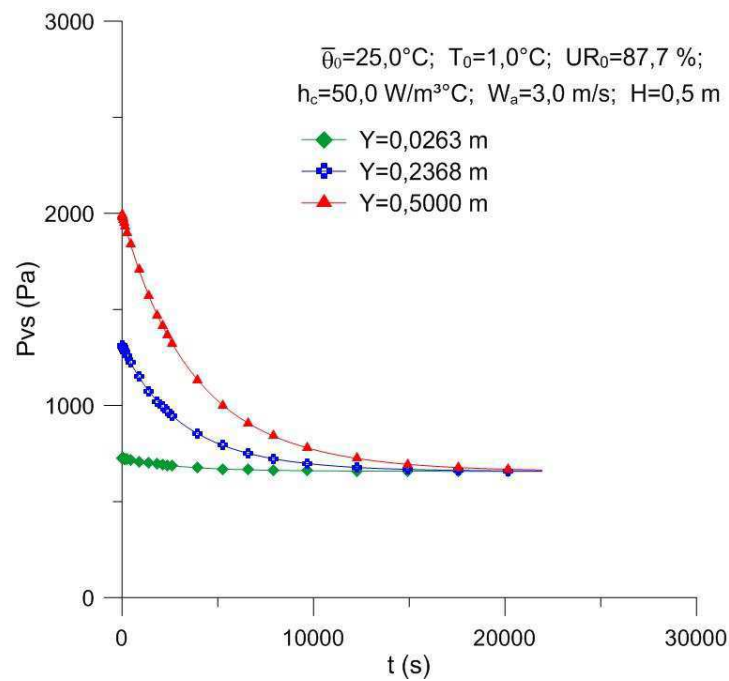


Figura 4.25: Umidade relativa do ar em função do tempo variando a posição do leito para $H=0,5$ m (caso 4).

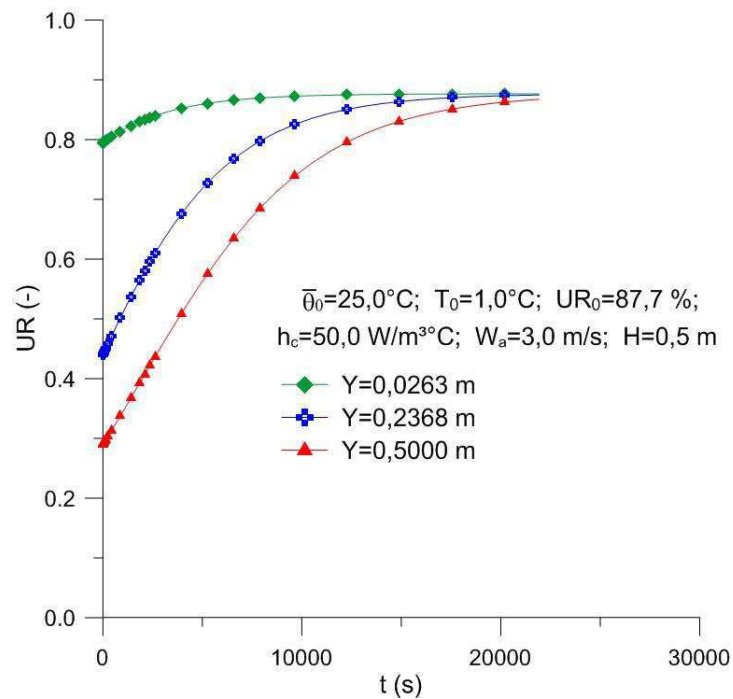


Figura 4.26: Temperatura da laranja dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $H=0,5$ m (caso 4).

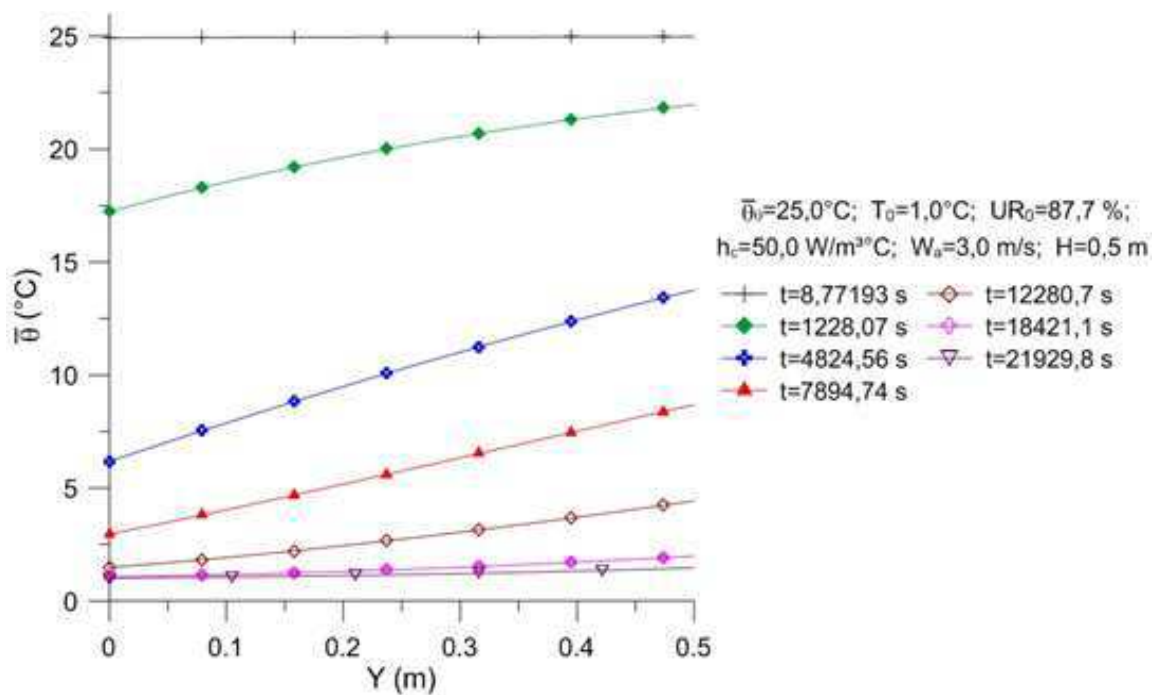


Figura 4.27: Temperatura do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $H=0,5$ m (caso 4).

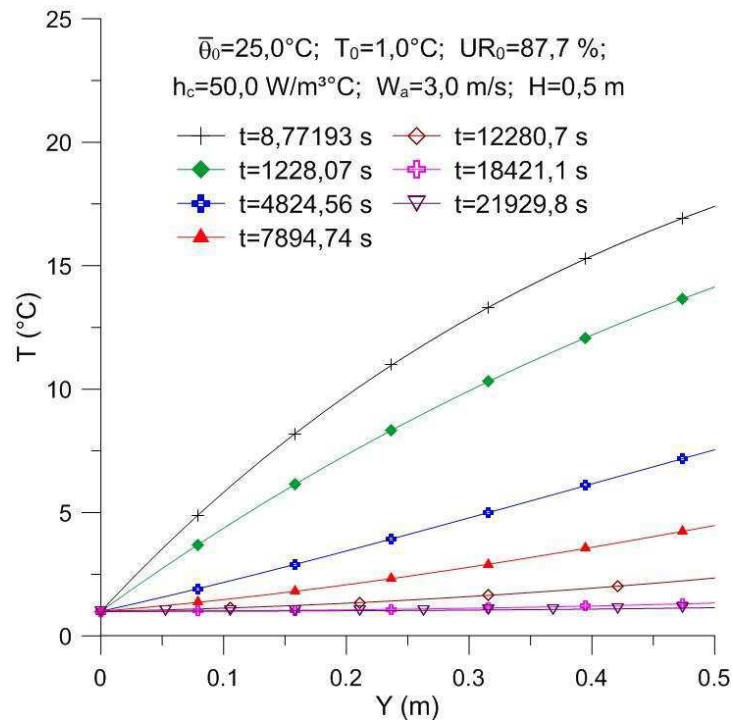


Figura 4.28: Pressão de vapor dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $H=0,5$ m (caso 4).

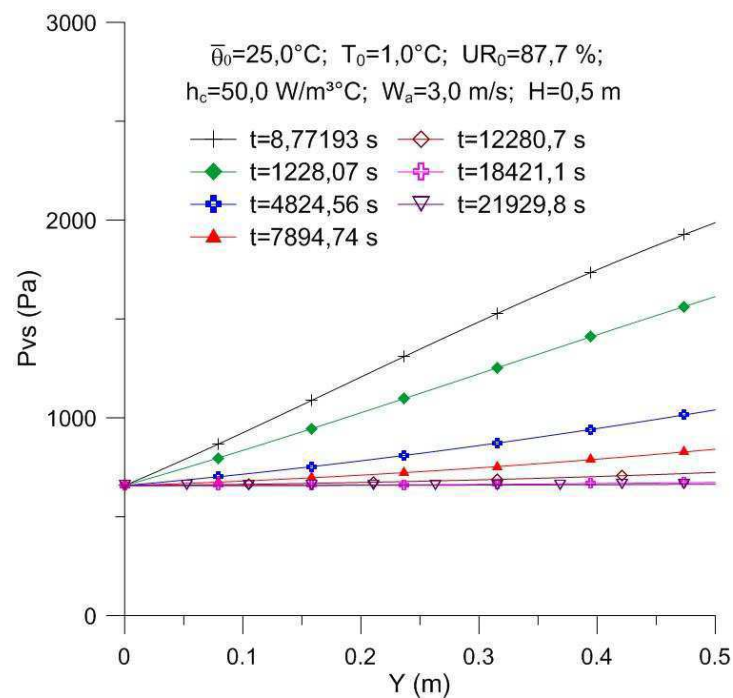


Figura 4.29: Umidade relativa do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $H=0,5$ m (caso 4).

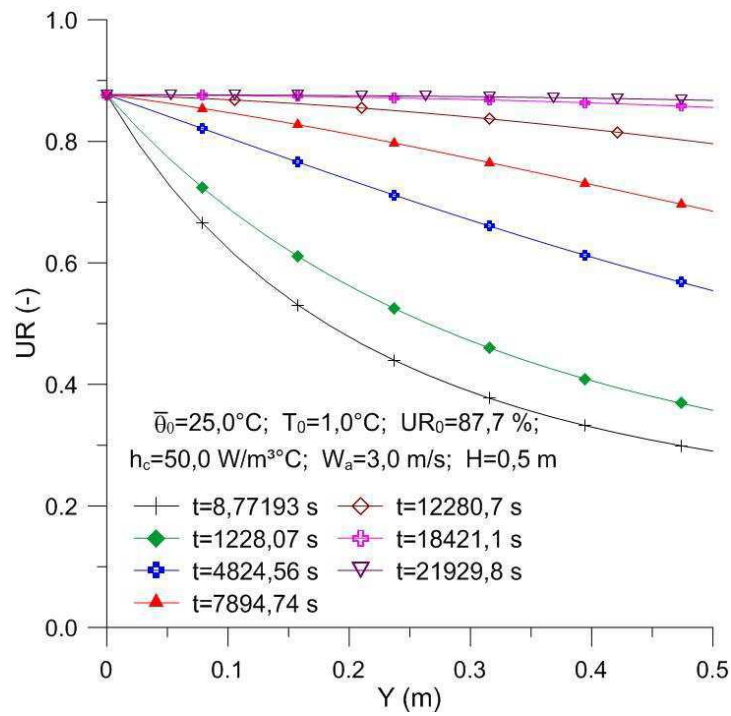


Figura 4.30: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito para $H=1,0$ m (caso 5).

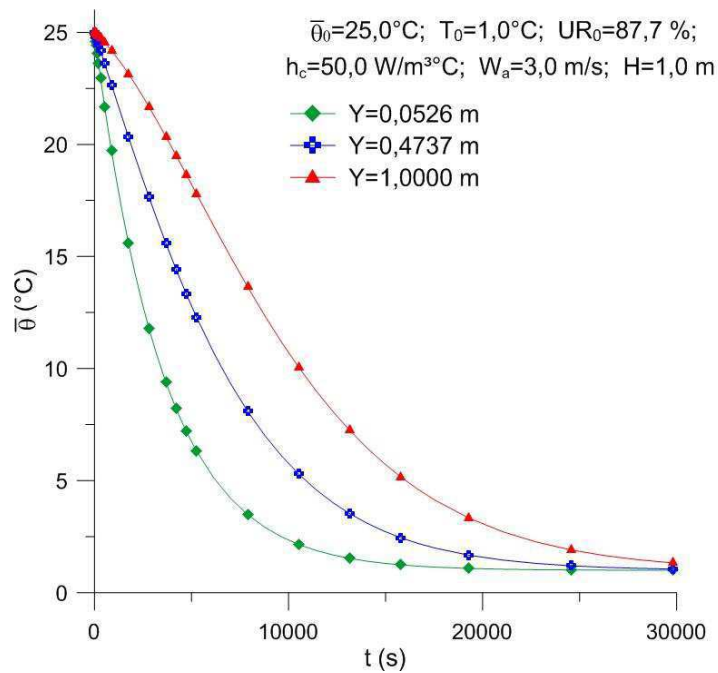


Figura 4.31: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito para $H=1,0$ m (caso 5).

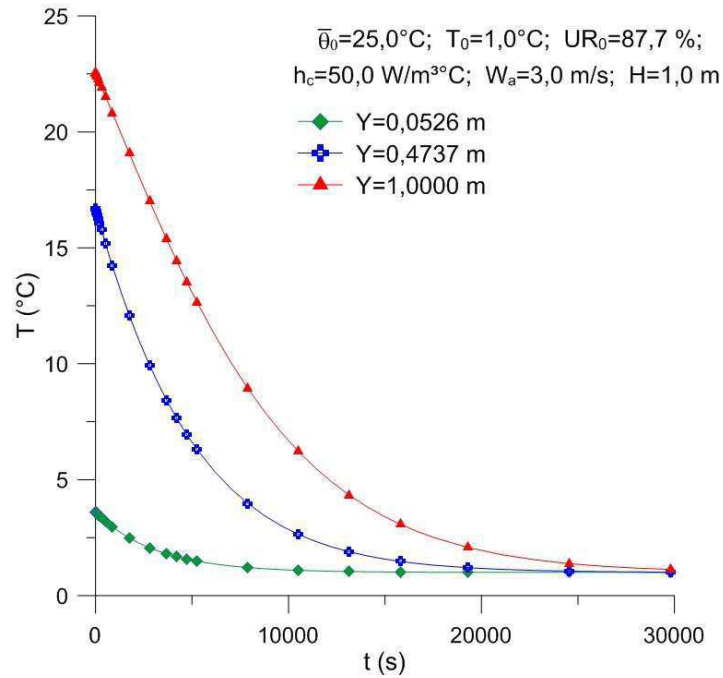


Figura 4.32: Pressão de vapor do ar em função do tempo em três posições do leito para $H=1,0$ m (caso 5).

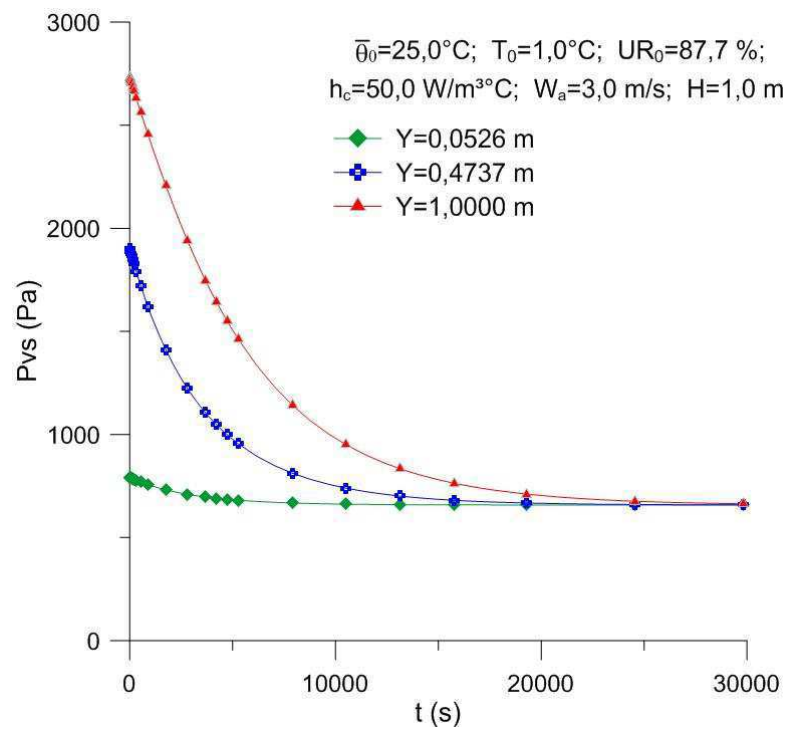


Figura 4.33: Umidade relativa do ar em função do tempo em três posições do leito para $H=1,0$ m (caso 5).

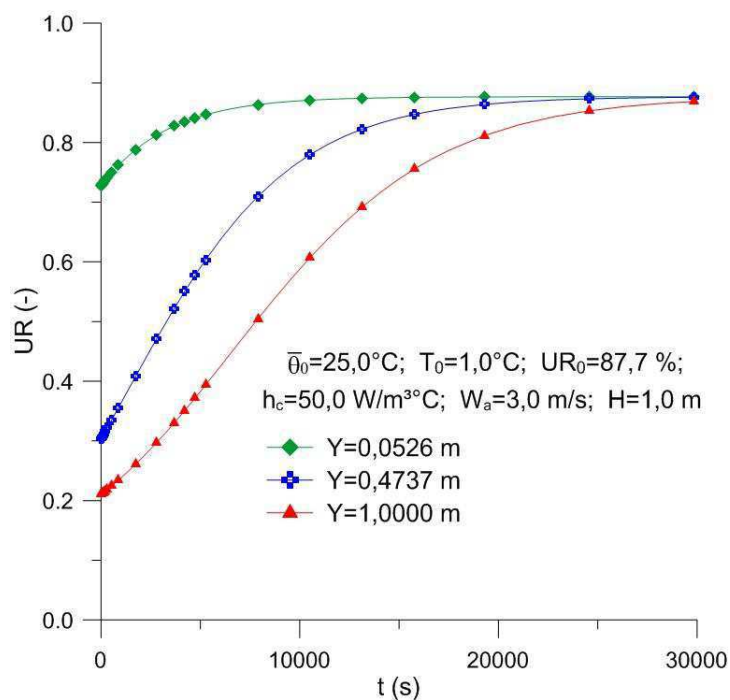


Figura 4.34: Temperatura da laranja dentro do leito em oito tempos de refrigeração para $H=1,0$ m (caso 5).

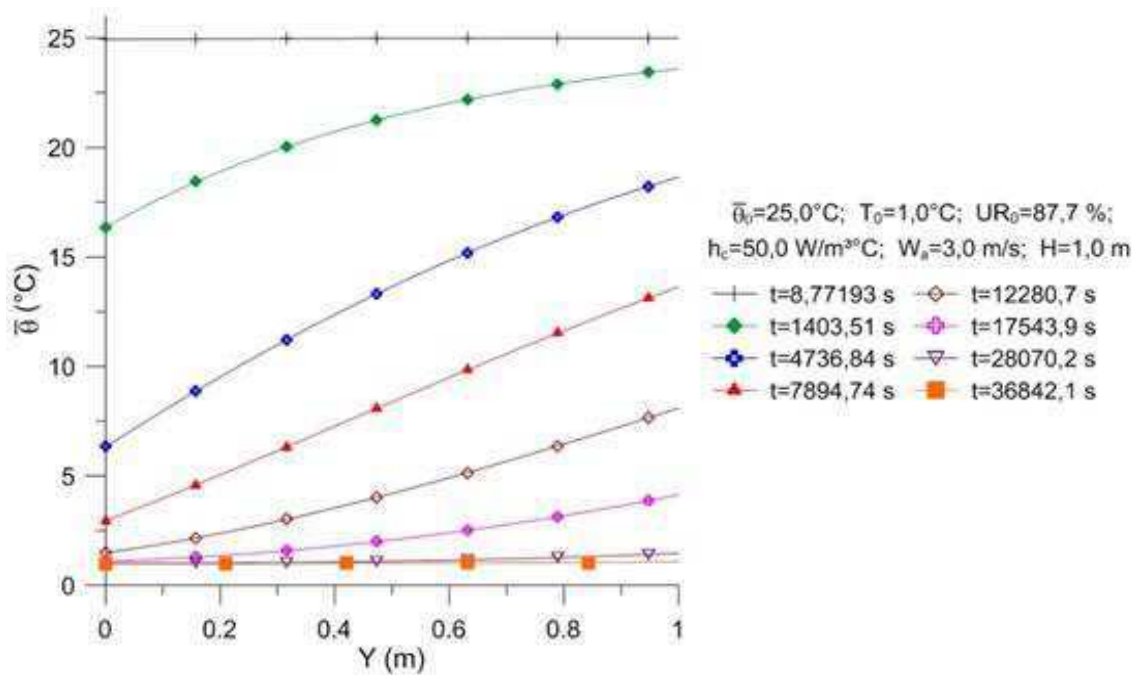


Figura 4.35: Temperatura do ar dentro do leito em oito tempos de refrigeração para $H=1,0$ m (caso 5).

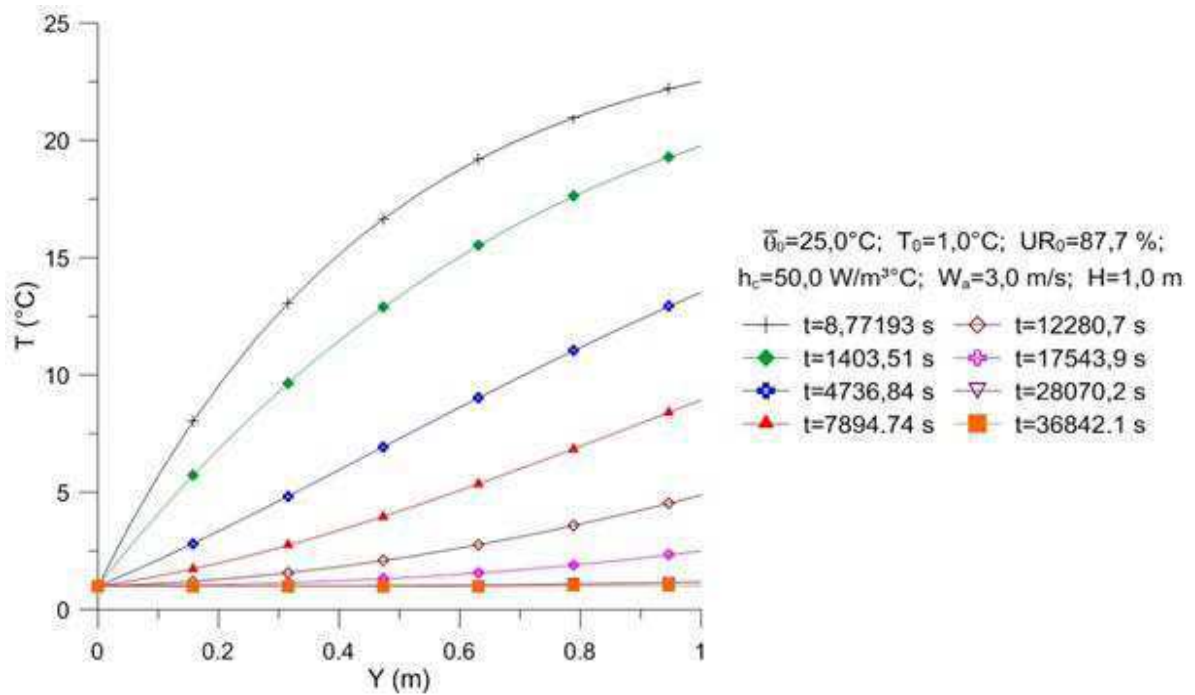


Figura 4.36: Pressão de vapor do ar dentro do leito em oito tempos de refrigeração para $H=1,0$ m (caso 5).

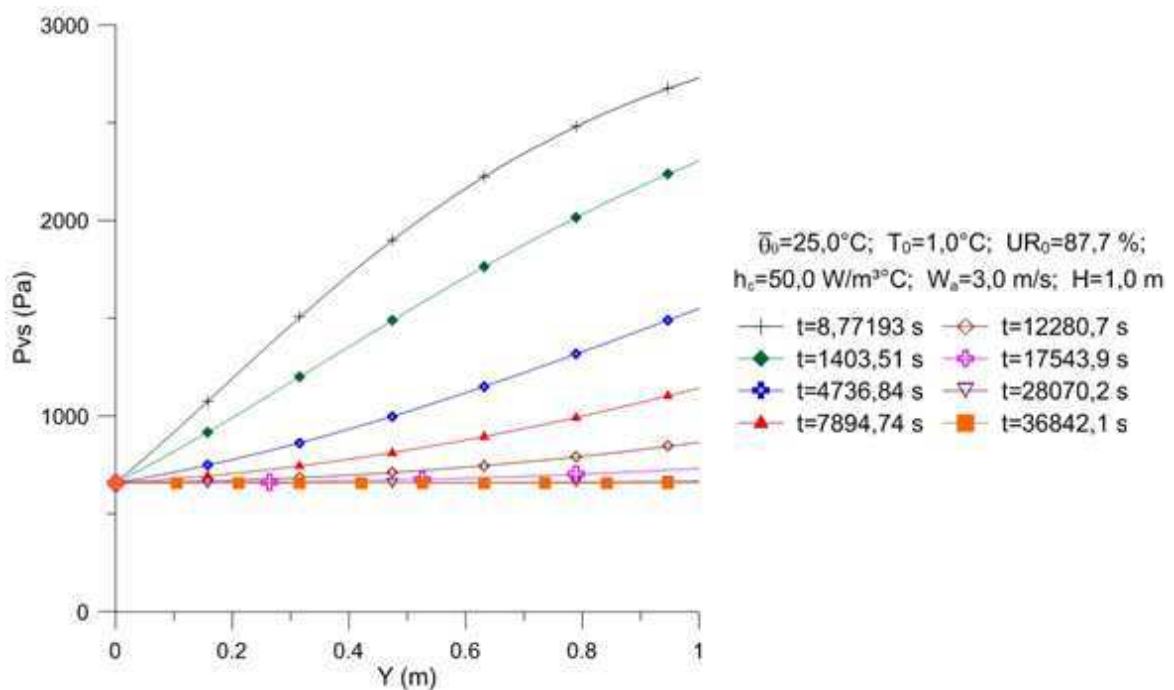
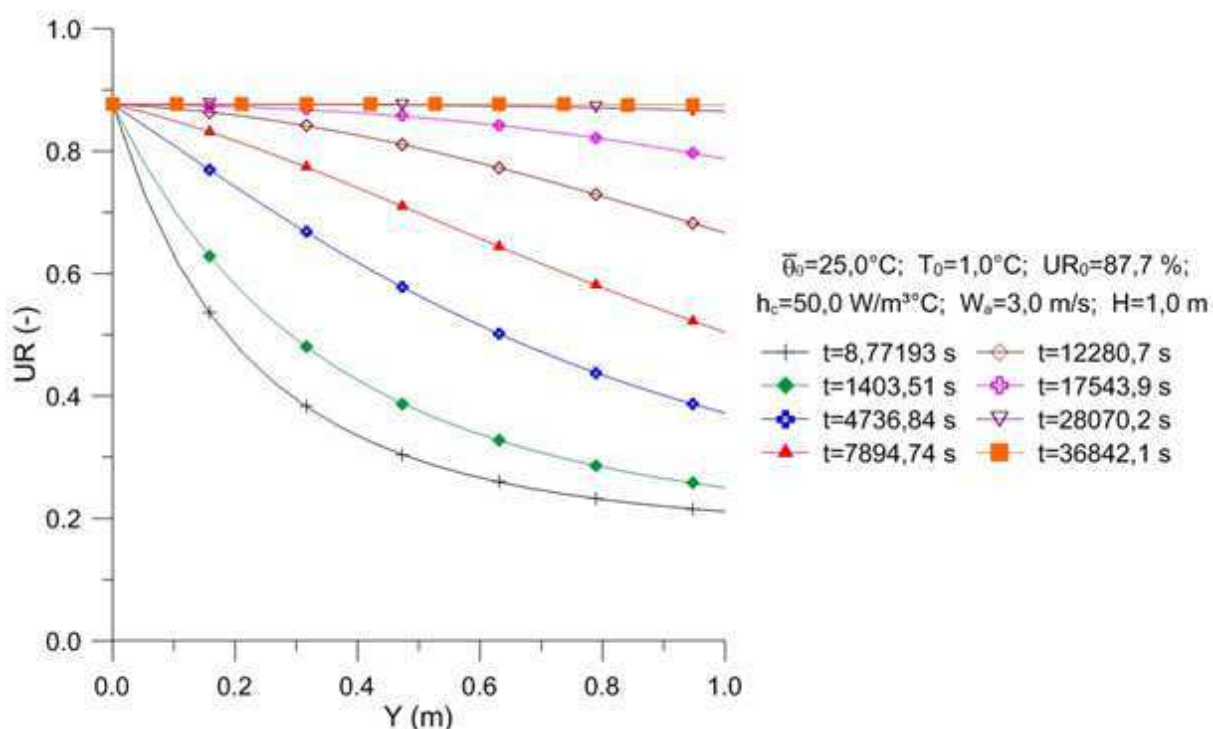


Figura 4.37: Umidade relativa do ar dentro do leito em oito tempos de refrigeração para $H=1,0$ m (caso 5).



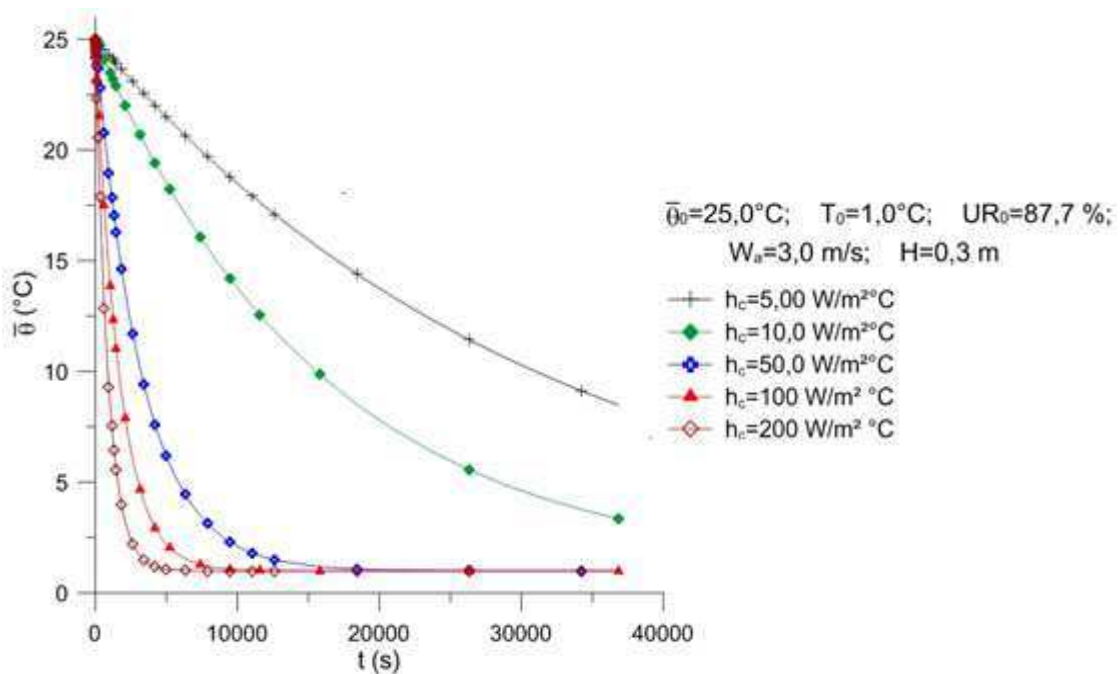
4.3 Efeito do coeficiente de transferência de calor convectivo na refrigeração

No grupo C (casos 6 a 10) variou-se o coeficiente de transferência de calor convectivo e os demais parâmetros permaneceram constantes. Para esta análise, foram feitas cinco simulações, cada uma com um valor de h_c diferente. Desta forma, pode-se avaliar o efeito deste no processo de refrigeração. A Figura 4.38 mostra o gráfico da temperatura da laranja em função do tempo de processo para as cinco simulações. Observa-se que, para $h_c=5,00\text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ e $h_c=10,0\text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ as curvas geradas caracterizam uma refrigeração lenta como numa convecção natural, realizada em refrigeração em câmaras frias como mostra a Figura 2.3 e/ou em refrigeradores comerciais. Observa-se também que o tempo final de processo foi maior que $t=40.000\text{s}$ (11 horas).

Já com $h_c=50,0\text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, a curva de resfriamento assemelha-se aquela descrita por Teruel (2000), para resfriamento rápido por ar forçado, onde a temperatura do produto começou a entrar em equilíbrio em aproximadamente $t=15.000\text{ s}$ (4 horas),

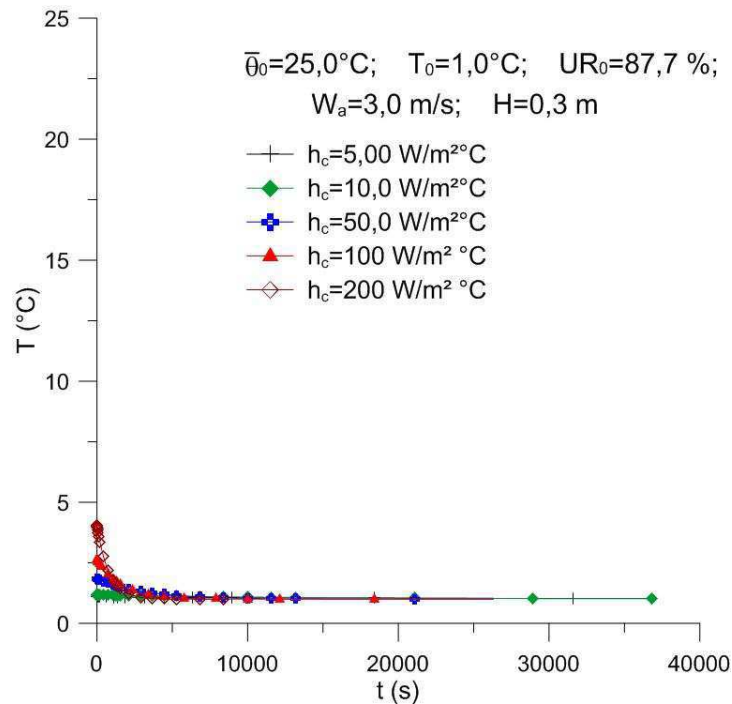
média do tempo mostrado na literatura e ilustrado pela Figura 2.3. Ainda de acordo com a Figura 4.38, com o uso de coeficientes de transferência de calor convectivo igual a $100 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ou $200 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, tem-se duas curvas que descrevem o perfil de temperatura de laranja resfriada por água gelada como mostrado em Teruel et al. (2003), iniciando seu equilíbrio térmico a partir de $t=7.500 \text{ s}$ (2 horas). Observa-se que a variação deste parâmetro influencia diretamente no perfil de refrigeração do produto, obtendo excelentes resultados quando comparados com os da literatura consultada.

Figura 4.38: Temperatura do produto em função do tempo para diferentes coeficientes de transferência de calor convectivo, na posição $Y=0,016 \text{ m}$ (casos 6 a 10).



A Figura 4.39 mostra graficamente a variação da temperatura do ar de refrigeração em função do tempo, para diferentes valores do coeficiente de transferência de calor convectivo. Observa-se nesta ilustração que, quanto menor for o valor de h_c , menor é a diferença de temperatura do ar entre o início e o término do processo obtendo uma troca térmica lenta e ineficiente. Aumentando os valores de h_c , essa diferença de temperatura aumenta e a eficiência do processo aumenta em conjunto com a troca térmica entre o leito de laranja e o ar de refrigeração.

Figura 4.39: Temperatura do ar em função do tempo para diferentes coeficientes de transferência de calor convectivo, na posição $Y=0,016$ m (casos 6 a 10).



Variando os coeficientes de transferência de calor convectivo, observou-se que a pressão de vapor do ar (Figura 4.40) e umidade relativa do ar (Figura 4.41) também variam, ou seja, quanto maior o valor de h_c , maior é a diferença da pressão de vapor e da umidade relativa entre o início e o término do processo. Sabe-se que tecnologicamente este fato não é desejável, uma vez que pode trazer danos na qualidade do produto, mas, como o tempo de permanência do produto no processo é curto, não há como caracterizar esse dano.

A velocidade do ar de refrigeração foi mantida constante com o valor de $W_a = 3,0$ m/s. Observa-se na Figura 4.41 que, para o valor mais baixo de h_c ($5,00$ W/m 2 °C), a umidade relativa do ar visualmente não foi alterado. Quando se aumentou os valores os h_c , a umidade relativa do ar também aumentou e a diferença entre este parâmetro o tempo inicial e o tempo final também aumentou.

Figura 4.40: Pressão de vapor do ar em função do tempo para diferentes coeficientes de transferência de calor convectivo, na posição $Y=0,016$ m (casos 6 a 10).

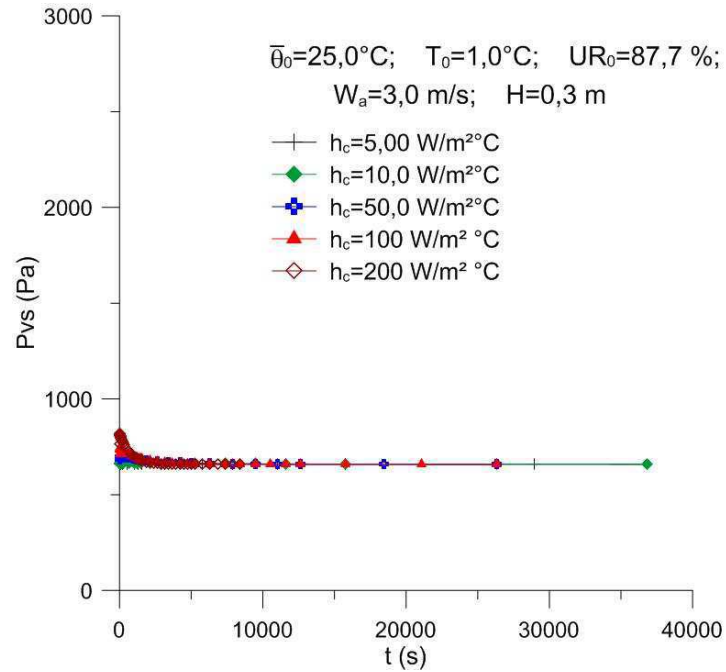
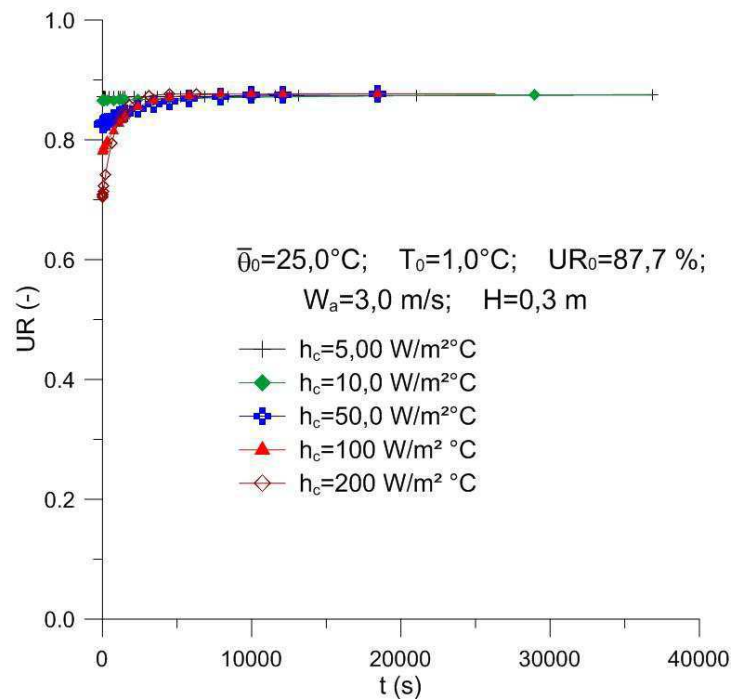


Figura 4.41: Umidade relativa do ar em função do tempo para diferentes coeficientes de transferência de calor convectivo, na posição $Y=0,016$ m (casos 6 a 10).



Para o grupo C (casos 6 a 10), também foram plotados gráficos para cada valor do coeficiente de transferência de calor convectivo, estudado a fim de se avaliar o comportamento de cada parâmetro no tempo e dentro do leito. Pode-se observar que os dois primeiros valores de h_c estudado, que são: $h_c=5,0$ e $10,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, o gráfico da temperatura do produto em relação ao tempo (Figuras 4.42 e 4.53) não sofrem uma alteração considerável; são valores muito baixos para haver mudanças nos parâmetros de processo, principalmente para o primeiro gráfico que representa, praticamente, uma convecção natural.

Observa-se também que, a diferença entre a temperatura do início e do final do leito é mínima nos primeiros instantes do processo. A avaliação da temperatura do produto em função da altura do leito mostra melhor esse fato. Observa-se que a inclinação da reta que representa o abaixamento da temperatura é praticamente constante (Figuras 4.49 e 4.57). Uma análise análoga pode ser feita para as Figuras 4.43 a 4.48, 4.50 a 4.52, 4.54 a 4.56 e 4.58 a 4.60 para os dois valores de h_c .

Figura 4.42: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=5,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 6).

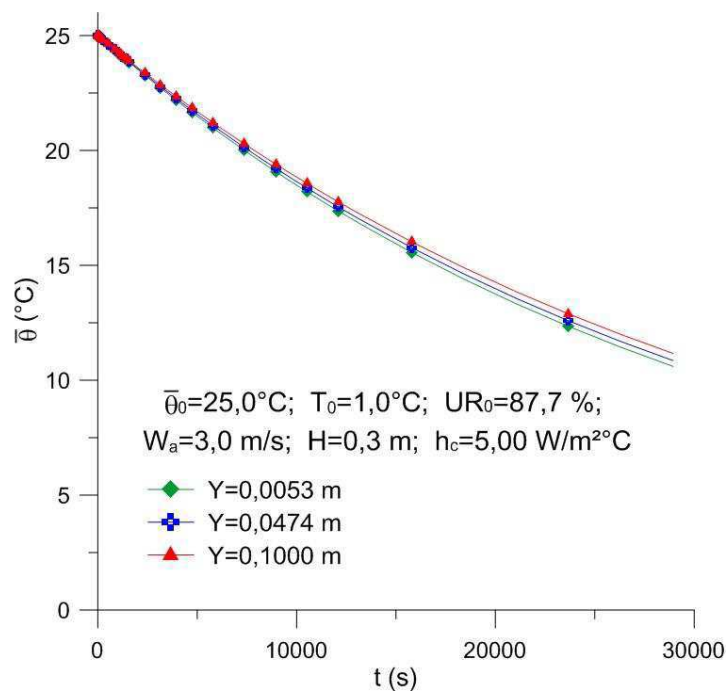


Figura 4.43: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=5,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 6).

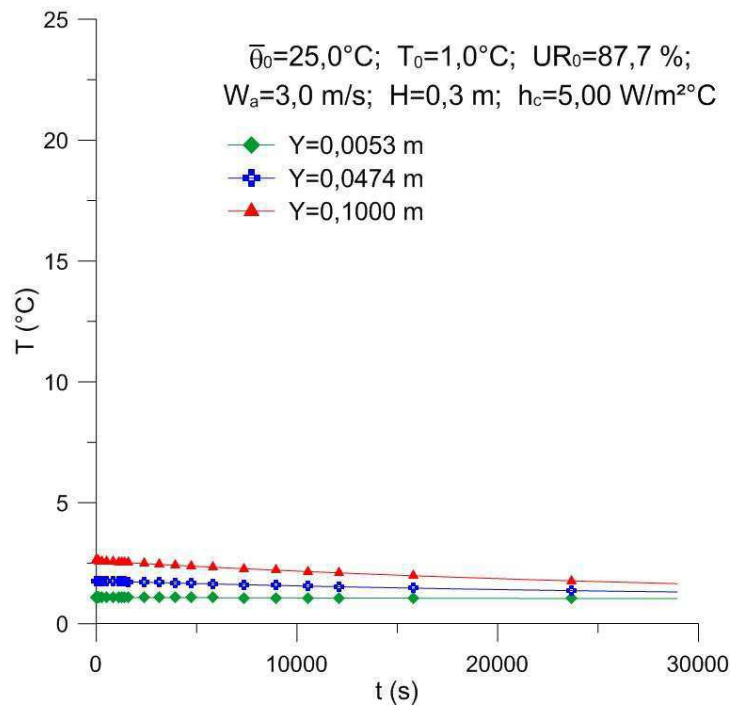


Figura 4.44: Pressão de vapor do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=5,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 6).

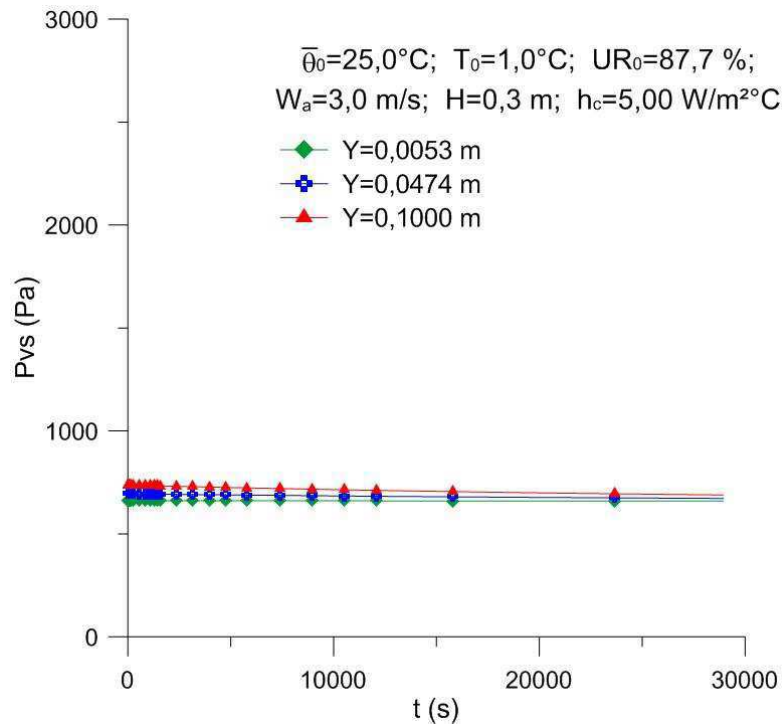


Figura 4.45: Umidade relativa do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=5,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 6).

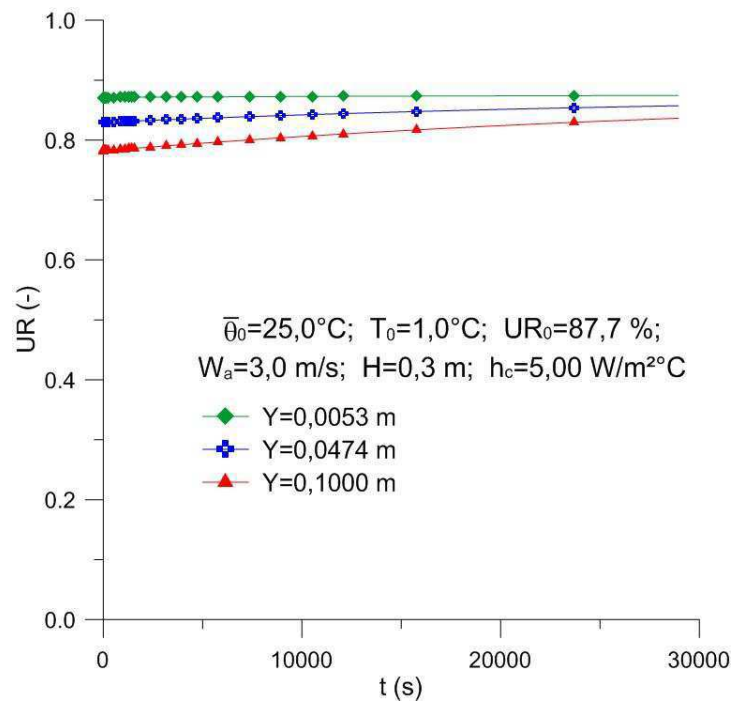


Figura 4.46: Temperatura da laranja dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $h_c=5,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 6).

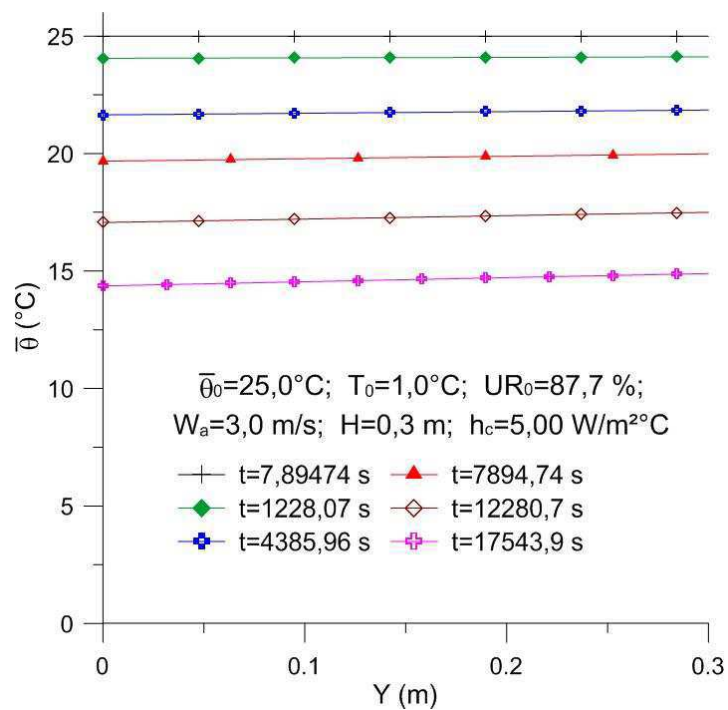


Figura 4.47: Temperatura do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $h_c=5,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 6).

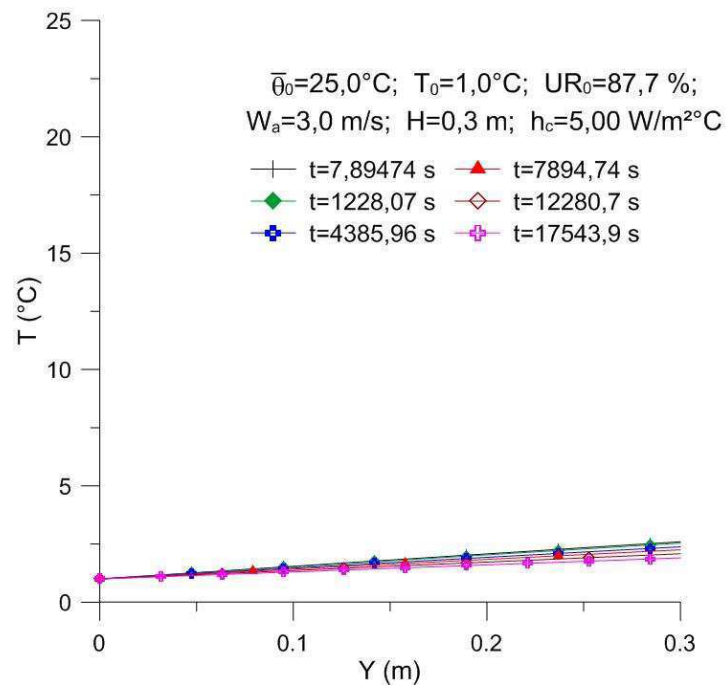


Figura 4.48: Pressão de vapor do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $h_c=5,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 6).

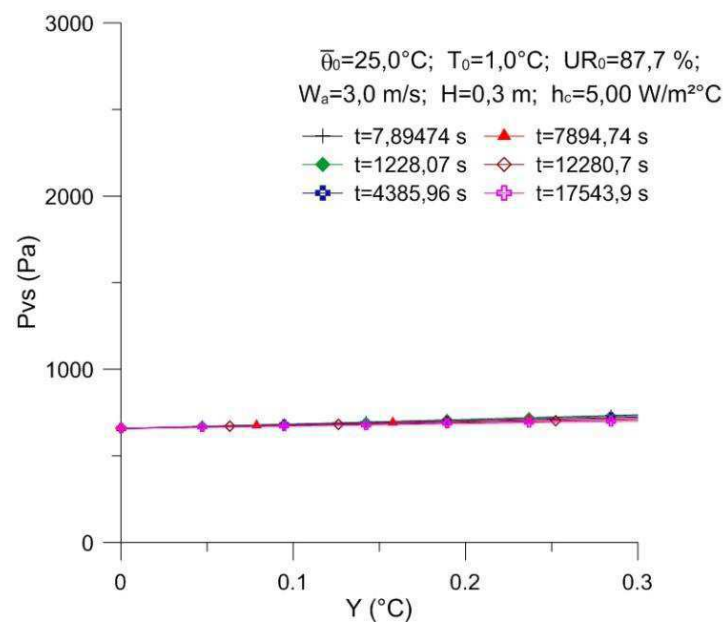


Figura 4.49: Umidade relativa do ar dentro do leito em seis tempos de refrigeração para $h_c=5,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 6).

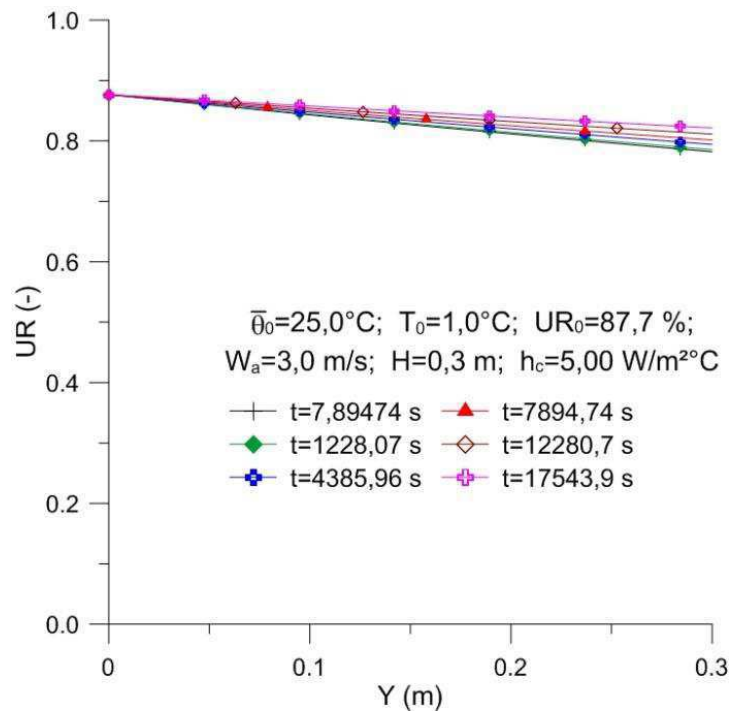


Figura 4.50: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=10,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 7).

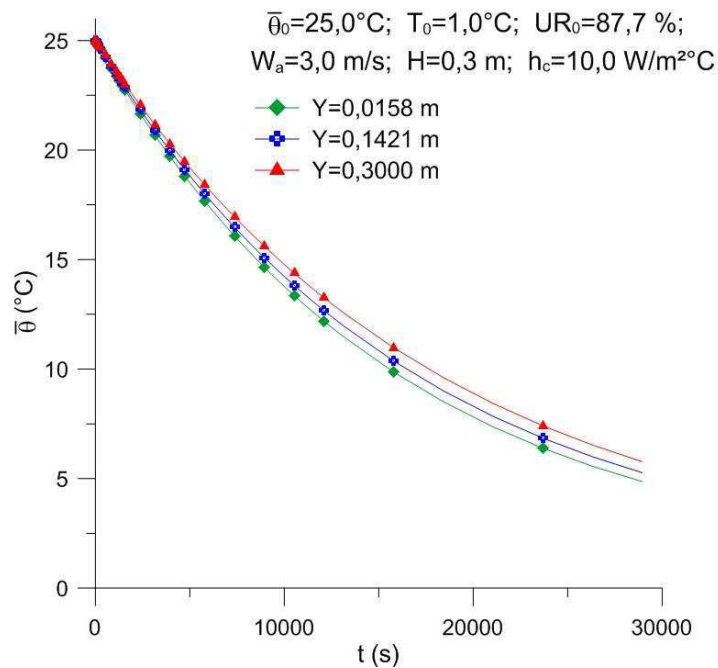


Figura 4.51: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=10,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 7).

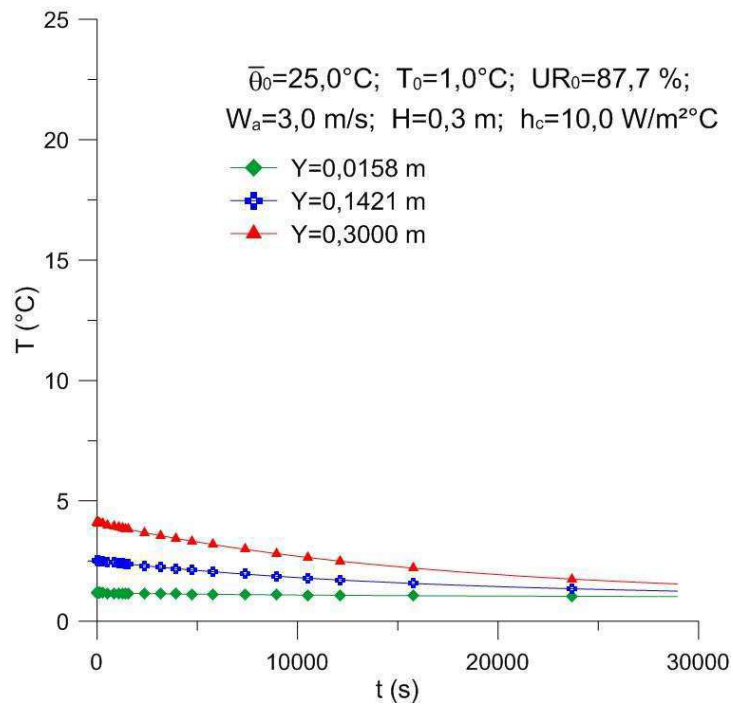


Figura 4.52: Pressão de vapor do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=10,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 7).

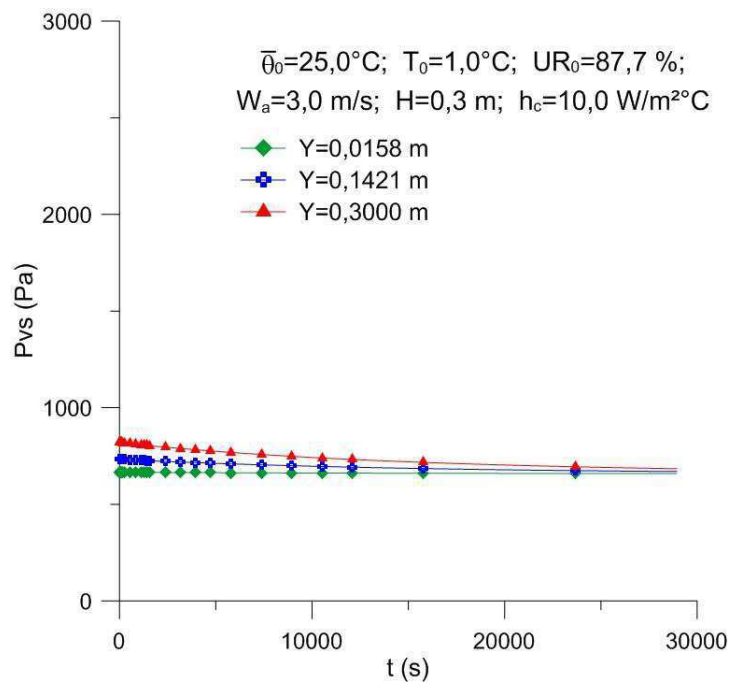


Figura 4.53: Umidade relativa do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=10,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 7).

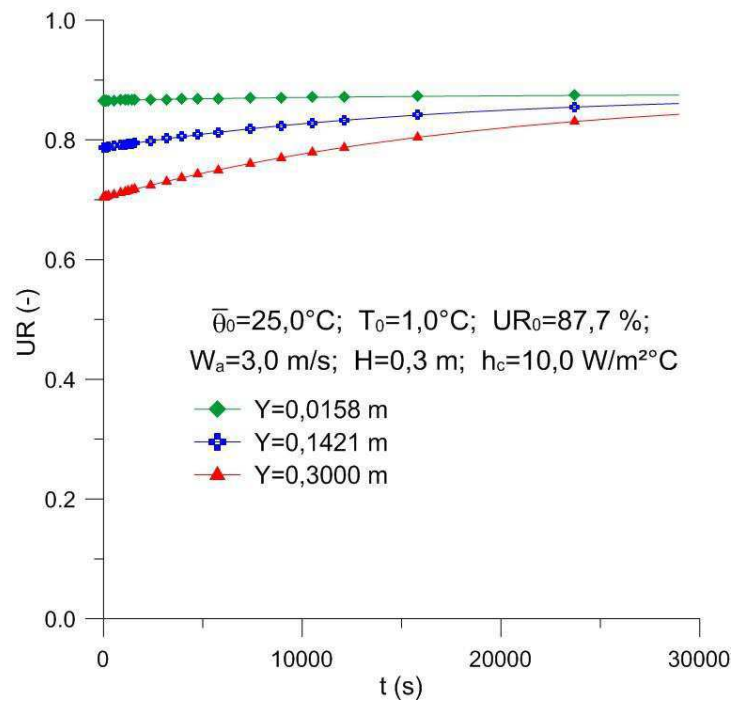


Figura 4.54: Temperatura da laranja dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=10,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 7).

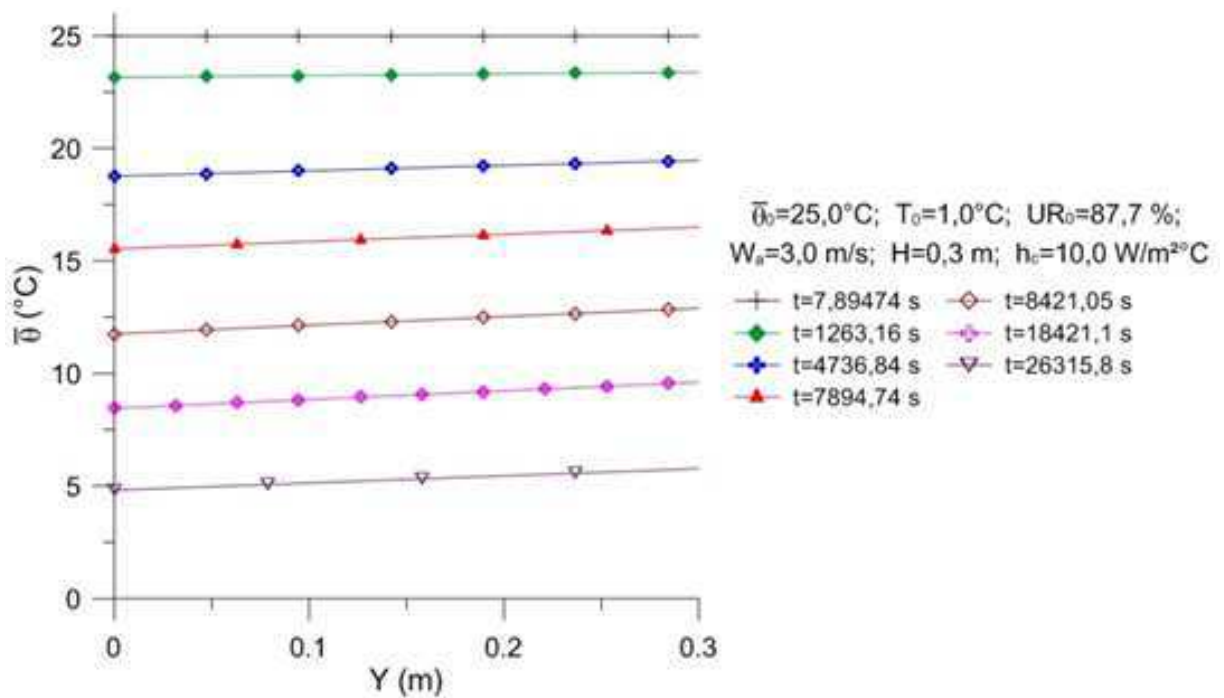


Figura 4.55: Temperatura do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=10,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 7).

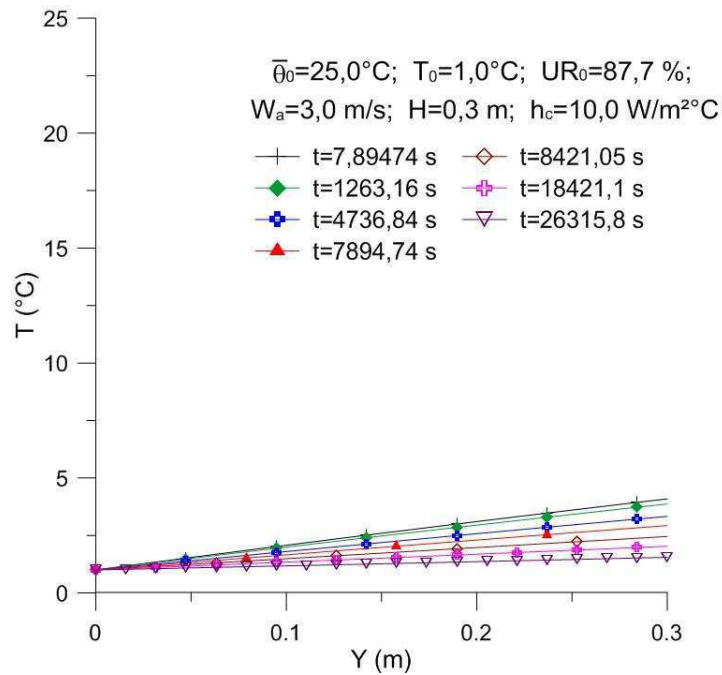


Figura 4.56: Pressão de vapor do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=10,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Caso 7).

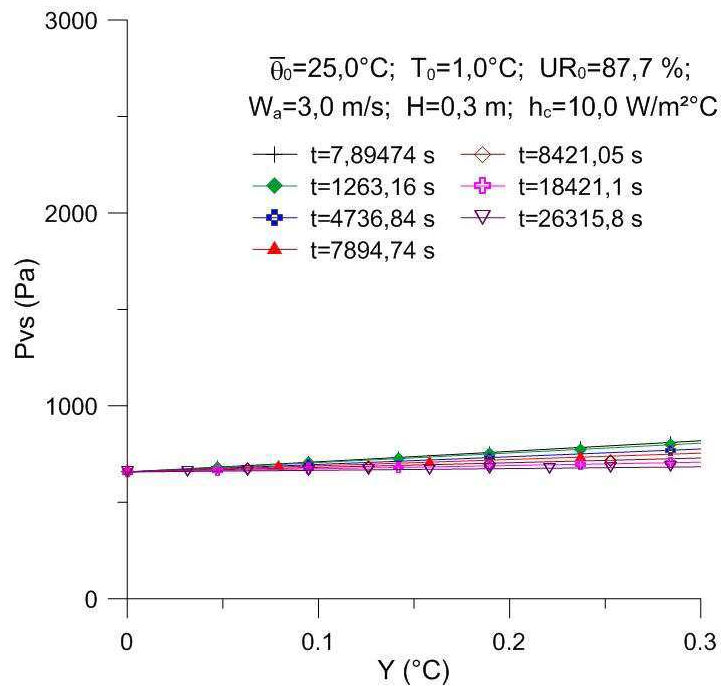
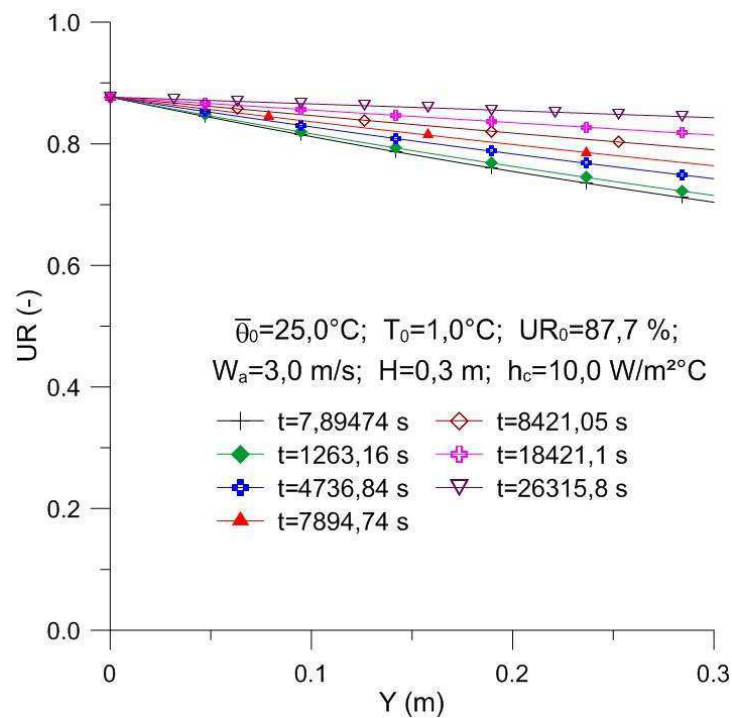


Figura 4.57: Umidade relativa do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=10,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 7).



As Figuras de 4.61 a 4.73, são para os dois coeficientes de transferência de calor convectivo mais elevados: $h_c=100 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $200 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$; esses dois valores podem ser comparados com um resfriamento por imersão em água gelada. A Figura 4.62, ilustra o gráfico da variação da temperatura do produto em função do tempo de processo. Observa-se que este valor apresenta uma melhor curva de resfriamento e que, na entrada do leito, a temperatura das laranjas decai mais rapidamente que nas duas outras posições, caracterizando um gradiente de temperatura entre o início e o final do leito. Este fato pode ser comprovado analisando a Figura 4.66. Observa-se ainda que, nos dois casos há uma eficiência maior em relação ao tempo de processo, sendo os mais rápidos estudados neste trabalho. Quando se analisa os parâmetros dentro do leito se comprova que há um elevado gradiente e os parâmetros alcançam o equilíbrio logo após duas horas do início do processo de refrigeração.

A Figura 4.67 ilustra o comportamento transiente da temperatura do ar de refrigeração em três posições dentro do leito. A Figura 6.67 mostra que há um gradiente de temperatura do ar em função do tempo nos primeiros instantes do

processo, mostrando uma eficiente troca de energia entre o ar e o produto. Uma análise análoga pode ser feita para as Figuras 4.68, 4.69, 4.72 e 4.73.

Figura 4.58: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 9).

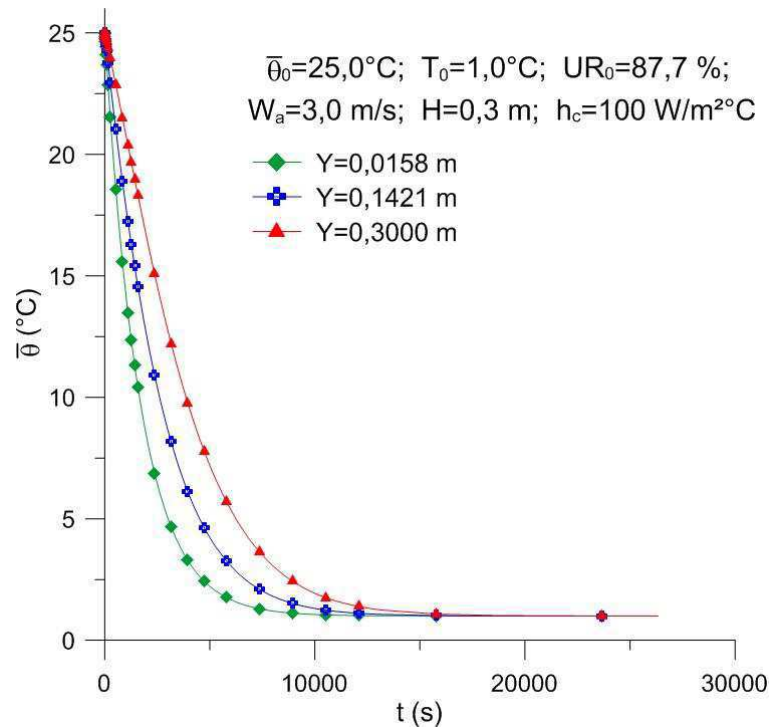


Figura 4.59: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 9).

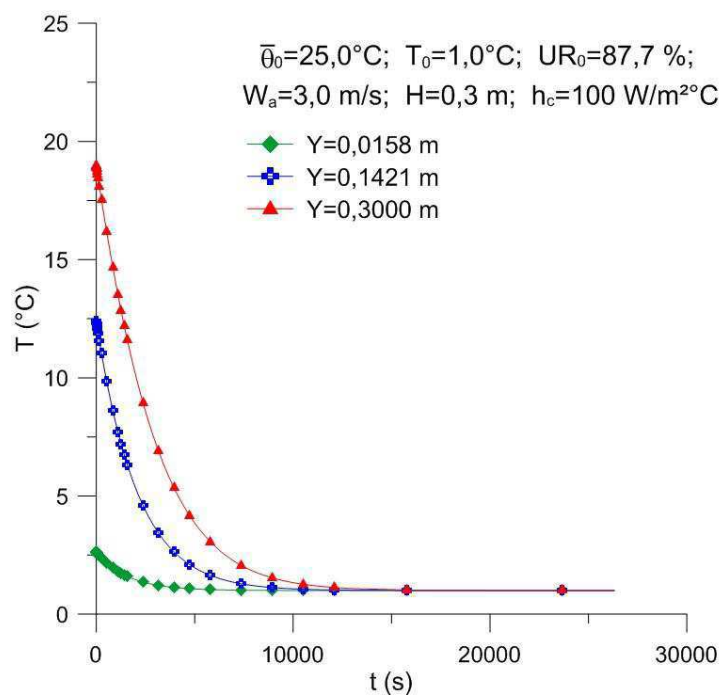


Figura 4.60: Pressão de vapor do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 9).

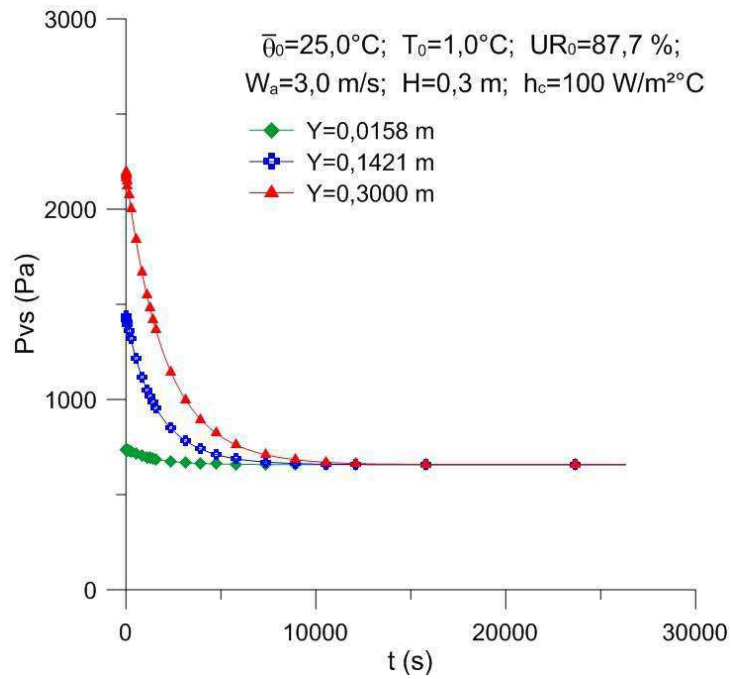


Figura 4.61: Umidade relativa do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 9).

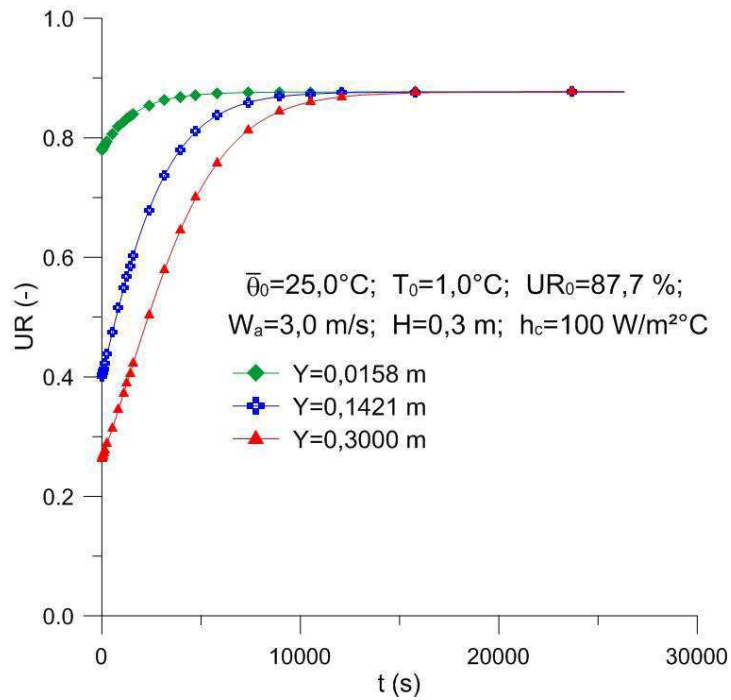


Figura 4.62: Temperatura da laranja dentro do leito em sete tempos de resfriamento para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 9).

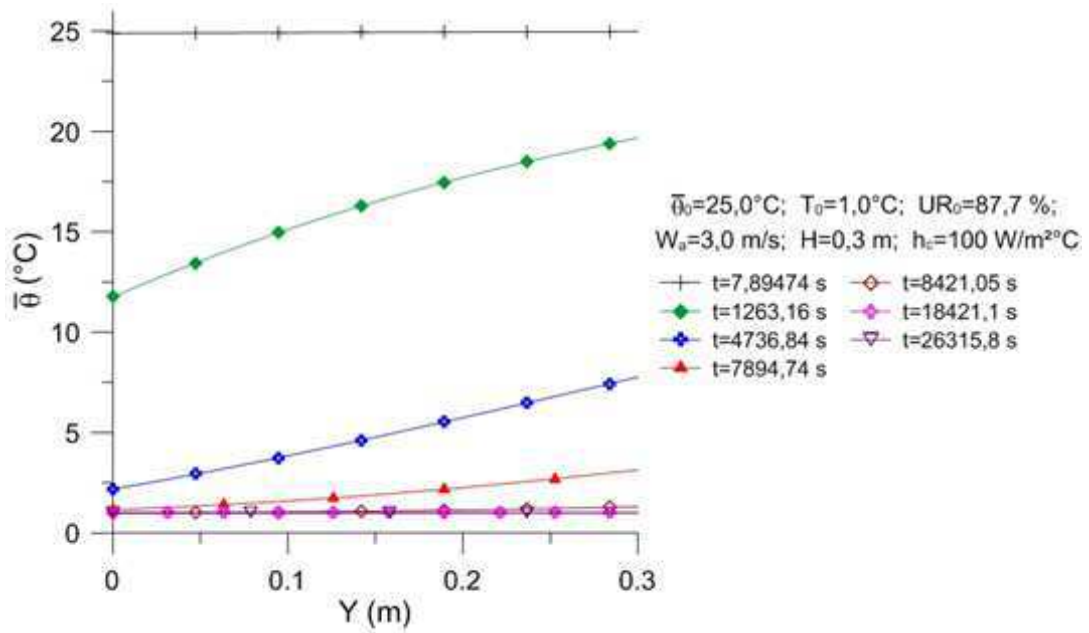


Figura 4.63: Temperatura do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 9).

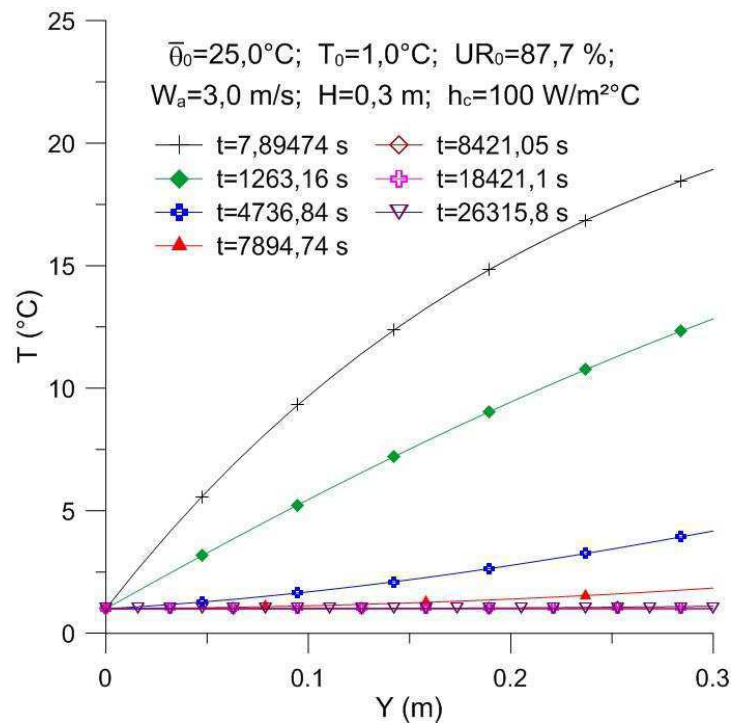


Figura 4.64: Pressão de vapor do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 9).

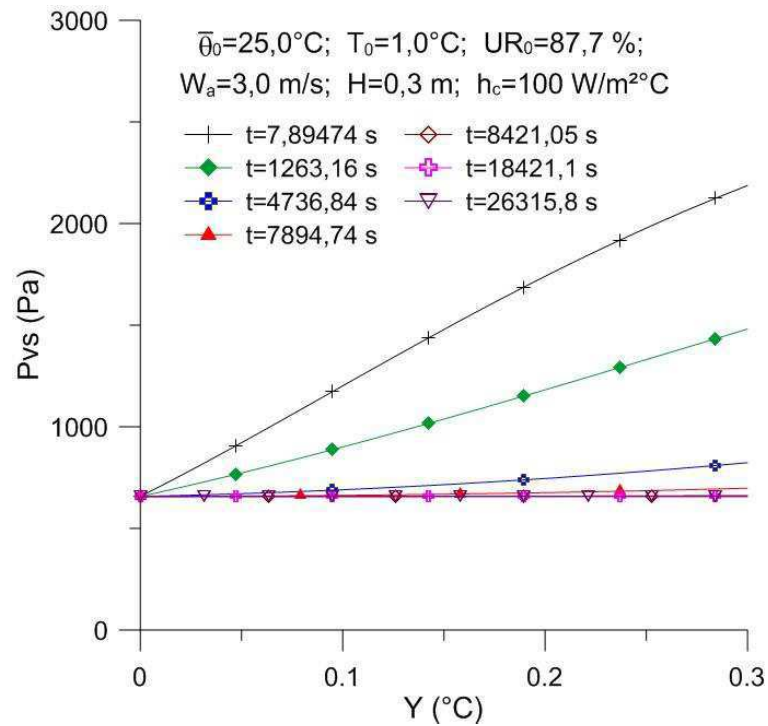


Figura 4.65: Umidade relativa do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=100,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (caso 9).

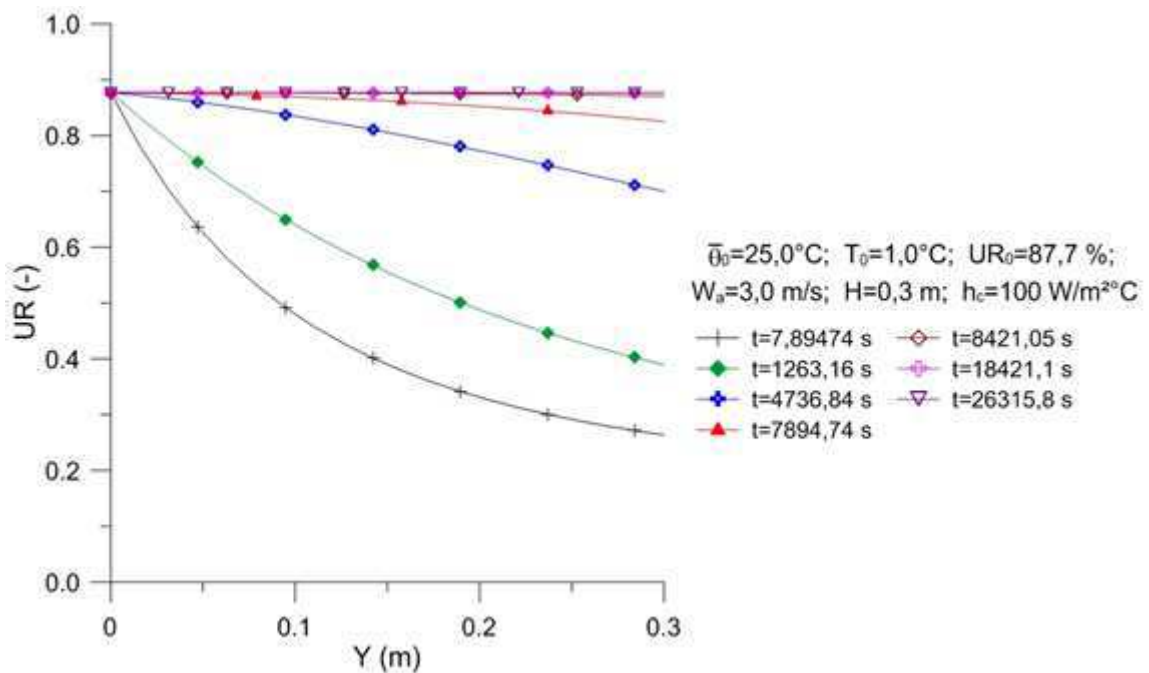


Figura 4.66: Temperatura do produto em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 10).

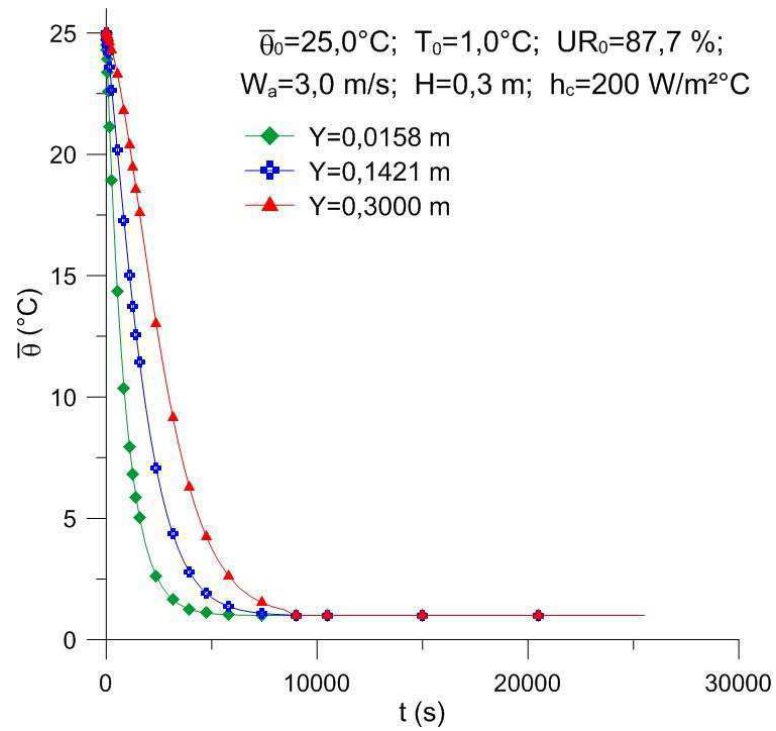


Figura 4.67: Temperatura do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 10).

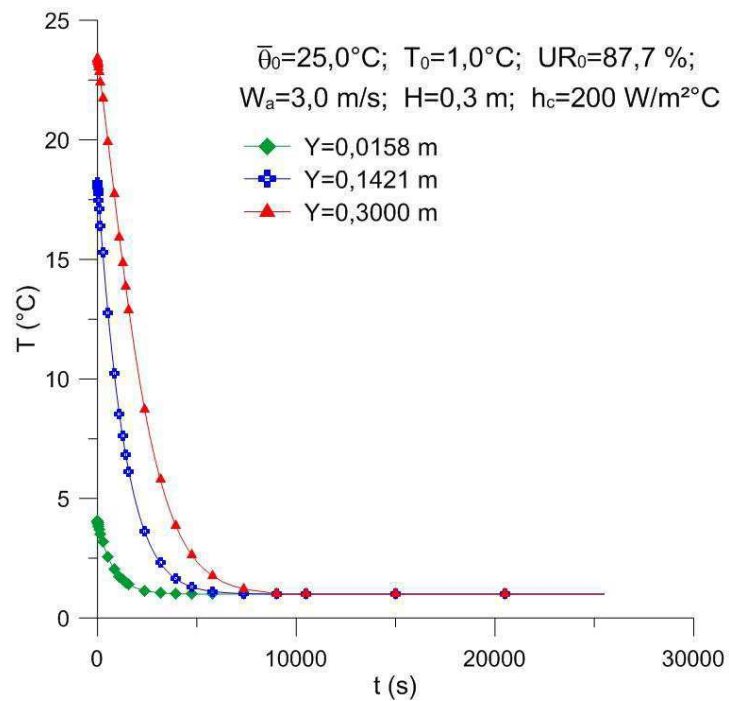


Figura 4.68: Pressão de vapor do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 10).

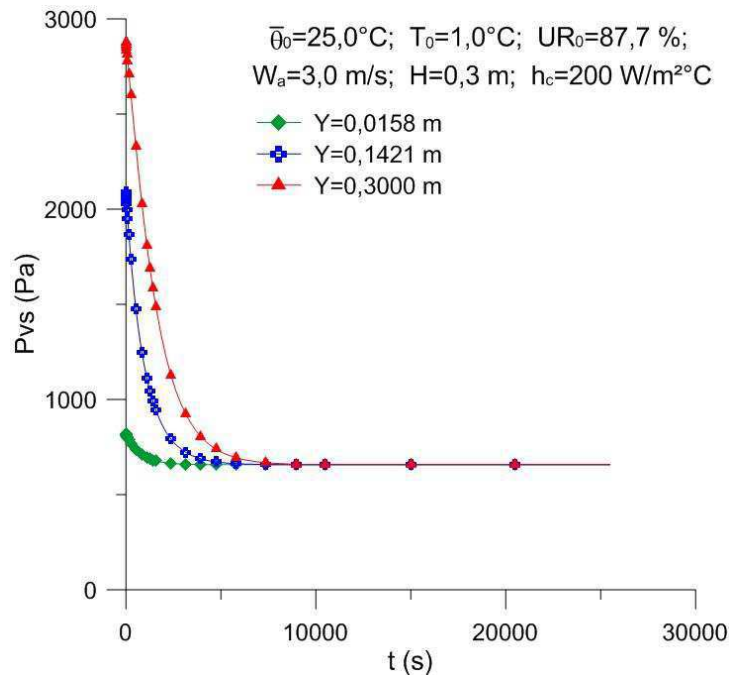


Figura 4.69: Umidade relativa do ar em função do tempo em três posições do leito, para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 10).

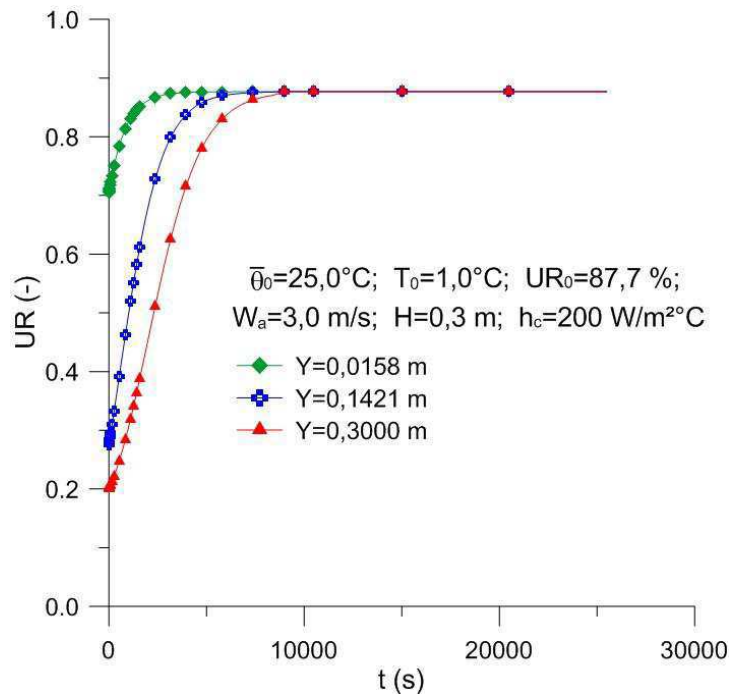


Figura 4.70: Temperatura da laranja dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 10).

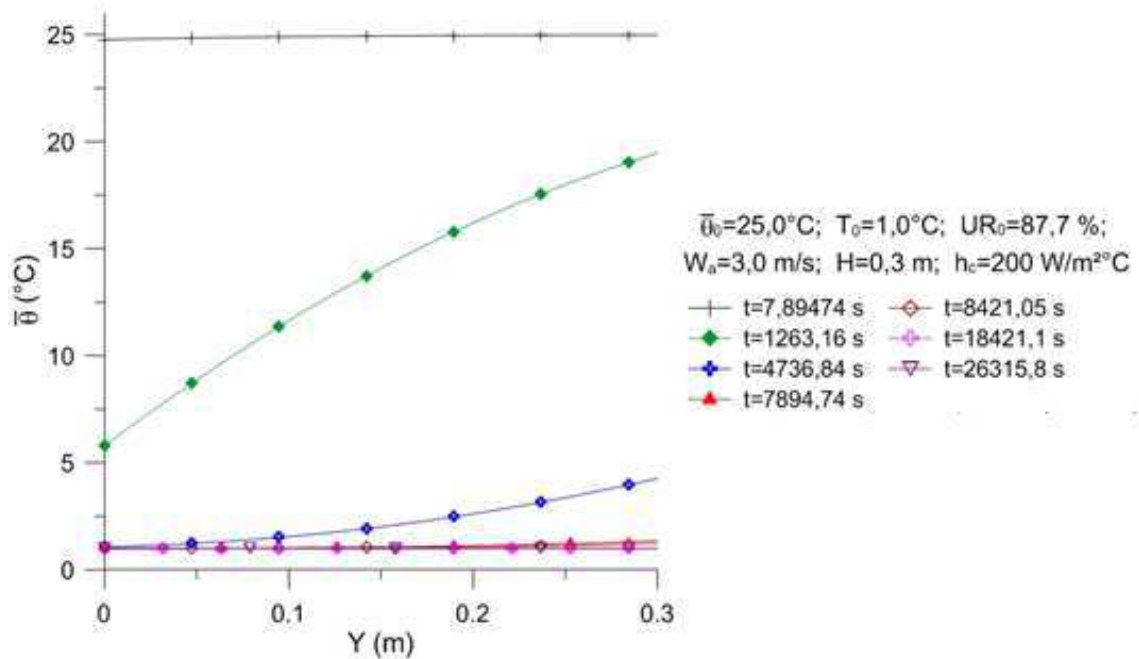


Figura 4.71: Temperatura do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 10).

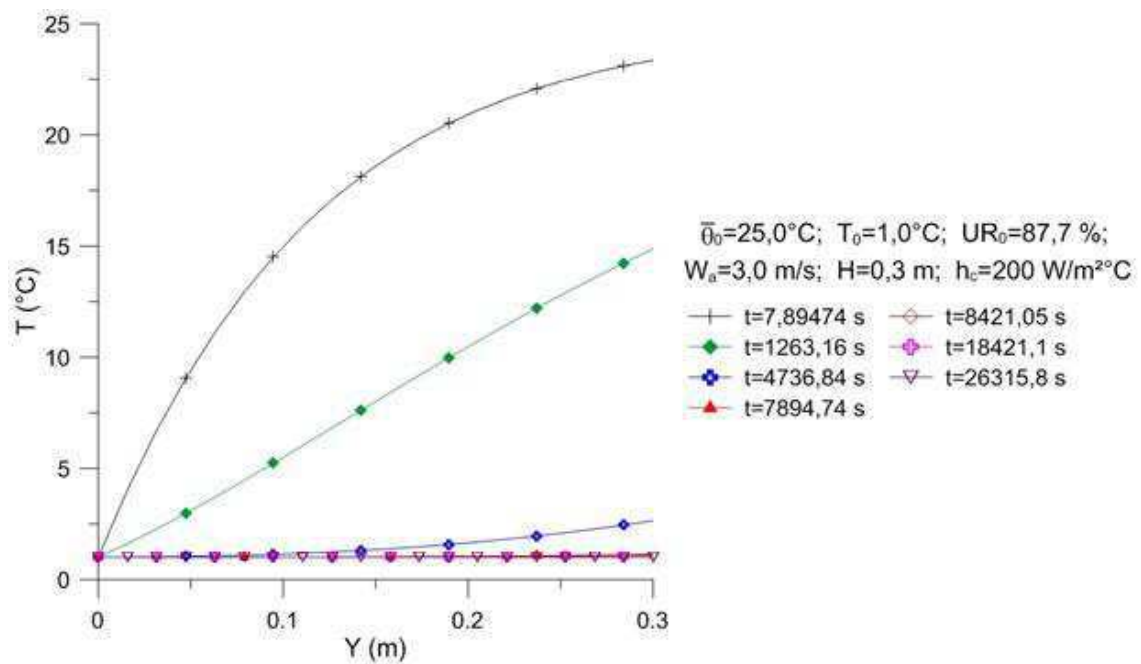


Figura 4.72: Pressão de vapor do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 10).

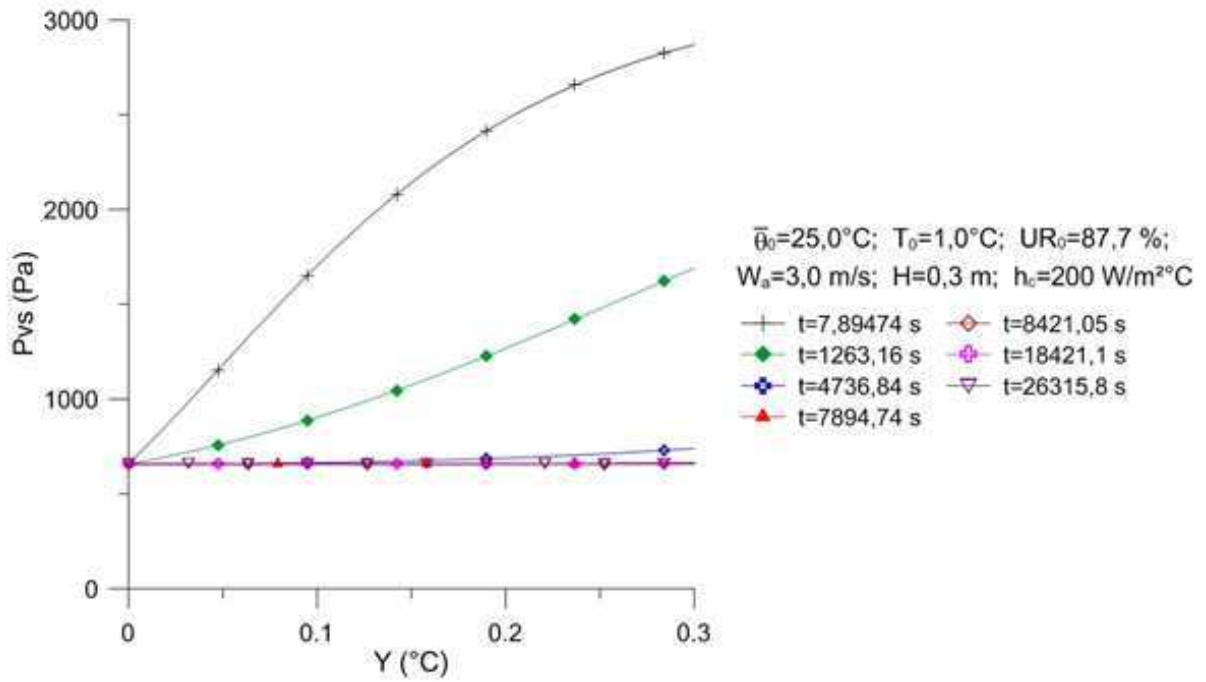
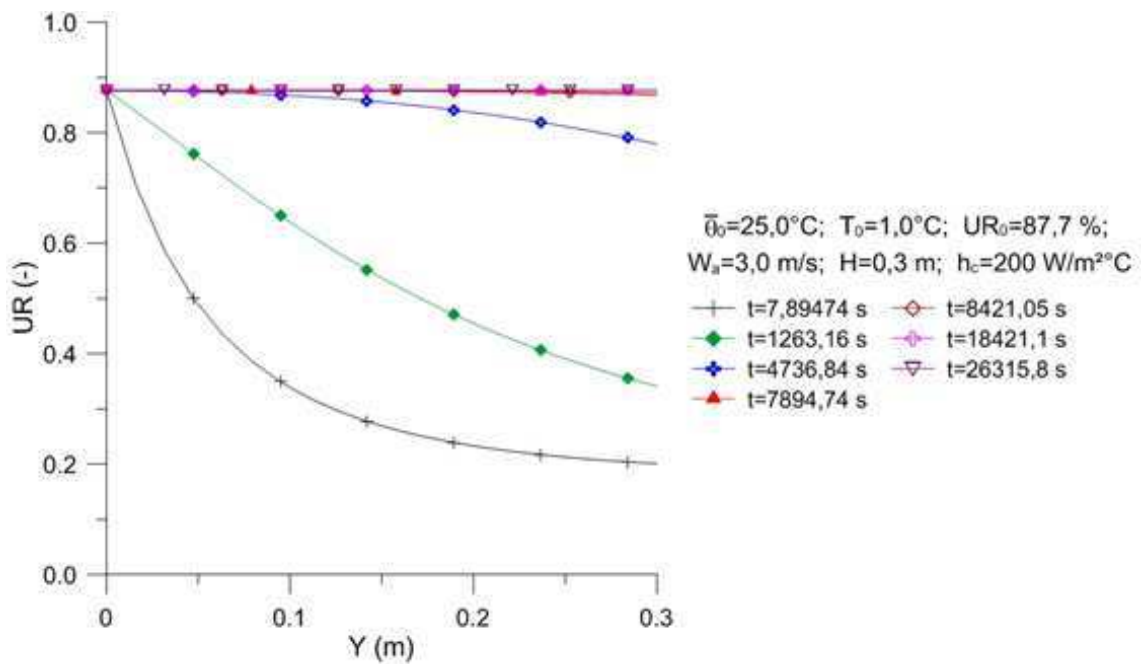


Figura 4.73: Umidade relativa do ar dentro do leito em sete tempos de refrigeração para $h_c=200,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (caso 10).



CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- a) O modelo matemático desenvolvido descreveu, de forma satisfatória, a troca de calor entre os frutos e o ar circulante.
- b) O método dos volumes finitos pode ser usado para simular o processo de resfriamento por ar forçado e o software *Mathematica*[®] tem um bom desempenho em seu processamento de dados.
- c) Tanto no produto quanto no ar de resfriamento obtiveram os maiores gradientes de temperatura nos primeiros instantes do processo.
- d) O resfriamento das laranjas descreveu o perfil de temperatura em função do tempo de processo como apresentado na literatura, validando a metodologia aplicada.
- e) Os casos analisados permitiram avaliar a influência de alguns parâmetros sobre a cinética de resfriamento do leito de laranja valência, tais como: temperatura do produto e do ar de refrigeração, pressão de vapor de saturação do ar e umidade relativa do mesmo.
- f) Observou uma grande influência do coeficiente de transferência de calor convectivo na cinética de resfriamento do leito de frutas. Quanto maior o valor deste parâmetro, maiores são os gradientes de temperatura do leito e mais rápido ocorre o resfriamento das laranjas. Demonstrando sua importância no processo.

- g) A umidade relativa em todo o processo ficou dentro da faixa sugerida na literatura para manter a qualidade do produto, não permitindo assim, a perda de suas características organolépticas e garantindo um produto adequado para o consumo.
- h) O tempo de resfriamento máximo do processo foi inferior a 30000 s, que não é suficiente para se ter mudança na massa total do produto, garantindo que não haja ressecamento das laranjas e nem a perda de qualidade.

5.2 Sugestões para futuros pesquisas

Para trabalhos futuros, pode-se sugerir:

- a) Comparar os resultados obtidos teoricamente, através de modelagem matemática, com os resultados obtidos em experimentos físicos com diferentes sistemas de refrigeração.
- b) Utilizar o modelo descrito para realizar o resfriamento de diferentes produtos.
- c) Estudar a distribuição de temperatura durante o resfriamento de produtos que possuam propriedades termofísicas semelhantes e de diferentes formas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AMENDOLA, M. DUSSÁN, S. S. RABELO, 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, n2, p.176 – 182, 2009. Campina Grande, PB, UAEA/UFCG.

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, p.78-82, 2005.

ANDRADE, P. F. S. Fruticultura. Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. Departamento de Economia Rural, Panamá-GO, maio de 2015. Disponível em: <
http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/fruticultura_2014_15.pdf>

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

ASHRAE. Handbook of Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1993.

Associação Nacional dos Exportadores de Sucos Cítricos - CitrusBr. Disponível em: <http://www.citrusbr.com/laranjaesuco/?ins=20>. Acesso: 05/06/2016

Associação Nacional dos Exportadores de Sucos Cítricos - CitrusBr. A Indústria Brasileira de Suco de Laranja. Disponível em:

<http://www.citrusbr.com/imgs/biblioteca/CITRUS_APEX_PORTUGUES.pdf>.
Acesso: 05/06/2016

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.

Baird, C.D.,J.J. Gaffney. A numerical procedure for calculating heat transfer in bulk loads of fruits or vegetables. *ASHRAE Transactions* 82(2):525. 1976.

Bennett, A.H., J. Soule, G.E. Yost. Temperature response of citrus to forced-air precooling. *ASHRAE Journal* 8(4):48. 1966.

BRACKMANN, A.; STEFEENS, C. A.; MELLO, A. M. de. Efeito do pré-resfriamento e temperatura de armazenamento na qualidade de ameixas, cvs. Pluma 7 e reubennel. *Revista Brasileira de Agrociência*, Santa Maria, v. 7, n. 1, p.18-21, jan./abr. 2001.

BROSNAN, T.; SUN, Da-Wen. Precooling techniques and applications for horticultural products – a review. *International Journal of Refrigeration*, v. 24, p. 154-170, 2001.

CASADA, M.E.; YOUNG, J.H. Model for heat and moisture transfer in arbitrarily shaped two-dimensional porous media. *Transactions of the ASAE*, v.37, p.1927-1938, 1994.

CASTRO, L.R. Análise dos parâmetros relacionados ao resfriamento a ar forçado em embalagens para produtos hortícolas. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, 161p., 2004.

CENCI, S. A. Boas práticas de pós-colheita de frutas e hortaliças na agricultura familiar. In: NASCIMENTO NETO, F. do (Org.). *Recomendações básicas para a aplicação das boas práticas agropecuárias e de fabricação na agricultura familiar*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006, cap. 3 p. 65-80.

CHAU, K.V. Mathematical modeling of postharvest processes. Grupo de Tecnologia Pós- Colheita. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas- SP. Apostila. 2001.

CHITARRA, M. I. F. Pós-Colheita de Frutos e Hortaliças: Fisiologia e Manuseio. *Lavras: ESAL/FAEPE* 1990. 320 p.: ilustr.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio. *Lavras: ESAL/FAEPE*, 2005. 535 p.

Citricola Lucato. Disponível em: <www.citricolalucato.com.br/p/laranjas.asp>. Acesso em: 29/07/2016.

DATTA, A.K.; SABLANI, S.S. Mathematical modeling techniques in food and bioprocess: an overview. In: SABLANI, S.S.; RAHMAN, M.S., DATTA, A.K.,

MUJUMDAR, A.R. Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques. Boca Raton: CRC Press, 2007, p.1-11.

Dongguan Coldmax Refrigeration Equipment Co., Ltd. Disponível em: <<http://www.21food.com/products/vacuum-cooling-661236.html>>. Acesso em 29/07/2016.

DUSSÁN SARRIA, S.D. Resfriamento rápido e armazenamento refrigerado do figo (*Ficus carica* L.) “roxo de valinhos” e seus efeitos na qualidade da fruta. 2003. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola / FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2003.

DUSSÁN-SARRIA, S.S.; HONÓRIO,S.L. Condutividade e difusividade térmica do figo (*Ficus carica* L.) “Roxo de Valinhos”. Engenharia Agrícola. Jaboticabal, v.24, n.1, p.185- 194, 2004.

Dincer, I., O.F. Genceli. Cooling of spherical products: Part I—Effective process parameters. International Journal of Energy Research 19(3):205-218. 1995.

Dincer, I., O.F. Genceli. Cooling process and heat transfer parameters of cylindrical products cooled both in water and in air. International Journal of Heat & Mass Transfer 37(4):625-633. 1994.

Dincer, I. An effective method for analysing precooling process parameters. International Journal of Energy Research 19(2):95-102. 1995.

EVANGELISTA, I. Tecnologia de alimentos. São Paulo: Atheneu, 1998. 652 p.

FAOSTAT - Food Agriculture Organization Statistic. 2016. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>>. Acesso em: 09 de junho de 2016.

FELLOWS, P. J. Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática, 2ª edição. Porto Alegre –RS. Artmed, 2006.

FENNEMA, O. R.; DAMODARAN, S.; PARKIM, K. L. Química de Alimentos de Fennema, 4ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2010. 900 p.

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.

FERZIGER, J.H.; PERIC, M. Computational Methods for Fluid Dynamics, Berlin: Springer-Verlag, 2002.

FONTANA, A.J.; VARITH, J.; IKEDIALA, J.; REYES, J.; WACKER, B. Thermal properties of selected foods using a dual needle heat-pulse sensor. In: ASAE/CSAE - SCGR 1999 MEETING, 1999, Toronto. Proceedings... St Joseph: ASAE, 1999, 10p.

FRASER, H. Forced-Air Cooling Systems for Fresh Ontario Fruits and Vegetables. August, 2014.

GAVA, A. J., Princípios de Tecnologia de Alimentos, 4ª edição. Editora Nobel, São Paulo, 1978.

GEA group Aktiengesellschaft. Disponível: < <http://www.gea.com/>>. Acesso em: 29/07/2016.

Grako Engenharia. Disponível em < http://grakoengenharia.com.br/camara_frigorifica.php>. Acesso em: 29/07/2016.

IBRAF - Instituto Brasileiro de Frutas. Disponível em: <http://www.ibraf.org.br/detalhe.aspx?id=1>. Acesso em 12/04/2016

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20/04/2016.

INCROPERA, F.P.; DE WITT, P. Fundamentals of heat and mass transfer. New York: John Wiley & Sons, 455p, 1998.

JANICK, J. Horticultural Science. 4th Ed. New York: Free-man WH; p. 550-551. 1986.

KADER, A. A. Postharvest technology of horticultural crops. 2 ed. Division of Agriculture and Natural Resources. Davis: University of California, n3311, 295 p, 1992.

KIENHOLZ, J; EDEOGU, I. Fresh fruit & vegetable cooling for market gardeners in Alberta. Alberta Agriculture, Food and Rural Development - Canada 2002

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.; NACHTIGAL, J. C.; FACHINELLO, J. C. e BILHALVA, A. B. Fisiologia e manejo pós-colheita de frutas de clima temperado / São Paulo: Livraria e Editora Rural. pg. 21 e 22, e 27 a 36, 2002.

KEEY, R. B. Drying of loose and particulate materials. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 502 p.1992.

KOLLER, O.C. Origem e importância econômica da cultura da laranja. In: Citricultura: Laranja: Tecnologia de produção, pós-colheita, industrialização e Comercialização. Porto Alegre: Cinco Continentes. 396p. 2006

- MALISKA, C.R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: Fundamentos e coordenadas generalizadas. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A. 453p. 2004
- MASSONI, P. R., Estudo Numérico e Experimental do Resfriamento Convectivo de Vegetais Cilíndricos. 62p. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.
- MIGLIORI, M.; GABRIELE, D.; DE CINDIO, B.; POLLINI, C.M. Modelling of high quality pasta drying: quality indices and industrial application. *Journal of Food Engineering*, v.71, p.242-251, 2005.
- MOHSENIN, N. N. Thermal properties of foods and agricultural material. New York. USA. 1980. 405 p.
- NEVES, M. F. O retrato da citricultura Brasileira. Ribeirão Preto, SP. *Markestrat*. 71 p. 2012
- NORTON, T.; SUN, D.-W. An overview of CFD applications in the food industry. In: SUN, D.-W. *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*. Boca Raton: CRC Press, p.1-41. 2007.
- NUNES, A.S; PARK, K.J.; FABBRO, I.M.D.; PARK, J.K.B.; BROD, F.P.R. Métodos de determinação experimental da condutividade e difusividade térmica de materiais biológicos – revisão. *Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos*. Campinas, v.36, n.1: p.55-68, jan-jun, 2002.
- OLIVEIRA, E. B. L.. Conservação pós-colheita de mamão ‘Sunrise solo’ com uso de revestimentos naturais. Rio Branco: 53f. UFAC, 2010.
- ORDÓÑEZ, J.A. *Tecnologia de Alimentos: Componentes dos Alimentos e Processos*. Porto Alegre: Artmed; 2005.
- PATANKAR, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York: Hemisphere Publishing. Cooperation, 1980. 197 p.
- PESSÔA, P. M. Estudo teórico do resfriamento de frutas com forma arbitrária usando o método integral baseado em Galerkin. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola. 67 p. Campina Grande: UFCG, 2010
- PIROZZI, D.C.Z.; AMENDOLA, M. Modelagem matemática e simulação numérica do resfriamento rápido de morango com ar forçado. *Engenharia Agrícola*, v.25, p.222-230, 2005.
- POTTER, N. N., HOTCHKISS, J. H. *Food Science*, 5ª edition. Chapman & Hall, 1986.
- PURI, V.M.; ANANTHESWARAN, R.C. The finite-element method in food processing: a review. *Journal of Food Engineering*, v.19, p.247-274, 1993.

RABI, J.A. Modelagem e simulação de processos agroindustriais: cromatografia por afinidade bioespecífica, extração com fluido supercrítico, resfriamento rápido de alimentos e concentração de ²²²Rn para aproveitamento de fosfógeno. 2011. 111 f. Tese de Livre-Docência – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2011.

RAHMAN, M. Shafiur. Handbook of Food Preservation, Second Edition. CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2007.

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.

REETZ, E. R.; KIST, B.B.; SANTOS, C.E.; CARVALHO, C.; DRUM, M. Anuário brasileiro da Fruticultura 2014 / – Santa Cruz do Sul : Editora Gazeta Santa Cruz, 2015. 104 p. : il.

RIEDEL, L. Measurement of thermal diffusivity on foodstuffs rich in water. *Kaltetechnik-Klimatisierung, Karlsruhe*, v.21, n.11, p.315-6, 1969.

ROCHA, A. M.; BROCHADO, C. M.; KIRBY, R.; MORAIS, A. M. Shelf-life of chilled cut Orange determined by sensory quality. *Food Control*, v. 6, n. 6, p 317 – 322, 1995.

ROCHA, C M. V. Manual de Rede de Frio. - 3. ed. - Brasília: Ministério da Saúde: Fundação Nacional de Saúde; 2001. 80p. il.

ROMANO, V.R. Foreword. *Journal of Food Engineering*, v.71, p.231-232, 2005.

ROSSI, S. J. Psicrometria. João Pessoa. Fundação de Apoio à Pesquisa e à Extensão-FUNAPE, 1987. 60 p.

SCOTT, G.; RICHARDSON, P. The application of computational fluid dynamics in the food industry. *Trends in Food Science and Technology*, v.8, p.119-124, 1997.

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, Juarez de Souza e Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Capítulo 18, 560p. 2ª Edição, Viçosa: Aprenda fácil, 2008.

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.

SINHA, N. K.; Sidhu J. S.; Barta J.; Wu, J. S. B. and Cano, M. P. HANDBOOK OF FRUITS AND FRUIT PROCESSING, Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd., 2012.

Soule, J., G.E. Yost, A.H. Bennett. Certain heat characteristics of oranges, grapefruit and tangelos during forced-air precooling. Transactions of the ASAE 9(3):355. 1966.

SIQUEIRA, A. M.A.. Resfriamento rápido por ar forçado de Goiaba CV Paluma: avaliação dos parâmetros físicos, físico-químicos, sensoriais e do processo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 121 p., 2009.

SOARES, A.G. Desperdício de alimentos – um desafio político e social a ser vencido. 2014. In: <http://www.ctaa.embrapa.br/upload/publicacao/art-182.pdf>. Acesso em 13 abr 2016.

SPANOL, A. W. SIGRIST, J. M. Tecnologia pós-colheita de frutas tropicais. Manual técnico. N 9. Campinas: Instituto de Tecnologia dos Alimentos. 1988, 190 p.

STROBEL, C. Refrigeração e Ar condicionado Carga térmica em instalações frigoríficas. UFPR 1998.

SULLIVAN, G. H.; DAVENPORT, L. R.; JULIAN, J. W. Progress in new crops: Precooling: Key factor for assuring quality in new fresh market vegetable crops. Arlington (VA): ASHS Press, p. 521-524, 1996.

SWEAT, V. E. Experimental values of thermal conductivities of selected fruits and vegetables. Journal Food Science. n.39. p. 1081-1083. 1974.

TACO - Tabela brasileira de composição de alimentos / NEPA – UNICAMP.- 4. ed. rev. e ampl.. -- Campinas: NEPAUNICAMP, 2011. 161 p.

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. 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.; 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, p.228-235, 2001.

TERUEL, Medeiros Bárbara Janet, Estudo Teórico-Experimental do Resfriamento de Laranja e Banana com Ar Forçado, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 209 p. Tese (Doutorado).

THOMPSON, J. F.; MITCHELL, F. G.; RUMSEY, T. R.; KASMIRE, R. F.; CRISOSTO, C.H. Commercial Cooling of Fruits, Vegetables and Flowers, Cap. 4 e 5. Universidade da Califórnia – Divisão de agricultura e recursos naturais, Publicação 21567, p.33-34, 1998.

TORREGGIANI, D.; BERTOLO, G. Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. *Journal of Food Engineering*, v. 49, n. 2-3, p. 247-253, 2001.

TOLEDO, R. T. *Fundamentals of Food Process Engineering*. New York: Chapman e Hall, p 398-436, 1991.

TREICHEL, Michelle. *Anuário brasileiro da fruticultura 2016 /– Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 88 p.:il. 2016.*

USDA – United States Department of Agriculture. Disponível em: <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/>. Acesso em: 20/04/2016.

VAN DER SMAN, R.G.M. Lattice Boltzmann schemes for convection-diffusion phenomena - application to packages of agricultural products. 1999. Ph.D. Thesis – Landbouw Universiteit Wageningen, Wageningen. Disponível em: <<http://library.wur.nl/WebQuery/clc/963315>>. Acesso em: agosto/2015.

VENÂNCIO, T.; ENGELSBERG, M.; AZEREDO, R.B.V.; COLNAGO, L.A. Metodologia de medida da difusividade térmica por RMN-CWPF. *Comunicado Técnico 72*. São Carlos, ISSN 1517-4786. 5p., 2006.

WANG, L.; SUN, D.-W. Recent developments in numerical modelling of heating and cooling processes in the food industry - a review. *Trends in Food Science and Technology*, v.14, p.408-423, 2003.