

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS
MISSÕES CAMPUS DE ERECHIM**

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Gustavo de Pinho Oliveira

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DE
PRESUNTO**

Erechim, RS – Brasil

Julho, 2016

GUSTAVO DE PINHO OLIVEIRA

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DE
PRESUNTO**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos: Área de concentração – Engenharia de Alimentos, Departamento de Ciências Agrárias da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, Campus de Erechim.

Orientadores: Profa. Dra. Mónica B. Alvarado Soares

Prof. Dr. Marcelo Mignoni

Coorientador: Prof. Dr. Weber da Silva Robazza

Erechim, RS – Brasil

Julho, 2016

MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DE PRESUNTO

Gustavo de Pinho Oliveira

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Julgadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Alimentos, Área de Concentração: Engenharia de Alimentos.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Mónica B. Alvarado Soares / URI – Erechim (Orientadora)

Prof. Dr. Marcelo Mignoni / URI – Erechim (Orientador)

Prof. Dr. Weber da Silva Robazza / UDESC – Pinhalzinho (Coorientador)

Prof. Dr. Alexandre Batista de Jesus Soares / UTFPR – Pato Branco (Membro)

Profa. Dra. Clarice Steffens / URI – Erechim (Membro)

Dr. Thiago André Weschenfelder / URI – Erechim (Membro)

Erechim, Julho, 2016

NESTA PÁGINA DEVERÁ SER INCLUÍDA A FICHA CATALOGRÁFICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. ESTA FICHA SERÁ ELABORADA DE ACORDO COM OS PADRÕES DEFINIDOS PELO SETOR DE PROCESSOS TÉCNICOS DA BIBLIOTECA DA URI –ERECIM.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por tudo que conquisei, pelas oportunidades que estão a caminho e por ter colocado pessoas tão especiais a meu lado.

À minha amada esposa, Cristina, por estar sempre a meu lado, me apoiar, me incentivar e me fazer acreditar que posso mais que imagino.

Aos meus queridos pais, Meralda e José Antônio Oliveira, que mesmo através da distância, sempre me apoiaram e me incentivaram – meu eterno carinho e gratidão.

Aos amigos de longuíssima data, Christian Quadros, Flávio Fernandes e Nedilo Júnior, por sempre contribuírem com novas perspectivas e pontos de vista, além de simplesmente (e principalmente) proporcionarem ótimos momentos de conversas e verdadeira amizade.

Aos amigos e colegas de mestrado, trabalho e profissão, Christian Alexandretti e Rubieli Zeferino, pelos ótimos momentos de convivência e aprendizado.

À Aurora Alimentos, em especial ao Sr. Cacio Capello, por oportunizar o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Aos engenheiros Leoni Brondani e Sidiane Ilchenko, pelos valiosos *insights*, sugestões, correções e colaborações.

À equipe da Presuntaria, em especial os profissionais Lilian dos Santos, Yan Tomasi e Edson Soares, pela dedicação e paciência no desenvolvimento das atividades experimentais.

E a todos que de alguma forma contribuíram para que esse trabalho e o aprendizado a ele vinculado fossem possíveis, mesmo que não tenham sido aqui citados.

MUITO OBRIGADO A TODOS.

*You can choose a ready guide
In some celestial voice
If you choose not to decide
You still have made a choice
You can choose from phantom fears
And kindness that can kill
I will choose a path that's clear
I will choose free will.*

Rush – Freewill

Resumo da dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da URI Erechim como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Alimentos.

MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DE PRESUNTO

Gustavo de Pinho Oliveira

Julho/2016

Orientadores: Profa. Dra. Mónica B. Alvarado Soares

Prof. Dr. Marcelo Mignoni

Coorientador: Prof. Dr. Weber da Silva Robazza

Resumo:

Dentre os produtos cárneos industrializados o presunto é considerado um dos mais nobres, sendo amplamente consumido e apreciado pela população mundial. Seu processamento envolve várias etapas, dentre as quais o resfriamento desempenha papel de fundamental importância principalmente na segurança microbiológica. Nesse contexto, a modelagem matemática apresenta-se como uma ferramenta valiosa em processos de resfriamento, pois permite avaliar as variáveis e parâmetros do processo, possibilitando a obtenção de condições ótimas de operação com redução de perdas e aumento da qualidade e da segurança do produto. Desta forma, o objetivo do presente estudo foi desenvolver e validar um modelo matemático para o processo de resfriamento de presunto em tanques de resfriamento. Os ensaios experimentais de resfriamento foram conduzidos em tanques em aço inox utilizando injeção de água resfriada proveniente de um sistema de refrigeração indireto. O controle de temperatura nos tanques foi realizado através de sensores termopares PT100 e os dados experimentais foram coletados com o equipamento *data logger* utilizando sondas em três pontos no interior da peça: centro radial; superfície da peça e uma posição intermediária entre os dois pontos. Para a simulação dos dados experimentais foi utilizado um modelo de balanço de energia. O modelo discretizado e adimensionalizado obtido foi implementado no software MathWorks® Matlab e o sistema foi resolvido pelo método numérico de Runge-Kutta. Foram realizadas simulações do modelo matemático na temperatura da água de resfriamento constante e com a temperatura da água de resfriamento em dois patamares para verificar se atendia as diretrizes recomendadas pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos através do Serviço de Segurança e Inspeção de Alimentos (*United States Department of Agriculture – Food Safety and Inspection Service – USDA-FSIS*). Os resultados mostraram que o modelo obtido representou adequadamente processo de resfriamento de presunto em tanques. Os coeficientes de determinação R^2 obtidos para todos os testes apresentaram valores superiores a 0,96 confirmando que o modelo

estudado é adequado para representar o comportamento experimental. Na simulação do modelo para adequação às recomendações do USDA-FSIS foi verificado que a utilização da temperatura da água de resfriamento em dois patamares mostrou-se mais adequada para a operação em escala industrial devido a melhora na eficiência energética. Para atender as diretrizes pode-se trabalhar com a temperatura de 12 °C na primeira etapa e, após o produto atingir 26 °C no núcleo, reduz-se a temperatura da água de resfriamento a temperatura de 1 a 2,5 °C, até atingir 4,4 °C no núcleo. Os resultados obtidos no presente estudo trazem informações relevantes e contribuem com o meio científico e também com o meio industrial.

Palavras-chave: Modelagem matemática; Resfriamento; Presunto.

Abstract of the dissertation presented to the Graduate Program in Food Engineering at URI University, in the city of Erechim as part of the requirements for the degree of Master in Food Engineering.

MATHEMATICAL MODELING OF THE COOLING PROCESS OF HAM

Gustavo de Pinho Oliveira

July/2016

Advisors: Prof. Dra. Mónica B. Alvarado Soares

Prof. Dr. Marcelo Mignoni

Prof. Dr. Weber da Silva Robazza

Abstract:

Among the processed meat products, ham is considered one of the noblest and is widely consumed and enjoyed by the world population. Its processing involves several steps, among which, the cooling plays a fundamental role especially in microbiological safety. In this context, mathematical modeling is presented as a valuable tool in cooling processes as it allows to evaluate the variables and parameters of the process obtaining optimal operating conditions to reduce losses and increase the quality and product safety becomes possible. Thus, the aim of this study was at developing and validating a mathematical model for the cooling process of ham in cooling tanks. The cooling tests were carried out in stainless steel tanks using injection of cooled water from an indirect cooling system. The temperature control in the tanks was performed by thermocouples PT100 sensors and experimental data were collected with the data logger equipment using probes at three points inside the part: radial center; workpiece surface and an intermediate position between the two points. An energy balance model was used for the simulation of the experimental data. The discretized and adimensionalized model obtained was implemented within the software MathWorks[®] Matlab and the system was solved by the numerical method of Runge-Kutta. The mathematical model simulations were performed at constant temperature of cooling water and the cooling water temperature on two levels to verify if it met the guidelines recommended by the United States Department of Agriculture – Food Safety and Inspection Service (USDA-FSIS). The results obtained showed that the model adequately represented ham cooling process in tanks. The R^2 coefficient of determination obtained for all tests showed values above 0.96 confirming that the studied model is suitable to represent the experimental behavior. During the simulation of the model to suit USDA-FSIS recommendations, the use of cooling water temperature in two levels was found to be more suitable for operation on an industrial scale due to improved energy efficiency. In order to meet guidelines it is possible to work with temperature of 12 °C in the first stage, and after the product reaches 26 °C at the core, the temperature of the cooling water must be reduced into 1 to 2.5 °C, until it reaches

4.4 °C at the core. The results obtained in this study provide relevant information and contribute to the scientific community and with the industrial environment.

Keywords: Mathematical modeling; Cooling; Ham.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo mundial de carne suína (2014)	21
Figura 2: Evolução do consumo de carne suína no Brasil	22
Figura 3: Fluxograma do processamento de presunto.....	24
Figura 4: Peça de presunto embutida	49
Figura 5: Peça de presunto enformada	49
Figura 6: Distribuição das formas na gaiola (vista frontal).....	50
Figura 7: Distribuição das formas na gaiola (vista lateral)	50
Figura 8: Representação do sistema de circulação de água nos tanques de resfriamento	52
Figura 9: Representação do sistema de refrigeração para resfriamento da água	53
Figura 10: <i>Data logger</i> Datapaq® Multipaq21	54
Figura 11: Projeto do equipamento para acomodação do <i>data logger</i> e sondas	55
Figura 12: Nichos para acomodação das sondas	55
Figura 13: Representação 3D do equipamento	56
Figura 14: Fotos do equipamento confeccionado	56
Figura 15: Esquema de tomada de dados amostrais no interior da peça.....	57
Figura 16: Representação das posições das peças nas gaiolas: (a) Teste 1; (b) Teste 2; (c) Teste 3	58
Figura 17: Resumo do arranjo dos testes	59
Figura 18: Volume de controle e suas coordenadas representando a peça de presunto	60
Figura 19: Representação da malha bidimensional.....	64
Figura 20: Detalhamento da malha bidimensional com a distribuição dos pontos.....	64

Figura 21: Homogeneidade da temperatura da água durante o processo de resfriamento	70
Figura 22: Comparação das temperaturas experimentais e os valores calculados para o resfriamento no Teste 1 – a_{23}	71
Figura 23: Comparação das temperaturas experimentais e os valores calculados para o resfriamento no Teste 1 – a_{43}	72
Figura 24: Comparação das temperaturas experimentais e os valores calculados para o resfriamento no Teste 2 – b_{43}	72
Figura 25: Comparação das temperaturas experimentais e os valores calculados para o resfriamento no Teste 2 – b_{73}	73
Figura 26: Comparação das temperaturas experimentais e os valores calculados para o resfriamento no Teste 3 – c_{45}	73
Figura 27: Comparação das temperaturas experimentais e os valores calculados para o resfriamento no Teste 3 – c_{41}	74
Figura 28: Teste de sensibilidade para a difusividade térmica	75
Figura 29: Diferenças médias de temperaturas entre os dados experimentais e os valores calculados	76
Figura 30: Simulação do resfriamento com apenas um patamar de temperatura	78
Figura 31: Simulação com a água de resfriamento em dois patamares de temperatura	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características físico-químicas obrigatórias para presuntos.....	23
Tabela 2: Categorias nas quais equações diferenciais parciais lineares de segunda ordem em duas variáveis podem ser classificadas.....	44
Tabela 3: Dados de dimensões e quantidade de peças por gaiola	51
Tabela 4: Relação sonda/posição na gaiola	58
Tabela 5: Condições para realização das simulações	66
Tabela 6: Resultado do teor de umidade para as amostras de presunto	69
Tabela 7: Coeficientes de determinação R^2	75
Tabela 8: Avaliação do modelo em diferentes seções/posições do produto na gaiola..	77
Tabela 9: Simulação com a temperatura da água de resfriamento constante	79
Tabela 10: Simulação com a utilização de dois patamares de temperatura	81

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a23	Teste 1 – Posição (2,3)
a43	Teste 1 – Posição (4,3)
ABPA	Associação Brasileira de Proteína Animal
AOAC	<i>Association of Analytical Communities</i> (Associação de Comunidades de Análise)
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado)
b43	Teste 2 – Posição (2,3)
b73	Teste 2 – Posição (4,3)
BEM	<i>Boundary Element Methods</i> (Métodos dos Elementos de Contorno)
BRIC	Brasil, Rússia, Índia e China
c41	Teste 3 – Posição (4,1)
c45	Teste 3 – Posição (4,5)
CHN	República Popular da China
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Auxiliado por Computador)
EUR28	União Europeia
ETA	Estação de Tratamento de Água
FDM	<i>Finite Differences Method</i> (Método das Diferenças Finitas)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método dos Elementos Finitos)
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
FVM	<i>Finite Volume Methods</i> (Método do Volume Finito)
HACCP	<i>Hazard Analysis and Critical Control Point</i> (Análise de Perigos e Controle de Pontos Críticos)

JPN	Japão
LF	Limite final de temperatura (4,4 °C)
LTI	Limite de temperatura inferior da faixa 54 a 26 °C
LTS	Limite de temperatura superior da faixa 54 a 26 °C
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MATLAB	MATrix LABoratory
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i> (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico)
ode	<i>Ordinary Differential Equations</i> (Equações Diferenciais Ordinárias)
P1	Forma adaptada 1
P2	Forma adaptada 2
P1+P2	Formas adaptadas para coleta de dados (equipamento)
pde	<i>Partial Differential Equations</i> (Equações Diferenciais Parciais)
PFHE	<i>Plate and Frame Heat Exchanger</i> (Trocador de Calor a Placas com Gaxetas)
PHE	<i>Plate Heat Exchanger</i> (Trocador de Calor a Placas)
PHL	República das Filipinas
ppm	Partes por milhão
RMSE	<i>Root-mean-square error</i> (raiz do erro médio quadrático)
RTE	<i>Ready to Eat</i> (Pronto para o Consumo)
RTIQ	Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade
RUS	Federação Russa
SI	Sistema Internacional de Unidades

USDA-FSIS *United States Department of Agriculture – Food Safety and
Inspection Service* (Departamento de Agricultura dos Estados
Unidos – Serviço de Segurança e Inspeção de Alimentos)

VNM República do Vietnã

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
α	Difusividade térmica	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
η_x	Variável adimensionalizada x	-
η_y	Variável adimensionalizada y	-
ρ	Densidade	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Bi	Número adimensional de Biot	-
C_p	Calor específico	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
h	Coeficiente de transferência de calor convectivo,	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
k	Condutividade térmica	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
L	Dimensão característica	m
L_t	Dimensão da região quadrática da peça de presunto	-
LTS	Limite de temperatura superior	$^\circ\text{C}$
LTI	Limite de temperatura intermediária	$^\circ\text{C}$
LF	Limite final	$^\circ\text{C}$
N	Quantidade de pontos internos para um eixo da malha	-
N_{pontos}	Quantidade de pontos internos da malha	-
\dot{q}	Taxa de geração volumétrica de calor	$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$
R^2	Coeficiente de determinação	-
t	Tempo do processo	min
t_0	Instante inicial	-
$t^{2^\circ\text{Pat}}$	Tempo do início do segundo patamar de temperatura.	min
T_{calc}	Temperatura calculada	$^\circ\text{C}$

\bar{T}_{calc}	Média das temperaturas calculadas	°C
T_{exp}	Temperatura experimental	°C
\bar{T}_{exp}	Média das temperaturas experimentais	°C
T_{H2O}	Temperatura da água de resfriamento	°C
$T_{H2O}^{1°Pat}$	Temperatura da água no primeiro patamar	°C
$T_{H2O}^{2°Pat}$	Temperatura da água no segundo patamar	°C
T_{in}	Temperatura inicial	°C
T	Temperatura	°C
$T_{Cen\ Calc}$	Temperatura no núcleo (centro) da peça de presunto (calculada)	°C
$T_{Cen\ Exp}$	Temperatura no núcleo (centro) da peça de presunto (experimental)	°C
$T_{Int\ Calc}$	Temperatura na posição intermediária da peça de presunto (calculada)	°C
$T_{Int\ Exp}$	Temperatura na posição intermediária da peça de presunto (experimental)	°C
$T_{Sup\ Calc}$	Temperatura na superfície da peça de presunto (calculada)	°C
$T_{Sup\ Exp}$	Temperatura na superfície da peça de presunto (experimental)	°C
U	Umidade	%
\dot{v}	Vazão de água de resfriamento no tanque	m ³ .s ⁻¹
V	Volume do tanque	m ³
$\frac{\partial T}{\partial t}$	Derivada parcial temporal da temperatura	°C.s ⁻¹
$\frac{\partial T}{\partial x}$	Derivada parcial da temperatura no eixo x	°C.m ⁻¹
$\frac{\partial T}{\partial y}$	Derivada parcial da temperatura no eixo y	°C.m ⁻¹
$\frac{\partial T}{\partial z}$	Derivada parcial da temperatura no eixo z	°C.m ⁻¹

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	PROCESSAMENTO TECNOLÓGICO DA CARNE.....	20
2.2	PRODUÇÃO DE PRESUNTO.....	21
2.3	PROCESSAMENTO DE PRESUNTO.....	23
2.3.1	Seleção da matéria-prima.....	24
2.3.2	Moagem ou cominuição.....	25
2.3.3	Mistura.....	25
2.3.4	Tambleamento/Massageamento.....	26
2.3.5	Cura.....	26
2.3.6	Embutimento.....	27
2.3.7	Cozimento.....	27
2.3.8	Resfriamento.....	28
2.3.9	Embalagem.....	28
2.4	PROCESSOS TÉRMICOS NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS.....	28
2.4.1	Resfriamento.....	29
2.5	TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	33
2.6	PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS.....	34
2.6.1	Coeficiente de Transferência de Calor.....	35
2.6.2	Massa específica.....	36
2.6.3	Condutividade térmica.....	36
2.6.4	Calor específico.....	36
2.6.5	Difusividade térmica.....	37
2.7	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	38
2.7.1	Equações diferenciais.....	41
2.7.2	Método das diferenças finitas.....	45
2.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	47
3.1	DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α).....	47
3.1.1	Cálculo da Difusividade Térmica (α).....	47
3.1.2	Obtenção do Teor de Umidade.....	47
3.2	DADOS EXPERIMENTAIS DO PROCESSO.....	48
3.2.1	Processo de Preparo, Embutimento e Enformagem.....	48
3.2.2	Cozimento e Resfriamento.....	51
3.2.3	Desenvolvimento de Equipamento de Proteção para o <i>Data Logger</i>	53

3.2.4	Coleta de Dados Experimentais.....	57
3.2.5	Homogeneidade da Temperatura da Água de Resfriamento.....	59
3.3	MODELAGEM MATEMÁTICA	59
3.3.1	Balço de Energia.....	59
3.3.2	Definição das Condições Para Resolução	61
3.3.3	Modelo.....	62
3.3.4	Adimensionalização das Variáveis Espaciais.....	63
3.3.5	Definição da Malha do Problema	63
3.3.6	Discretização por Diferenças Finitas.....	65
3.3.7	Implementação do Modelo no Software MathWorks® Matlab para Resolução	65
3.3.8	Validação do Modelo.....	66
3.3.9	Teste de sensibilidade para a difusividade térmica (α).....	67
3.3.10	Simulação Utilizando o Modelo	67
3.3.10.1	Simulação da Operação Considerando Temperatura de Resfriamento Constante	67
3.3.10.2	Simulação da Operação com Patamares de Temperaturas de Resfriamento Distintas	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
4.1	DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α).....	69
4.1.1	Obtenção do Teor de Umidade.....	69
4.1.2	Determinação da Difusividade Térmica.....	69
4.2	MODELAGEM MATEMÁTICA	70
4.2.1	Homogeneidade da temperatura da água de resfriamento.....	70
4.2.2	Validação do modelo.....	71
4.2.3	Teste de sensibilidade para a difusividade térmica (α).....	75
4.2.4	Diferenças de temperatura entre os dados experimentais e os valores calculados	76
4.2.5	Simulação da Operação para Adequação às Recomendações do USDA-FSIS	77
4.2.5.1	Simulação da Operação com Temperatura da Água de Resfriamento Constante	78
4.2.5.2	Simulação da Operação com Temperatura da Água de Resfriamento em Dois Patamares	80
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, verifica-se uma crescente demanda dos consumidores por alimentos com boa qualidade, que sejam frescos e convenientes para serem consumidos (BARBA et al., 2013). Entre os produtos cárneos prontos para o consumo (*RTE – Ready to Eat*) o presunto ganha destaque em todo o mundo devido sua alta qualidade, vida de prateleira apropriada, alto valor nutritivo e propriedades sensoriais que são apreciados por pessoas de todas as idades e classes (BENET et al., 2016; DUSCOVÁ et al., 2016).

A qualidade e as características do presunto são influenciadas por vários fatores, que vão desde o tipo de matéria-prima utilizada até o processamento tecnológico envolvido (TOMOVIC et al., 2013). Sua tecnologia de fabricação envolve várias etapas, dentre as quais, o processo de resfriamento desempenha papel de fundamental importância não apenas na qualidade microbiológica, mas também nas características tecnológicas, nutricionais e sensoriais do produto (VÁLKOVÁ et al., 2007; LLORET et al., 2016).

De acordo com Zhang et al. (2013) e Cepeda et al. (2013), independentemente dos métodos de preparação e procedimentos alimentares usados, o resfriamento rápido logo após o cozimento é essencial para fornecer produtos com melhor qualidade e segurança microbiológica para o consumidor. O tempo para reduzir a temperatura de 40 °C a 15 °C durante o resfriamento deve ser mais curta possível para evitar qualquer possibilidade de bactérias ou esporos de bactérias se desenvolverem. Ainda, segundo diretrizes estabelecidas pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos através do Serviço de Segurança e Inspeção de Alimentos (*United States Department of Agriculture – Food Safety and Inspection Service – USDA-FSIS*), o resfriamento de produtos cárneos deve ser realizado de forma contínua durante todo o processo, evitando tempo de residência na faixa de 54 a 26 °C, uma vez que nesta faixa de temperatura ocorre o crescimento mais rápido do gênero *Clostridium* (USDA-FSIS, 1999b).

Na indústria, os gastos energéticos com o tratamento térmico como cozimento e resfriamento são elevados, o que torna cada vez mais acentuada a necessidade de melhoria dos processos, de modo que os recursos sejam utilizados em sua capacidade máxima e em condições ótimas. Uma ferramenta eficiente e poderosa para simular os processos de resfriamento na indústria de alimentos de forma a aperfeiçoá-los e/ou otimizá-los é a modelagem matemática (WANG; SUN, 2002; ZEFERINO, 2016).

De acordo com Garcia (2009) e Drummond e Sun (2012), a modelagem matemática estabelece relação entre as variáveis do processo possibilitando a predição e a interpretação de sistemas, controle de estratégias de desenvolvimento, simulação de comportamento do sistema com diferentes condições operacionais, podendo levar a uma melhor compreensão dos efeitos dos parâmetros do processo sob os atributos finais de produtividade, redução de perdas e o aumento da qualidade e da segurança do produto.

Os modelos matemáticos podem ser usados para produzir informações valiosas sobre os processos de resfriamento de alimentos em condições experimentais gerais dentro de um curto espaço de tempo, permitindo uma maior aproximação do processo real e conseqüentemente, a otimização das condições operacionais (WANG; SUN, 2002; DANTAS et al., 2011).

Embora o presunto seja um dos produtos mais populares do mundo, pesquisas sobre modelagem matemática e simulação de processos sobre resfriamento dos mesmos são pouco exploradas, sendo que muitas vezes os modelos existentes estão sujeitos a simplificações que limitam a sua aplicabilidade na indústria. Neste contexto, o objetivo do presente estudo envolve o desenvolvimento e validação de um modelo matemático para o processo de resfriamento de presunto em tanques de resfriamento. Para tanto, algumas metas ou objetivos específicos foram traçados para o trabalho realizado no resfriamento de presuntos em tanques:

- Obter dados experimentais do processo;
- Desenvolver um equipamento de proteção para o *data logger* durante a coleta dos dados experimentais;
- Determinar a difusividade térmica do presunto;
- Desenvolver um modelo matemático para o processo;
- Validar o modelo matemático do processo de resfriamento de presunto em tanques de resfriamento;
- Simular o processo de resfriamento utilizando o modelo desenvolvido de acordo com as diretrizes preconizadas pelo USDA-FSIS.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item será apresentada uma breve revisão da literatura sobre o processamento de presunto. Também será abordado uma breve introdução dos processos térmicos aplicados em indústrias, com ênfase no resfriamento, o qual desempenha papel fundamental principalmente em indústrias cárneas. Por fim, uma descrição sobre transferência de calor, propriedades termofísicas e princípios de modelagem matemática.

2.1 PROCESSAMENTO TECNOLÓGICO DA CARNE

A tecnologia de alimentos está em constante evolução para melhorar a qualidade, a higiene e as propriedades nutricionais dos alimentos, além de atender as demandas industriais e também dos consumidores. Nos últimos tempos a sociedade vem mudando seus hábitos alimentares e as pessoas estão consumindo quantidades cada vez mais crescentes de alimentos prontos para o consumo (BARBA et al., 2013). Dentre produtos prontos para o consumo, os produtos cárneos se apresentam como excelente alternativa para o mercado.

De acordo com Pardi et al. (1996), os produtos cárneos processados podem ser definidos como aqueles em que as propriedades originais da carne fresca foram modificadas por tratamento químico, físico, biológico, ou ainda através da combinação destes métodos. Geralmente o processo envolve cortes mais ou menos intensos, com adição de condimentos, especiarias e aditivos diversos. Terra (1998), afirma que os processos utilizados têm como objetivo o prolongamento da vida comercial dos produtos, atuando de modo a anular a ação de enzimas e micro-organismos, o desenvolvimento de novos sabores além da utilização de partes do animal de difícil comercialização no seu estado fresco.

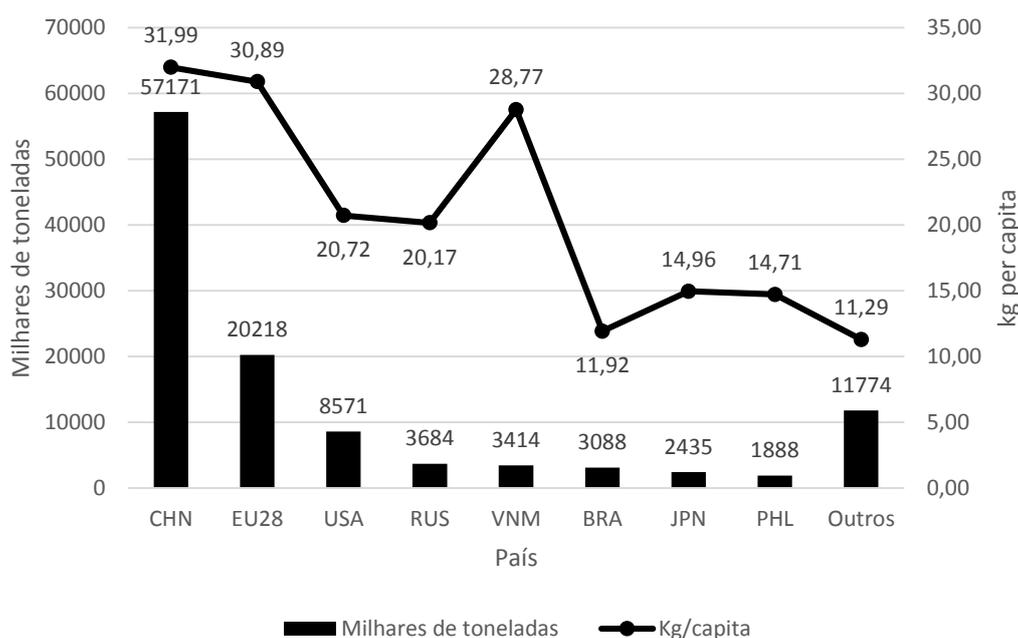
Os produtos cárneos tratados pelo calor são elaborados à base de carne e/ou miúdos comestíveis acrescidos ou não de especiarias e condimentos e submetidos à ação do calor, alcançando, em seu interior, temperatura suficiente para conseguir a coagulação total das proteínas cárneas. Nesse grupo, encontra-se produtos como mortadelas, salsichas e presunto cozido (ORDÓÑEZ, 2005). Os diferentes processos aplicados à carne requerem conhecimento de sua composição química e das propriedades físicas e funcionais das substâncias que as compõem (PEREDA et al., 2005).

2.2 PRODUÇÃO DE PRESUNTO

A carne suína é a fonte de proteína animal mais consumida no mundo, sendo que metade da produção é realizada na China, ao passo que o restante é basicamente dividido entre União Europeia, Estados Unidos e Brasil (AGDI, 2012). Em 2014, o Brasil exportou 3.344 mil toneladas de carne suína, ocupando a quarta colocação no ranking mundial (ABPA, 2015).

Na Figura 1 observa-se o comportamento do consumo mundial de carne suína em 2014, de acordo com a *OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development* (OCDE – Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico). A China lidera o consumo mundial, com aproximadamente 32 kg per capita, ao passo que, no Brasil, o consumo em 2014 ficou próximo de 12 kg per capita, situando-se como o sexto maior consumidor de carne suína em valores absolutos.

Figura 1: Consumo mundial de carne suína (2014)

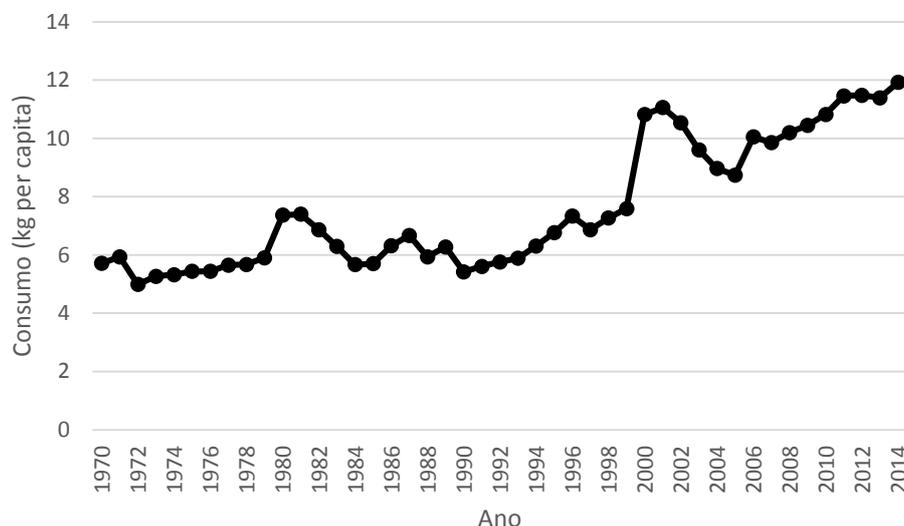


Fonte: Adaptado de OECD (2016)

A grande variedade de produtos elaborados com carne suína, representados pelos embutidos, defumados, pré-cozidos e produtos semiprontos, faz com que esses produtos atinjam consumidores de todas as classes socioeconômicas e que sempre esteja presente à mesa do consumidor brasileiro (THOMS et al., 2010).

Na Figura 2, constata-se a evolução do consumo de carne suína no Brasil, desde a década de 70, incluindo os produtos processados obtidos através desta matéria-prima.

Figura 2: Evolução do consumo de carne suína no Brasil



Fonte: Adaptado de OECD (2016)

Dentre os produtos cárneos industrializados, um dos mais encontrados à disposição no mercado é o presunto, sendo este considerado um dos produtos mais nobres da indústria cárnea, amplamente consumido e apreciado pela população mundial devido sua alta qualidade, vida de prateleira conveniente, além do valor nutritivo e atributos sensoriais apreciados (TERRA, 1998; COSTA et al., 2007; FACHINELLO, 2013; TOMOVIC et al., 2013; BENET et al., 2016). O consumo de presunto cozido é relativamente alto, uma vez que é um produto cárneo muito popular sendo responsável por quase 26% dos produtos de charcutaria vendidos na Europa, sendo França, Espanha e Itália grandes consumidores (CASIRAGHI et al., 2007).

Segundo Feiner (2006), na Inglaterra, o termo *presunto* refere-se apenas ao produto obtido de carne suína, no entanto, no resto do mundo é usado para muitos produtos que são adicionados de salmoura e elaborados com carne em pequenos pedaços. Em países onde não é possível o consumo de carne suína, como os países islâmicos, diferentes tipos de presunto são elaborados com carnes de várias espécies. Mendonza et al. (2009), cita que já existem no mercado uma variedade de presuntos de peru e frango, o quais são elaborados a partir de carne da coxa ou do peito destas aves.

No Brasil, de acordo com a Instrução Normativa Nº 20, de 31 de julho de 2000, que aprova os Regulamentos Técnicos de Identidade e Qualidade (RTIQ) de almôndega,

apresentado, fiambre, hambúrguer, quibe, presunto cozido e de presunto, entende-se por presunto cozido o produto cárneo industrializado obtido exclusivamente com o pernil de suínos, desossado, adicionado de ingredientes, e submetido a um processo de cozimento adequado (BRASIL, 2000). Como ingredientes obrigatórios tem-se a carne de pernil de suíno, sal, nitrito e/ou nitrato de sódio e/ou potássio em forma de salmoura. Os ingredientes considerados opcionais são: proteínas de origem animal e/ou vegetal, açúcares, maltodextrina, condimentos, aromas, especiarias e aditivos intencionais. Permite-se ainda, a adição de proteínas não cárneas na forma agregada de 2,0% (máximo) (BRASIL, 2000).

A Tabela 1 apresenta as características físico-químicas obrigatórias para presuntos segundo Padrão de Identidade e Qualidade para Presunto Cozido (BRASIL, 2000).

Tabela 1: Características físico-químicas obrigatórias para presuntos

Características Físico-químicas	Quantidade permitida	Valor (%)
Carboidratos totais	Máximo	2,0
Relação Umidade:Proteína	Máximo	5,2
Proteína	Mínimo	14

Fonte: Adaptado de BRASIL (2000)

A composição do presunto cozido apresenta variações no mundo todo, sendo variações em função das tecnologias de produção, matérias-primas e condições utilizadas, as quais são muito diversificadas no mundo inteiro (TOLDRÁ; REIG, 2016).

De acordo com Lloret et al. (2016), a aceitação pelos consumidores de presunto cozido está fortemente relacionada com a aparência visual, dos quais a cor, o marmoreio e a sinérese são os principais parâmetros avaliados. Ainda de acordo com esses autores, na Europa, o presunto é um produto altamente consumido devidos aos seus atributos sensoriais e também devido a sua conveniência. Para Duscová et al. (2016), além das propriedades sensoriais os consumidores apreciam este produto devido ao seu alto teor de proteínas e baixo percentual de gordura.

2.3 PROCESSAMENTO DE PRESUNTO

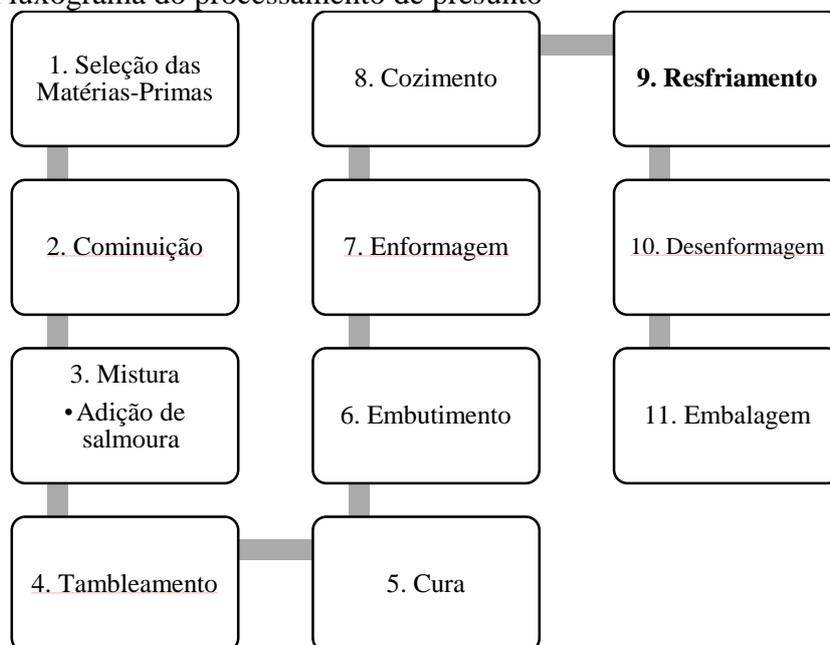
A tecnologia de fabricação do presunto cozido evoluiu muito com o passar do tempo, apresentando um marco altamente significativo na década de 80 com o

aparecimento do processo *cook-in*. Nesse processo, a peça cárnea é cozida dentro da embalagem de comercialização, possibilitando o aumento de vida de prateleira (TERRA, 1998).

A qualidade e características do presunto cozido é influenciada por vários fatores, que incluem a seleção e qualidade das matérias-primas, teor de gordura, nível de composição, injeção de salmoura e processamento tecnológico envolvido (TOMOVIC et al., 2013; LLORET et al., 2016).

As etapas básicas do processamento de presunto que serão descritas nos tópicos são: seleção da matéria-prima, moagem, mistura, tambleamento, cura, embutimento, enformagem, cozimento, resfriamento e acondicionamento e o fluxograma do processamento pode ser visualizado na Figura 3:

Figura 3: Fluxograma do processamento de presunto



Fonte: O autor.

2.3.1 Seleção da matéria-prima

De acordo com o RTIQ, o presunto cozido é obtido dos cortes do membro posterior do suíno, desossado ou não (BRASIL, 2000). Para Terra (1998), é indispensável que após a desossa, as porções musculares sofram a limpeza com a retirada da gordura, do tecido conectivo, couro, nódulos e tendões. Segundo Ordóñez (2005), a limpeza facilitará a liga e união dos pedaços de carne nas etapas subsequentes do processamento.

Outro fator importante é a temperatura da carne, sendo recomendadas temperaturas máximas de 8 °C para a matéria-prima, com objetivo de garantir a qualidade microbiológica e evitar posteriormente o aumento excessivo da temperatura da massa o que provocaria liberação de gordura e desnaturação de proteínas devido à redução de estabilidade da massa (ORDÓÑEZ, 2005).

Após a preparação da carne, elabora-se a salmoura fria (± 4 °C), sendo esta etapa uma parte fundamental para o processo, pois os ingredientes que compõem a salmoura respondem significativamente pela qualidade final do produto. Esta deve ser preparada em tanques dotados de sistema de agitação e refrigeração (TERRA, 1998).

A adição da salmoura pode ser feita por injeção ou por marinação dos pedaços de carne. No sistema de injeção, a salmoura é bombeada para o interior da carne através de um sistema de agulhas, onde o produto segue por uma esteira e o sistema de agulhas possui movimento automático de sobe e desce injetando a salmoura entre as fibras da carne (BRESSAN; PEREZ, 2001). A salmoura também pode ser adicionada diretamente ao misturador de pás, onde já está a matéria-prima.

2.3.2 Moagem ou cominuição

Dependendo do tipo de presunto e do tipo de matéria-prima cárnea, os cortes podem passar pelo processo de moagem.

A redução do tamanho das partículas de carne, também chamada de trituração, moagem ou cominuição é uma das operações mais utilizadas na elaboração de produtos cárneos. A moagem consiste na subdivisão da matéria-prima em partículas, proporcionando melhor homogeneização do produto final e maior exposição das proteínas (GONÇALVES, 2002; WEISS et al., 2010). São utilizados discos de diferentes diâmetros, de acordo com o produto final desejado. O presunto pode sofrer uma maior ou menor cominuição, de acordo com a característica desejada para o produto acabado.

2.3.3 Mistura

A mistura pode ser definida como operação unitária na qual uma mistura homogênea é obtida de dois ou mais componentes, pela dispersão de um ou outro (FELLOWS, 2006). É geralmente realizada em um equipamento denominado misturadeira ou misturador, onde permanece por tempo suficiente para que ocorra a

completa incorporação de todos os ingredientes (aditivos e conservantes) da formulação (ROÇA, 2000).

O processo físico de mistura é empregado para extrair proteínas solúveis em sal, melhorar e acelerar a cura pela distribuição uniforme dos ingredientes por todo o produto. Misturadores geralmente têm algum tipo de sistema de pás que giram em torno de um eixo de metal e podem ou não ser equipados para realizar vácuo (HUI, 2012). Para Katsaras e Budras (1993), a temperatura ideal de mistura encontra-se na faixa entre 4 a 8 °C. Temperaturas mais elevadas representam risco de contaminação podendo levar ao excesso de extração e ao ressecamento da superfície da carne.

2.3.4 Tumbleamento/Massageamento

A operação de tumbleamento ou massageamento passou a ser aplicado como regra na elaboração de produtos curados de suínos. É definido como a operação mecânica que distribui a salmoura, aumentando a migração dos ingredientes de cura entre as fibras musculares e causando a extração de proteínas. Durante esta operação a carne sofre repetidos golpes entre as peças e contra as paredes do próprio rotor em giro. Há extravasamento principalmente da miosina que vem à superfície, aumentando a capacidade de retenção de água. O processo rompe também a camada de colágeno que protege os músculos permitindo a ligação entre as fibras de diferentes músculos (PARDI, 1996; LAWRIE, 2005; LLORET et al., 2016).

As operações de tumbleamento melhoram o rendimento de cozimento, o desenvolvimento da cor, firmeza e o fatiamento do produto acabado. De um modo geral, o tumbleamento aumenta o rendimento de cozimento de carnes injetadas quando em comparação com carnes injetadas que não tenha sido tumbleadas (FEINER, 2006).

As principais vantagens do tumbleamento são a melhor penetração da salmoura; a maior uniformidade da cor; o aumento da liberação das proteínas das fibras musculares solúveis no sal o que resulta na melhoria da liga do produto; o rendimento mais uniforme e o melhor fatiamento (PARDI, 1996).

2.3.5 Cura

A preservação pela cura com sal é muito antiga. Há relatos de sua utilização pelos egípcios por volta de 2000 A.C. Processos de cura de alimentos incluem processos de

preservação como secagem, salga e defumação. Para os produtos à base de carne, o termo *curado* agora é geralmente considerada como significando para “conservado com sal e nitrito” (RANKEN, 2000). Uma definição mais atual de cura pode ser aquela em que há a adição de sal e nitrato e/ou nitrito à carne produzindo a cor e o sabor que nós associamos com carnes curadas (HUI, 2012). Já a definição dada por Lawrie (2005) é que a operação de cura ou maturação refere-se à conservação por adição de sal, compostos fixadores de cor (nitratos e/ou nitritos), açúcares e condimentos, onde também é obtida a melhora das propriedades sensoriais, como sabor e aroma agradáveis.

O nitrato e o nitrito são componentes obrigatórios nos processos de cura de carnes processadas. São classificados como conservadores devido à ação sobre o *Clostridium botulinum* e *Clostridium perfringens* e conferem às carnes a coloração rosada característica dos produtos curados, devido à sua ação sobre a mioglobina (PARDI et al., 1996).

2.3.6 Embutimento

Após o processo de cura, o presunto é enviado à máquina de envase, moldagem e selagem. O mecanismo de funcionamento consiste na extração do ar da massa e a introdução da mesma em embalagem previamente selecionada e disposta para esse fim (PRESTES, 2011; ORDOÑEZ, 2005).

Posteriormente ao embutimento, os presuntos são destinados para enformagem onde as peças são colocadas em fôrmas metálicas cuja função é dar forma ao produto final.

2.3.7 Cozimento

O cozimento é um processo aplicado para conferir certa vida de prateleira associado também à destruição de micro-organismos e inativação de enzimas cárneas que poderiam causar posteriores alterações (SILVA, 2000; LI, 2006). Além da destruição de micro-organismos, durante o cozimento, ocorre também o desenvolvimento de características sensoriais desejadas como sabor, textura, e cor no caso de produtos curados e cozidos (LI, 2006).

Conforme Terra (1998) e Bressan e Perez (2001), é recomendado que o cozimento de presuntos seja realizado de forma gradativa. A temperatura da água ou do vapor do

tanque ou estufa de cozimento deve, inicialmente, estar entre 25 e 30 °C acima da temperatura do produto a ser cozido. Essa temperatura será aumentada gradativamente até que a temperatura interna atinja 72 °C em seu interior. Para Olivo (2006), o cozimento escalonado além de diminuir o consumo de energia, evita que o calor excessivo provoque desnaturação da camada proteica mais externa o que formaria uma barreira térmica, impedindo o correto cozimento do produto.

2.3.8 Resfriamento

Após o cozimento, as peças de presunto são resfriadas em tanques ou em túneis de resfriamento até que a temperatura desejada seja atingida em seu interior (TERRA, 1998; BRESSAN; PEREZ, 2001). O resfriamento contribui para a diminuição da energia cinética térmica, facilitando a formação de ligações não covalentes estáveis entre grupos funcionais expostos das diversas moléculas de proteínas que promovem a gelificação que garante a textura do produto (DAMODARAN et al., 2010). O resfriamento com temperatura de 40 a 15 °C é considerado o período mais crítico e deve ser limitado a menos do que 4 h, quando possível (DESMOND et al., 2000). Condições em que haja resfriamento lento podem ser perigosas devido aos longos períodos de temperaturas relativamente altas que micro-organismos podem se desenvolver (TOLDRÁ, 2010).

2.3.9 Embalagem

Após o processo de resfriamento, o produto deve ser embalado em caixas ou sofrer o processo de fatiamento e posterior embalagem, de acordo com o processo e produto requerido. Caso o produto não seja direcionado diretamente para a expedição, é necessário que seja armazenado em ambiente com temperaturas entre 0 e 5 °C para que o produto mantenha as características e propriedades com a qualidade desejada (BRESSAN et al., 2007).

2.4 PROCESSOS TÉRMICOS NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

O processamento térmico da carne se iniciou em eras pré-históricas com a descoberta de que a aplicação de calor melhorava o sabor e estendia a conservação de certas carnes tratadas termicamente (SUN, 2006).

Aplicar o calor a certos alimentos durante um determinado período de tempo possui dois objetivos: desenvolver a qualidade nutricional e/ou sensorial do produto de modo que este seja comestível, melhor digerível e com melhor sabor e estender o prazo de validade do produto (RICHARDSON, 2004).

Conforme Fellows (2006), o tratamento térmico é um dos métodos mais utilizados no processamento de alimentos e também um dos mais importantes sendo amplamente aplicado no processamento de produtos cárneos. Para Doyle et al. (2001) os processos térmicos visam à destruição de micro-organismos patogênicos e é uma das principais técnicas usadas na segurança do consumo de alimentos. Já Hui (2012) afirma que o principal objetivo do tratamento térmico é o de garantir a destruição da maior parte dos agentes patogênicos e inativar as enzimas presentes no alimento, de tal forma a evitar reações de deterioração e proliferação da microflora indesejável.

De acordo com Singh e Heldman (2009), nas plantas de processamento de alimentos, os processos mais comumente encontrados envolvem aquecimento e resfriamento de alimentos. Alguns exemplos típicos são o resfriamento, congelamento, cozimento, esterilização térmica, secagem e evaporação.

Dentre todos os processos, o resfriamento é uma etapa que desempenha grande importância em indústrias de alimentos. De acordo com Ordóñez (2005), no processamento dos alimentos, o frio age de maneira inibitória, no qual as reações químicas, enzimáticas e o crescimento microbiológico são inibidos com a redução da temperatura.

2.4.1 Resfriamento

Em indústrias de carnes, o resfriamento é considerado um ponto crítico de controle, no processamento de carnes bovinas, suínas e de aves, além de produtos cárneos RTE, pois está diretamente ligado a segurança microbiológica e qualidade deste tipo de alimento (WANG; SUN, 2002; CEPEDA et al., 2013). Independentemente de métodos de preparação e procedimentos alimentares usados, o resfriamento rápido após o cozimento é fundamental para fornecer produtos com melhor qualidade sensorial e nutricional, bem como o aumento da vida útil e da segurança microbiológica para o consumidor (ZHANG et al., 2013). Para Drummond e Sun (2012), a temperatura do produto deve ser reduzida rapidamente para minimizar a perda de qualidade e evitar

crescimento de micro-organismos patogênicos formadores de esporos que são capazes de sobreviver ao tratamento por calor aplicado durante o cozimento.

Em 1996, o USDA-FSIS estabeleceu um padrão de desempenho de estabilização para o resfriamento de produtos cárneos RTE. O padrão de desempenho requer que produtos sejam imediatamente resfriados após o cozimento para evitar a germinação e crescimento de *Clostridium botulinum* e para limitar o crescimento de *Clostridium perfringens* a não mais do que uma multiplicação 1-log_{10} (USDA-FSIS, 1999a). Além disso, o USDA-FSIS também emitiu diretrizes de conformidade para o resfriamento de produtos cárneos no qual foram estabelecidos que o mesmo deve ser realizado de forma contínua durante todo o processo. Também deve-se evitar o tempo de residência na faixa de 54 a 26 °C, uma vez esta faixa de temperatura ocorre o crescimento mais rápido do gênero *Clostridium* (USDA-FSIS, 1999b).

A seleção de um método apropriado de resfriamento depende da utilização futura do produto (MITCHELL, 1992) e a conveniência no processo produtivo. Os métodos mais conhecidos e/ou utilizados são o resfriamento utilizando ar frio (*aircooling*), o resfriamento por imersão em água gelada (*hydrocooling*) e o resfriamento a vácuo, sendo que os que mais se destacam são o resfriamento com ar e o resfriamento por imersão em água gelada (NEVES FILHO, 2002).

O resfriamento *hydrocooling* geralmente é utilizado com mais frequência pelas indústrias e utiliza como meio refrigerante a água a baixas temperaturas a fim de remover o calor dos produtos. Este método pode ser realizado através da imersão dos produtos em tanques ou pelo método de aspersão, onde a água é aspergida através de bicos instalados no interior de um túnel de maneira contínua sobre a superfície do produto. Essa água é recolhida através de drenos e recirculada (NEVES FILHO, 2002; TERUEL et al., 2003). O sistema geralmente é mais eficiente por imersão, quando a água a baixa temperatura circula ao redor de cada produto, fazendo com que a temperatura da superfície rapidamente se torne semelhante à temperatura da água. O tempo de resfriamento depende das dimensões do produto (BECKER; FRICKE, 2002). Para Lucas e Raoult-Wack (1998), este tipo resfriamento pode ser utilizado também como pré-tratamento antes do produto ser congelado por algum outro processo como, por exemplo, congelamento utilizando ar forçado como meio de resfriamento.

No resfriamento com ar frio *aircooling*, os alimentos atravessam um túnel de ar forçado, onde o ar resfriado entra em contato com a embalagem do produto, permitindo a transferência de calor (NEVES FILHO, 2002; TERUEL et al., 2003). Além da diferença

de temperatura, os fatores que influenciam a taxa e tempo de resfriamento por ar forçado, são: a área de superfície de contato do meio de resfriamento com o produto, características e geometria do produto, calor específico, fluxo e velocidade do ar de resfriamento e disposição orientação do produto a ser resfriado (LAGUERRE et al., 2006; BARBIN et al., 2009). Segundo Vigneault et al. (1994), o resfriamento com ar forçado tem custo inferior quando comparado ao resfriamento por imersão em água gelada, contudo exige duas a três vezes mais tempo para atingir a mesma temperatura.

Teruel et al. (2002), avaliaram a transferência de calor durante o resfriamento de laranjas com ar forçado e com água, utilizando o método de volumes finitos. O objetivo foi determinar o coeficiente convectivo de transferência de calor. Os resultados obtidos demonstraram que os experimentos realizados com água obtiveram um tempo de resfriamento de duas a três vezes menores se comparado com o tempo necessário para o resfriamento com ar. Já o coeficiente de transferência de calor, nos experimentos com água, atingiu valores até seis vezes maiores que no resfriamento com ar. Isto está relacionado com a capacidade de transmissão de calor, a qual é muito maior para água que para o ar.

O resfriamento a vácuo remove calor através da evaporação da água, diminuindo significativamente o tempo de resfriamento. A evaporação da água é obtida com a diminuição da pressão dentro do sistema (MCDONALD et al., 2000). Com a redução da pressão na câmara de resfriamento, a água evapora, sendo a energia necessária para evaporá-la fornecida pelo próprio produto, que se resfria (HOUSKA et al., 2003).

Comparado a outros métodos citados, o resfriamento a vácuo é o método mais rápido e com menor consumo de energia (MCDONALD et al., 2000), porém, tendo em vista que o método se baseia em evaporar a água livre do produto sob baixos níveis de pressão, uma perda excessiva de massa é muitas vezes obtida, o que representa um problema significativo para a aplicação deste tipo de técnica na indústria (SCHMIDT; LAURINDO, 2014). Além disso, o custo dos equipamentos envolvidos no resfriamento a vácuo é elevado, o que restringe sua aplicação para muitos tipos de produtos (MCDONALD et al., 2000; SUN, 2000).

De acordo Teruel et al. (2003), geralmente, a eficiência de um sistema de resfriamento está relacionada com a intensidade do processo de transferência de calor e tempo de resfriamento final. Quanto menor for o tempo de resfriamento, maior será a eficiência desse sistema, tendo como resultado produtos que mantêm uma maior qualidade e vida de prateleira. Para Neves Filho (2002), o método de resfriamento rápido

por imersão em um tanque ou por aspersão de água, permite um resfriamento mais eficiente que o sistema que utiliza ar devido ao alto coeficiente de transferência de calor entre a superfície do produto e o filme de água, sendo possível obter uma maior uniformidade da temperatura dos produtos.

Cabe ressaltar que, independentemente do método, a taxa de resfriamento dos produtos é influenciada por diversos fatores como a geometria, o tamanho, a condutividade térmica dos alimentos e a velocidade do meio de resfriamento (WANG; SUN, 2002).

Para Belchior (2012), o tempo de resfriamento dos alimentos é influenciado pela razão entre as resistências à transferência de calor externa e interna e esta razão é definida pelo número de Biot definida pela Equação 1:

$$Bi = \frac{(h \cdot L_c)}{k} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: h é o coeficiente de transferência de calor convectivo ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}$), L_c é o comprimento característico do alimento (m) e k é a condutividade térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$).

Quando o número de Biot tende a zero ($Bi \rightarrow 0$), a resistência interna é muito menor que a resistência externa, sendo, portanto, a resistência à transferência de calor por condução menor que por convecção. A distribuição da temperatura no material é uniforme e um balanço global de energia fornece resultados satisfatórios quando aplicados em procedimentos experimentais (HELDMAN, 1992; BELCHIOR, 2012).

Quando o número de Biot é muito grande, ($Bi \rightarrow \infty$), a resistência interna à transferência de calor é muito maior que a resistência externa e pode-se assumir que a temperatura da superfície seja igual à do meio de resfriamento. Nessa situação, soluções da equação de transferência de calor de Fourier são úteis. Quando o número de Biot está dentro da faixa de $0,1 < Bi < 40$, ambas as resistências, interna e externa, devem ser consideradas e neste caso, soluções de séries que incorporam funções transcendentais pela influência do número de Biot são aplicáveis para formas simples (BELCHIOR, 2012).

O conhecimento das taxas de transferência de calor e massa e dos respectivos coeficientes de trocas térmicas permite a otimização do aporte dos recursos energéticos, o aumento de produtividade, a redução de perdas e o aumento da qualidade e da segurança do alimento. Essas propriedades são fundamentais para a simulação da variação da temperatura no interior dos alimentos, e para as estimativas do tempo e da carga térmica

do produto durante o resfriamento (RESENDE; SILVEIRA, 2002; NECKEL; MARIANI, 2010).

De acordo com Cepeda et al. (2013), algumas vezes, durante o processo de resfriamento, podem ocorrer desvios no processamento do produto devido a interrupções inesperadas de processamento. Estes desvios implicam que as temperaturas do produto não atinjam os parâmetros de tempo e temperatura recomendados, gerando incertezas quanto à segurança microbiológica do produto acabado. Quando ocorrem estes desvios, o produto pode ser recuperado se os resultados da amostragem microbiológica e/ou modelagem matemática garantam a segurança do produto. Dessa forma a modelagem matemática é uma ferramenta útil para avaliar a gravidade do desvio do resfriamento e assim determinar a disposição do produto (CEPEDA et al., 2013).

2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor está associada a uma diferença de temperatura entre duas regiões e é governada pela combinação de várias leis da física. Uma definição simples, mas geral, é: Transferência de calor (ou calor) é energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço (INCROPERA et al., 2014).

São reconhecidos pela literatura três mecanismos ou processos fundamentais para transmissão de calor, podendo ser também referidos como *modos*: condução, convecção e radiação (GUMERATO et al., 2007; INCROPERA et al., 2014).

O principal modo de transferência de calor para a maioria dos métodos de resfriamento na indústria de alimentos, incluindo resfriamento por ar forçado, é por condução de calor a partir do núcleo do alimento para a sua superfície mais fria, e por convecção a partir da superfície do produto para um meio de resfriamento circundante (ZHANG et al., 2013).

A transferência de calor por condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas, de uma substância devido às interações entre partículas (INCROPERA et al., 2014). Assim, a condução consiste na troca de calor entre um fluido e a superfície de um sólido, quando estes estão em contato e se encontram em temperaturas diferentes, provocando, de tal modo, um gradiente de temperatura no interior do sólido e induzindo à transferência de calor (SILVA, 2007).

O modo de transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos. Além de transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão), a energia também é transferida através do movimento global, ou macroscópico do fluido (INCROPERA et al., 2014). A convecção é dita natural quando o movimento do fluido ocorre como resultado somente das diferenças de massa específica causadas pelos gradientes de temperatura. Já a convecção forçada ocorre quando o escoamento do fluido é induzido por agentes externos, tal como uma bomba, por exemplo (SILVA, 2007; INCROPERA et al., 2014).

Para Zach (2006), a taxa de transferência de calor não depende somente do processo ou do equipamento que está sendo empregado, mas também das propriedades termofísicas do produto. Em substâncias heterogêneas, como é o caso de alimentos, em específico os produtos cárneos, os teores de umidade e de gordura e a orientação das fibras são os principais fatores que influenciam nos valores destas propriedades.

Conforme Belchior (2012), para a construção de sistemas de congelamento/resfriamento ou para adaptar ou mudar condições de operação de sistemas já existentes, o conhecimento dos coeficientes de transferência de calor e massa do produto são absolutamente necessários.

2.6 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

O conhecimento das propriedades termofísicas dos alimentos é necessário para o desenvolvimento de cálculos de transferência de calor que estão envolvidos nos projetos dos equipamentos de refrigeração e armazenamento de alimentos. Tais propriedades são essenciais para a simulação da variação da temperatura no interior dos alimentos (RESENDE et al., 2002; MOURA et al., 2003).

Para Neckel e Mariani (2010), devido à grande diversidade de alimentos existentes, a variação de composição entre os diferentes produtos, as diferenças de variedades de um mesmo produto e a grande quantidade de condições possíveis de tratamentos tornam praticamente impossível a determinação experimental e a constituição de um catálogo de propriedades. Assim, modelos matemáticos dependentes da temperatura são desenvolvidos para a predição destas propriedades, geralmente baseados na composição dos alimentos. De acordo com Silva (2007), uma boa parte dos estudos envolvendo o desenvolvimento de modelos matemáticos e medidas

experimentais das propriedades térmicas de alimentos são realizadas utilizando-se sistemas modelos e os resultados são aplicados para alimentos de composição similar.

Os dados precisos das propriedades térmicas dos produtos, tais como condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico, massa específica e de como essas propriedades se comportam durante o processo, em função da temperatura, são essenciais no dimensionamento dos equipamentos utilizados no processamento de alimentos, principalmente os que abrangem a transferência de calor (MOURA, 2003).

As principais propriedades de interesse no processo de resfriamento são: coeficiente de transferência de calor, calor específico, condutividade térmica, difusividade térmica, massa específica e coeficiente convectivo de transferência de calor. Tais propriedades serão discutidas a seguir.

2.6.1 Coeficiente de Transferência de Calor

Apesar do coeficiente de transferência de calor (h) não ser uma propriedade térmica dos alimentos, este é fundamental para projetar equipamentos para alimentos onde se envolve a transferência de calor, bem como para validar estudos gerados, via simulação numérica do processo de resfriamento (ASHRAE, 1993). Para Singh e Heldman (2009), o coeficiente convectivo de transferência de calor é um dado fundamental para o controle de variáveis durante a produção de um produto. Através dele, é possível definir variáveis como tempo e temperatura e então otimizar qualquer processo.

Conforme Gumerato et al. (2007), o coeficiente de transferência de calor depende do valor das propriedades do fluido (densidade, calor específico, viscosidade, condutividade térmica), da velocidade do fluido, da geometria e da rugosidade da superfície do objeto sólido que está em contato com o fluido, sendo que um alto valor de h reflete numa alta taxa de transferência de calor.

Os valores de coeficientes de transferência de calor encontrados na literatura na forma de números adimensionais, tal como Nusselt, em função do número de Reynolds para placas, cilindro ou esfera, são raramente utilizados em modelos porque não caracterizam, de forma adequada, o processo em particular. Por isso, um dos grandes desafios continua sendo a determinação do coeficiente médio de transferência de calor convectivo (h) para cada condição de processo, o qual tem papel determinante nos processos que envolvem transferência de calor entre um fluido e um sólido. Uma das causas mais comuns de erro no cálculo da temperatura dos produtos é originada pelo valor

adotado para este coeficiente, ou pelo valor obtido aplicando-se algum dos métodos matemáticos conhecidos (AMENDOLA; TERUEL, 2005). No Sistema Internacional de Unidades (SI), o coeficiente de transferência de calor é expresso em $W.m^{-1}.K^{-1}$.

2.6.2 Massa específica

Massa específica ou densidade, pode ser definida pela relação entre a massa de um material por unidade de volume e expressa em $kg.m^{-3}$ no SI, sendo utilizada para caracterizar sistemas fluidos e semifluidos (BOUKOULAS et al., 2006). Dados sobre essa propriedade são necessários para projetar e avaliar equipamentos de processamento de alimentos como evaporadores, bombas, filtros e misturadores e servem, ainda, como índice de qualidade do produto final (ALVARADO; ROMERO, 1989).

2.6.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica pode ser definida como a constante de proporcionalidade que relaciona a taxa de transferência de calor por um material com a área de transferência de calor e a variação de temperatura com a distância no material (INCROPERA et al., 2014).

De forma mais simples, pode ser compreendida como a habilidade que o material possui de conduzir calor (ARAUJO et al., 2004). É considerada uma das propriedades mais influentes durante um processo que envolve transferência de calor, sendo altamente dependente da composição do alimento, principalmente da umidade (ARAUJO et al., 2004; CARSON, 2006). Para Nunes et al. (2002), a condutividade térmica apresenta relação direta com o conteúdo de água, a mesma aumenta com o aumento do conteúdo de água. No SI a condutividade térmica é expressa em $W.m^{-1}.K^{-1}$.

2.6.4 Calor específico

Calor específico é a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa da substância por unidade de temperatura (FONTANA et al., 1999; SAHIN; SUMNU, 2006). O calor específico depende da natureza do processo de adição (ou remoção) de calor, quer em termos de um processo a pressão constante ou um processo a volume constante. No entanto, em virtude dos calores específicos de sólidos e

líquidos não dependerem tanto da pressão, exceto quando há pressões extremamente elevadas, e devido as alterações de pressão em problemas de transferência de calor de produtos alimentícios serem geralmente pequenas, o calor específico a pressão constante é o mais utilizado (SAHIN; SUMNU, 2006), sendo assim, denominado C_p .

É considerado um importante parâmetro termodinâmico para a determinação da quantidade de energia a ser adicionada ou removida nos processos de aquecimento e resfriamento de alimentos (BORÉM et al., 2002; ARAUJO et al., 2004). No Sistema Internacional de Unidades (SI) o calor específico é expresso em $J.kg^{-1}.K^{-1}$.

2.6.5 Difusividade térmica

A difusividade térmica, expressa em $m^2.s^{-1}$ no SI, mede a capacidade de um material de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la (SAHIN; SUMNU, 2006). Materiais que apresentam altos valores de difusividade térmica respondem rapidamente às mudanças térmicas em seu ambiente, enquanto materiais com baixos valores respondem mais lentamente, demorando a atingir o novo estado de equilíbrio (SAHIN; SUMNU, 2006; INCROPERA et al., 2014). A difusividade térmica é normalmente uma estimativa indireta da condutividade térmica, da densidade e do calor específico do material.

De acordo com Venâncio et al. (2006), a difusividade térmica é uma propriedade de grande importância para os produtos alimentares e indispensável para a predição de processos de transferência de calor como o resfriamento, pois expressa quão rapidamente um corpo se ajusta por inteiro à temperatura de seu entorno. Para Tres et al. (2011), Nunes et al. (2002) e Singh (1982), essa propriedade é influenciada pelo conteúdo de água, pela temperatura, pela composição e pela porosidade. Como em muitos processos, o conteúdo de água e a temperatura de um produto podem variar consideravelmente, o valor da difusividade térmica também pode variar. Além disso, muitos produtos alimentícios não são homogêneos e a difusividade térmica pode variar de um local para outro dentro do mesmo produto. Existem dados escassos para a difusividade térmica de presuntos na literatura, os quais são incompletos quanto às condições experimentais e principalmente, quanto à composição do material (OLIVEIRA, 2003).

2.7 MODELAGEM MATEMÁTICA

Com o aumento da popularidade e da capacidade de cálculo dos computadores, a solução numérica de modelos para problemas de engenharia desenvolveu-se enormemente, transcendendo o campo da pesquisa científica e ingressando de forma definitiva no campo da engenharia aplicada (PINTO, 2001). Desde o final dos anos 1940, a ampla disponibilidade de computadores levou a uma verdadeira explosão no uso e desenvolvimento de métodos numéricos e, em consequência, de modelos matemáticos. No início, esse crescimento foi um pouco limitado pelo custo de acesso a grandes computadores mainframe, e, conseqüentemente, muitos engenheiros continuaram a usar abordagens analíticas simples em uma parte significativa do seu trabalho. Nem é preciso dizer, a evolução recente dos computadores pessoais de baixo custo nos deu o pronto acesso a poderosas capacidades computacionais (CHAPRA; CANALE, 2010).

A modelagem matemática pode ser definida como um processo utilizado para obtenção e validação de modelos matemáticos. É uma forma de abstração e generalização com a finalidade de previsão de tendências. A modelagem consiste, essencialmente, na arte de transformar situações da realidade em problemas matemáticos cujas soluções devem ser interpretadas na linguagem usual (BASSANEZI, 2004). Um modelo matemático pode ser também definido como uma equação que expressa as características essenciais de um sistema físico ou processo em termos matemáticos. Num sentido muito geral, pode ser representado como uma relação funcional da forma:

$$\textit{Variável dependente} = f(\textit{variáveis independentes}, \textit{parâmetros}, \textit{função de entrada})$$

Onde a *variável dependente* é uma característica que geralmente reflete o comportamento ou o estado do sistema; as *variáveis independentes* são geralmente dimensões, tais como tempo e espaço, ao longo do qual o comportamento do sistema está sendo determinado; os *parâmetros* são um reflexo das propriedades ou composição do sistema; e as *funções de entrada* são influências externas que agem sobre o sistema (CHAPRA; CANALE, 2010).

Os modelos matemáticos nada mais são que uma representação dos aspectos essenciais de um sistema. Um modelo consiste em equações, cuja solução, dado um conjunto de dados de entrada é representativa da resposta do processo (DENN, 1986). Para Garcia (2009) os modelos são essenciais no projeto de vários equipamentos

permitindo muitas vezes a mudança de tecnologia de escala laboratorial para escala industrial.

Muitos estudos científicos, teóricos e experimentais têm sido dedicados à descrição matemática de processos em sistemas alimentares. Os modelos podem ser usados para melhorar a compreensão da dinâmica do processo além de desenvolver uma estratégia de controle para um novo processo (VODYANOVA et al., 2012).

Ainda de acordo com Vodyanova et al. (2012), os modelos matemáticos podem ser classificados como:

- a. Modelos teóricos: desenvolvidos usando os princípios da química, física e biologia;
- b. Modelos empíricos: obtidos por montagem de dados experimentais e;
- c. Modelos semiempíricos: que são uma combinação dos modelos das categorias a. e b. em que os valores numéricos de um ou mais dos parâmetros de um modelo teórico são calculados a partir de dados experimentais.

Modelos empíricos apenas descrevem sistemas em condições específicas e, portanto, os modelos semiempíricos são amplamente utilizados na indústria (VODYANOVA et al., 2012). A equação ou conjunto de equações que compõe o modelo são uma ideia do processo real. As equações do modelo são, na melhor das hipóteses, uma aproximação ao processo real, mas não podem incorporar todas as características macroscópicas e microscópicas do verdadeiro processo (KOSOY; DOROCHOV, 2006).

Conforme Biembengut e Hein (2003), o processo de modelagem matemática pode ser realizado, basicamente, em três fases:

- Interação: É o reconhecimento da situação-problema e a familiarização com o assunto a ser modelado;
- Matematização: Formulação do problema (hipótese) e resolução do problema em termos do modelo. O objetivo principal deste momento do processo de modelar é encontrar um conjunto de expressões aritméticas, fórmulas, ou equações algébricas; representações, ou programa computacional, que levem à solução ou permitam a dedução de uma solução;
- Modelo Matemático: Interpretação da solução e validação do modelo (avaliação). Para concluir o modelo, torna-se necessária uma avaliação para verificar em que nível ele se aproxima da situação-problema

representada e, a partir daí, verificar também o grau de confiabilidade na sua utilização.

De acordo com Garcia (2009), para a engenharia, a modelagem matemática é uma ferramenta de grande importância, pois pode contribuir solucionando problemas inerentes aos processos, uma vez que estabelece relação entre as variáveis do processo possibilitando a predição e a interpretação de sistemas, controle de estratégias de desenvolvimento, simulação de comportamento do sistema com diferentes condições operacionais, entre outras. Drummond e Sun (2012), afirmam ainda, que a modelagem matemática presta apoio científico valioso, quer durante a fase de concepção ou na parte de otimização dos processos operacionais. Em processos de resfriamento, a modelagem pode levar a uma melhor compreensão dos efeitos dos parâmetros do processo sob os atributos finais de produtividade e qualidade do produto.

A modelagem matemática da transferência de calor e de massa em produtos cárneos progrediu de procedimentos relativamente simples, usando uma ou duas variáveis para métodos avançados que incorporam um número crescente de propriedades físicas e uma variedade de formas e tamanhos de produtos. Dois tipos básicos de modelos para tratamentos térmicos são encontrados na literatura: soluções analíticas e simulações (OBUZ et al., 2002).

Soluções analíticas são geralmente constituídas por uma ou mais equações relativamente simples para a previsão direta de uma propriedade específica num dado momento (KUMAR; JAGATH, 2013).

Já as simulações são tentativas de descrever matematicamente todo o processo de tratamento térmico e levam em conta tantas variáveis quanto necessárias para produzir uma descrição precisa do processo.

Métodos de solução analítica dependem das soluções que governam as equações diferenciais juntamente com condições de contorno. O resultado é função da solução para a temperatura em cada ponto no meio. Os métodos numéricos são baseados na substituição da equação diferencial por um conjunto de equações algébricas para as temperaturas desconhecidas nos pontos escolhidos em meio, e a solução simultânea destas equações resultam no valor de temperatura nos pontos discretos.

Existem várias maneiras de se obter a formulação numérica de um problema de transferência de calor, tal como o Método das Diferenças Finitas (*FDM – Finite Differences Method*), Método dos Elementos Finitos (*FEM – Finite Element Method*), Métodos dos Elementos de Contorno (*BEM – Boundary Element Methods*) e Método do

Volume Finito (*FVM – Finite Volume Methods*). Cada método tem as suas próprias vantagens e limitações (RAGHU KUMAR; JAGATH, 2013).

Técnicas computacionais modernas facilitam a resolução de problemas com condições de contorno impostas usando diferentes métodos numéricos. A análise numérica da transferência de calor tem sido de forma independente, mas não exclusivamente, desenvolvido em três correntes principais: o método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos e o método dos elementos de contorno. FEM e FDM se encaixam bem para problemas de condução de calor. A utilização do FEM e BEM é vantajosa para os problemas de radiação de calor. O FVM e FDM se encaixam bem para problemas de convecção de calor (RAGHU KUMAR; JAGATH, 2013).

Para Wang e Sun (2003), tanto nos processos de cozimento como nos de resfriamento na indústria de alimentos, os métodos numéricos como os métodos das diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos tem produzido um grande número de modelos matemáticos.

A modelagem da transferência de calor em alimentos sólidos de geometria simples, sem mudança de fase e na ausência de transferência de massa é classicamente realizada pela resolução da equação de condução de calor em regime transiente fazendo uso tanto de soluções analíticas quanto numéricas. Trabalhos propondo a modelagem de alimentos em três dimensões e, em consequência, fugindo das geometrias clássicas unidimensionais, ainda são raros na literatura (NECKEL; MARIANI, 2010).

2.7.1 Equações diferenciais

Muitos problemas de ciência e engenharia requerem a descrição de alguma quantidade mensurável (posição, a temperatura, a população, a concentração, a corrente eléctrica, etc.) como uma função do tempo. Frequentemente, as leis científicas que regem essas quantidades são melhor expressas como equações que envolvem a taxa em que essa quantidade muda ao longo do tempo. Estas leis definem mecanismos de mudança. Quando combinadas com as leis da continuidade para energia, massa, ou momento, resultam em equações diferenciais. A subsequente integração destas equações diferenciais resulta em funções matemáticas que descrevem o estado espacial e temporal de um sistema em termos de energia, massa ou variações de velocidade (MYINT-U; DEBNATH, 2007; ADKINS; DAVIDSON, 2012; CHAPRA; CANALE, 2010).

O estudo de equações diferenciais ordinárias é um assunto bastante rico, sendo anterior até mesmo a Isaac Newton e suas leis de movimento e é um dos principais alicerces para descrever um processo em que uma quantidade (massa, corrente, população, etc.) exhibe mudanças de acordo com tempo ou distância (SÁNCHEZ, 2002).

A solução de equações diferenciais ordinárias por métodos discretos é uma das áreas mais antigas e mais bem sucedidas de computação numérica. Um exemplo dramático da necessidade desses cálculos é o problema de prever os movimentos dos planetas ou outros corpos no espaço. As equações diferenciais que regem tais movimentos são conhecidos há bastante tempo, e para o caso de apenas dois corpos, tais como o sol e um planeta, Newton mostrou como resolvê-los exatamente. Nos três séculos desde então, no entanto, ninguém encontrou uma solução exata para o caso de três ou mais corpos. No entanto, o cálculo numérico de tais órbitas é realizado quase sem esforço para os padrões modernos e é um componente de rotina do controle de naves espaciais (TREFETHEN, 1996).

Equações diferenciais ordinárias (*Ordinary Differential Equations – ODE*) e equações diferenciais parciais (*Partial Differential Equations – PDE*) estão entre as formas mais utilizadas de matemática em ciência e engenharia. No entanto, modelos baseados em ODE/PDE são realizados somente quando as soluções para as equações são produzidas com precisão suficiente e com um esforço razoável.

A maioria dos modelos ODE/PDE são complicados o suficiente (por exemplo, conjuntos de equações não-lineares simultâneas) para impedir métodos analíticos de solução. Assim, métodos numéricos são amplamente utilizados.

O cálculo de uma solução numérica bem estabelecida, que geralmente requer algoritmos de integração numérica, são implementadas em rotinas de bibliotecas de qualidade. As rotinas de biblioteca, por sua vez, podem ser codificadas (programadas) em uma variedade de linguagens de programação (LEE; SCHIESSER, 2004).

Equações diferenciais geralmente possuem um número infinito de soluções. Assim, para especificar uma solução particular de interesse, é necessário especificar dados adicionais. O que normalmente é conveniente especificar para uma equação de primeira ordem é um valor inicial t_0 da variável independente e um valor inicial $y(t_0)$ para a variável dependente avaliadas em t_0 . Para uma equação de segunda ordem, pode-se especificar um valor inicial t_0 para a variável independente, juntamente com um valor inicial $y(t_0)$ e uma derivada inicial $y'(t_0)$ em t_0 . Existe uma extensão óbvia para equações de ordem superior.

Quando a equação diferencial e valores iniciais são especificados, obtém-se o que é conhecido como um problema de valor inicial (ADKINS; DAVIDSON, 2012).

Assim, um problema de valor inicial de primeira ordem é (Equação 2):

$$y' = F(t, y), \quad y(t_0) = y_0 \quad \text{Equação 2}$$

Enquanto uma equação de segunda ordem é (Equação 3):

$$y'' = F(t, y, y'), \quad y(t_0) = y_0, \quad y'(t_0) = y_1 \quad \text{Equação 3}$$

Em geral, não há uma única técnica que pode ser utilizada para resolver todas as equações diferenciais, onde por resolver queremos dizer encontrar uma descrição funcional explícita da solução geral $y_g(t)$ como uma função explícita de t , possivelmente, dependente de alguma constante arbitrária. Tal $y_g(t)$ é muitas vezes referida como uma *solução de forma fechada*. Sem computadores, ODEs são normalmente resolvidas com técnicas analíticas de integração. Existem técnicas de soluções para certos tipos ou categorias de equações diferenciais, tais como separáveis, linear, homogênea, Bernoulli e exatas (ADKINS; DAVIDSON, 2012; CHAPRA; CANALE, 2010).

Um fato importante é que as soluções exatas para muitas ODEs de importância prática não estão disponíveis. Assim, os métodos numéricos oferecem a única alternativa viável para estes casos. Como esses métodos numéricos normalmente requerem computadores, engenheiros na era pré-computador ficaram limitados no âmbito das suas investigações. Sem computadores, ODEs são normalmente resolvidas com técnicas de integração analíticas mencionadas anteriormente (CHAPRA; CANALE, 2010).

Devido sua ampla aplicação na engenharia, especificamente as PDEs lineares de segunda ordem, tal como a equação de condução de calor, são largamente utilizadas. Normalmente, em quase todos os fenômenos físicos (ou processos físicos), a variável dependente $u = u(x, y, z, t)$ é uma função das três variáveis espaciais, x, y, z e a variável de tempo, t (MYINT-U; DEBNATH, 2007). Tais equações podem ser expressas da seguinte forma:

$$A \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + D = 0 \quad \text{Equação 4}$$

Onde A , B e C são funções de x e y e D é uma função de x , y , u , $\partial u/\partial x$ e $\partial u/\partial y$. Dependendo dos valores de A , B e C na Equação 4, esta pode ser classificada dentro de uma das três categorias da Tabela 2:

Tabela 2: Categorias nas quais equações diferenciais parciais lineares de segunda ordem em duas variáveis podem ser classificadas

B^2-4AC	Categoria	Exemplo
< 0	Elíptica	Equação de Laplace (estado estacionário com duas dimensões espaciais) $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$
$= 0$	Parabólica	Equação de condução de calor (variável tempo com uma dimensão espacial) $\frac{\partial T}{\partial t} = k' \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$
> 0	Hiperbólica	Equação da onda (variável tempo com uma dimensão espacial) $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$

FONTE: Chapra e Canale (2010)

A classificação dentro dessas categorias é útil pois cada categoria refere-se a contextos específicos e distintos de problemas de engenharia que exigem técnicas de solução especiais. Deve notar-se que para os casos em que A , B , C e dependem de x e y , a equação pode, na verdade, se enquadrar em uma categoria diferente, dependendo da localização no domínio para o qual a equação pertence (TREFETHEN, 1996; CHAPRA; CANALE, 2010).

As equações elípticas são normalmente utilizadas para caracterizar sistemas de estado estacionário, como na equação de Laplace demonstrada na Tabela 2, indicada pela ausência de uma derivada relativa ao tempo. Assim, essas equações são normalmente empregadas para determinar a distribuição em estado estacionário de uma incógnita em duas dimensões espaciais (MYINT-U; DEBNATH, 2007; CHAPRA; CANALE, 2010).

Em contraste com a categoria elíptica, equações parabólicas determinam como uma incógnita varia no espaço e no tempo. Isso é demonstrado pela presença de ambas as derivadas espaciais e temporais na equação de condução de calor presente na Tabela

2. Tais casos são chamados de problemas de propagação porque a solução "propaga", ou muda, no tempo (MYINT-U; DEBNATH, 2007; CHAPRA; CANALE, 2010).

A última classe de PDEs, a categoria hiperbólica, também lida com problemas de propagação. No entanto, uma distinção importante manifestada pela equação da onda demonstrada na Tabela 2 é que a incógnita é caracterizada por uma segunda derivada em relação ao tempo. Como consequência, a solução oscila (MYINT-U; DEBNATH, 2007; CHAPRA; CANALE, 2010).

2.7.2 Método das diferenças finitas

O método das diferenças finitas pode ser utilizado para resolver problemas de valor de contorno ou valor inicial, envolvendo ODEs ou PDEs. Assim, este método pode ser usado para solucionar as equações de modelos a parâmetros concentrados ou distribuídos (PINTO, 2001).

O objetivo do método das diferenças finitas é transformar um problema composto por equações diferenciais em um problema formado por equações algébricas (PINTO, 2001). O primeiro passo nesta direção é a chamada discretização do domínio da variável independente, que consiste em dividir o domínio de cálculo em um certo número de subdomínios. O objetivo da discretização é a obtenção de um problema que pode ser resolvido por um procedimento finito (TREFETHEN, 1996).

Os subdomínios podem ter uma malha uniforme, ou não, formando uma malha não-uniforme. Embora as discretizações baseadas nas malhas uniformes sejam mais simples, existem vantagens numéricas, em muitos casos, no uso de malhas não-uniformes.

O segundo passo é gerar aproximações para as derivadas das variáveis dependentes que aparecem nas equações diferenciais, nos pontos discretos. Finalmente, aplicam-se as equações diferenciais ordinárias aos pontos discretos, o que gera sistemas de equações algébricas (PINTO, 2001).

Em complemento, como procedimento geral da modelagem, é conveniente redefinir as variáveis do problema de forma a torna-las adimensionais, evitando assim problemas de interpretação advindos do uso de sistemas diferentes de unidade e permitindo agrupar os parâmetros do problema num conjunto menor de grupamentos paramétricos (PINTO, 2001). Modelos adimensionalizados independem do sistema de unidades utilizados e dependem de um conjunto menor de grupamentos paramétricos.

Na concepção de um método de diferenças finitas por equações diferenciais parciais dependentes do tempo muitas vezes é útil dividir o processo em duas etapas: em primeiro lugar, discretizar o problema com relação ao espaço, gerando um sistema de equações diferenciais ordinárias em t ; Em seguida, resolver esse sistema através de algum método discreto no tempo. Nem todos os métodos de diferenças finitas podem ser analisados dessa maneira, mas muitos podem, e é um ponto de vista que se torna cada vez mais importante quando se considera problemas mais difíceis (TREFETHEN, 1996).

O método das diferenças finitas possui duas características: A aplicação das equações diferenciais é local e a solução obtida é composta por um conjunto enumerável de pontos onde os valores da solução são conhecidos.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O resfriamento é considerado um ponto crítico de controle no processamento de produtos cárneos RTE como o caso do presunto cozido, estando ligado diretamente com a sua segurança microbiológica e a sua qualidade tecnológica e sensorial. A modelagem matemática surge como uma ferramenta que pode prestar apoio científico valioso para aperfeiçoar processos de resfriamento, otimizar o aporte dos recursos energéticos, o aumento de produtividade, a redução de perdas e o aumento da qualidade e da segurança do alimento. Também podem fornecer uma boa perspectiva sobre as propriedades relevantes do produto que podem influenciar performances do processo industrial.

Apesar de a modelagem matemática apresentar relevante importância em processos de resfriamento, pesquisas que tratem desse assunto na indústria de alimentos são ainda pouco exploradas sendo que a literatura que trate especificamente do desenvolvimento de um modelo matemático para o processo de resfriamento de presunto é bastante escassa. Assim, após as considerações apresentadas, verifica-se que o presente estudo apresenta grande importância não apenas no meio científico como também para o meio industrial, vindo a trazer grandes contribuições para ambas as áreas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α)

3.1.1 Cálculo da Difusividade Térmica (α)

Para o cálculo da difusividade térmica, utilizou-se a Equação 6, uma variante da Equação 5 apenas com o ajuste de unidades, de min ao invés de s. Esta equação permitiu determinar a difusividade térmica do produto como uma função de sua umidade. A Equação 5 foi originalmente proposta por Riedel (1969) e foi utilizada como comparativo por Oliveira et al., (2003) em seus estudos para determinação da difusividade térmica do presunto cozido onde α é a difusividade térmica, em $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e U é a umidade do produto, em percentual.

$$\alpha = 8,83 \cdot 10^{-8} + 7 \cdot 10^{-10} \cdot U \quad \text{Equação 5}$$

Por conveniência, utilizou-se a difusividade térmica em $\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$, de forma que a Equação 4, devidamente ajustada, se encontra na Equação 5:

$$\alpha = (8,83 \cdot 10^{-8} + 7 \cdot 10^{-10} \cdot U) \cdot 60 \quad \text{Equação 6}$$

3.1.2 Obtenção do Teor de Umidade

Para realizar a estimativa da difusividade térmica do presunto, utilizou-se equação proposta por Oliveira et al., (2003) (Equação 5). Para tanto, realizou-se análises físico-químicas de umidade e proteína do produto para obtenção dos teores de umidade e proteína (%) (AOAC, 2007).

3.2 DADOS EXPERIMENTAIS DO PROCESSO

3.2.1 Processo de Preparo, Embutimento e Enformagem

Os ensaios experimentais foram realizados em uma planta de abate e industrialização de suínos localizada no oeste catarinense. As matérias-primas utilizadas na elaboração da formulação do presunto foram pernil suíno e seus recortes. Os demais ingredientes constituintes do presunto foram: água, sal, proteína de soja, lactato de sódio, glicose, tripolifosfato de sódio, eritorbato de sódio, espessantes, corante natural carmim de cochonilha, glutamato monossódico, nitrito de sódio e aroma natural.

Após previamente selecionadas, as matérias-primas foram moídas em moedor angular Risco[®] TR-160 utilizando disco de moagem 25 e 8 mm, de acordo com o tipo de corte. Em seguida, a matéria-prima moída foi colocada em misturadeira (Incomaf[®] MTV-700) onde foram adicionados salmoura previamente preparada e o restante dos ingredientes. Seguiu-se então a etapa de massageamento em massageadora Stork[®] MAS 80 e realizada a cura do produto por 12 h.

Após a etapa de cura, o produto foi embutido sob vácuo (embutideira Handtmann HVF 664) em envoltório plástico de poliamida previamente hidratado e fechado em ambas as pontas através de grampeamento com clipadora automática Polyclip[®] (Figura 4).

Esses envoltórios de poliamida possuem a característica de serem impermeáveis, impossibilitando a migração da água do produto para o meio. Essa característica impede o que é comumente conhecido na indústria como quebra de peso, ou seja, impede a transferência de massa do produto para o meio circundante, no caso do presunto, para a água de cozimento e, posteriormente, resfriamento. Este tipo de envoltório é comumente utilizado em produtos como mortadelas, lanches, apresuntados e patês.

A embutideira foi previamente ajustada de forma a obter peso e extração de ar uniformes em todas as peças. A hidratação dos envoltórios ocorreu em água a 35 °C por 30 a 40 min de acordo com o especificado pelo fabricante de maneira a permitir a flexibilização do calibre, facilitando a operação de embutimento. Na Figura 4 encontra-se uma peça de presunto embutida em envoltório de poliamida pronta para a etapa de enformagem.

Figura 4: Peça de presunto embutida



Fonte: O autor

As peças embutidas foram então encaminhadas para enformagem, onde foram colocadas manualmente em formas de aço inox (Figura 5) e, então, dispostas em gaiolas para as etapas posteriores de cozimento e resfriamento, conforme demonstrado nas Figura 6 e Figura 7.

Figura 5: Peça de presunto enformada



Fonte: O autor

Figura 6: Distribuição das formas na gaiola (vista frontal)



Fonte: O autor

Figura 7: Distribuição das formas na gaiola (vista lateral)



Fonte: O autor

Os dados referentes às dimensões das peças e das gaiolas onde as peças foram acondicionadas para os processos de cozimento e resfriamento encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3: Dados de dimensões e quantidade de peças por gaiola

Peso das peças [kg]	11 ± 0,01
Dimensões das peças de presunto [m]	0,11 x 0,10 x 0,96
Dimensões das gaiolas de presunto [m]	1,0 x 1,0 x 1,2
Quantidade de peças por gaiola [un]	35

Fonte: O autor

3.2.2 Cozimento e Resfriamento

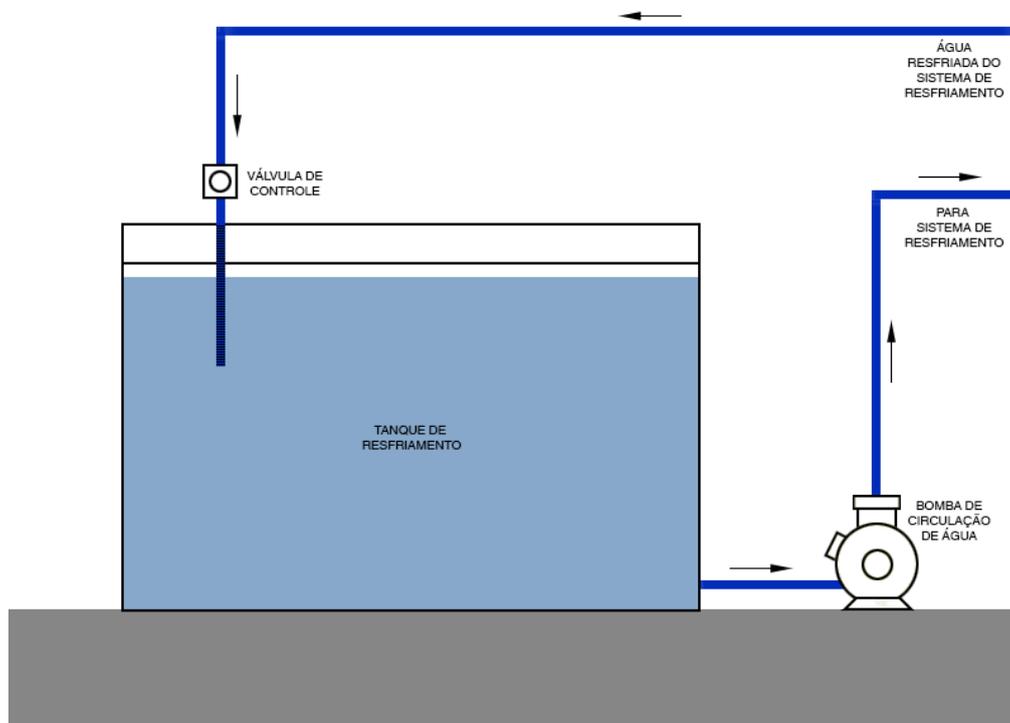
Os processos de cozimento e resfriamento foram realizados em tanques construídos em aço inox para este fim e com isolamento térmico em suas paredes. Cada tanque comporta duas gaiolas que são imersas em água, utilizada como meio de transferência de calor.

O processo de cozimento foi realizado por meio de injeção de vapor a uma pressão de aproximadamente 4,5 bar proveniente de caldeira. Esta injeção de vapor foi realizada através de tubulação apropriada, que abastece uma tubulação perfurada que realiza a distribuição de vapor de maneira uniforme na parte inferior do tanque. O controle de vazão de vapor foi automatizado através de sistema de válvula pneumática controlada por sensores termopares PT100 que, por sua vez, são controlados por uma central onde tem-se o cadastro do programa de cozimento. O tempo de cozimento foi variável de forma que o produto atingisse, no mínimo, 72 °C em seu centro.

Para o processo de resfriamento, as gaiolas contendo o produto foram transferidas para os tanques de resfriamento com auxílio de talhas elétricas. Estes tanques são construídos de forma similar aos tanques de cozimento, comportam igualmente duas gaiolas cada e possuem injeção de água resfriada proveniente de um sistema de refrigeração indireto, onde a água foi resfriada através de trocador de calor de placas, utilizando como meio refrigerante a amônia. A injeção de água resfriada proveniente do sistema de resfriamento foi controlada pela temperatura da água no tanque sendo sua vazão, variável, de forma a manter a temperatura da água de resfriamento mais ou menos constante e em torno de 4 a 6 °C. O tempo de resfriamento foi variável, de maneira similar ao cozimento, de forma que o produto atingisse temperaturas inferiores a 8 °C no centro das peças.

A Figura 8 mostra o sistema de circulação de água nos tanques de resfriamento.

Figura 8: Representação do sistema de circulação de água nos tanques de resfriamento

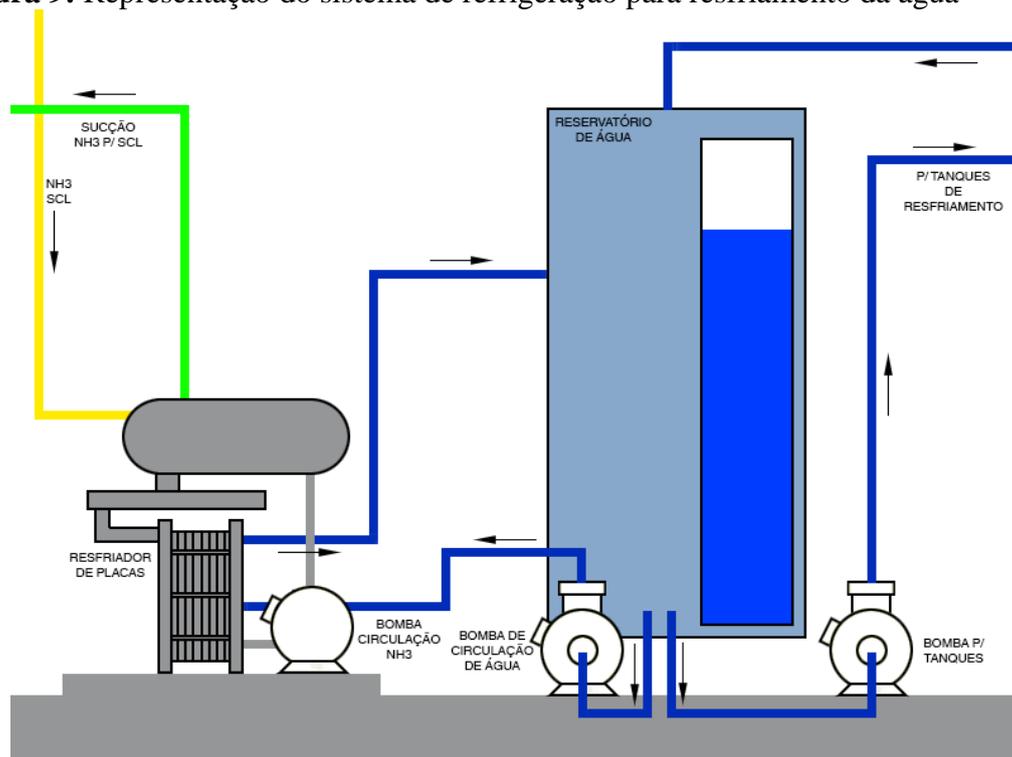


Fonte: O autor

O sistema de resfriamento de água trata-se de um sistema completamente automatizado, sendo constituído por tanques de água, trocador de calor PHE (*Plate Heat Exchanger* – Trocador de Calor a Placas) do tipo PFHE (*Plate and Frame Heat Exchanger* – Trocador de Calor a Placas com Gaxetas), bombas de transferência e sistemas de controle. O controle de temperatura no tanque foi realizado através de sensores termopares PT100 que acionam o sistema de circulação de água para que a temperatura da água nos tanques possua pouca variação.

Na Figura 9 observa-se o sistema de resfriamento da água, onde tem-se o reservatório de água resfriada, bombas de circulação de água e amônia, trocador de calor PHE e demais tubulações. O reservatório de água é abastecido com água proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) e água de recirculação, que passa pelo trocador de calor PHE onde é resfriada. A água do reservatório é bombeada para os tanques de resfriamento de acordo com a demanda de cada tanque.

Figura 9: Representação do sistema de refrigeração para resfriamento da água



Fonte: O autor

3.2.3 Desenvolvimento de Equipamento de Proteção para o *Data Logger*

A coleta dos dados experimentais foi realizada com o equipamento *data logger* Datapaq[®] Multipaq21 de 8 canais (Figura 10), que monitora e registra as temperaturas dos locais de inserção dos sensores (ou sondas) à um passo pré-determinado de tempo. Os dados obtidos com o *data logger* foram então reunidos no software Datapaq[®] Insight que possibilitou a exportação destes dados. Para posterior validação do modelo, estipulou-se o passo de 1 minuto para a coleta de temperatura.

Figura 10: *Data logger* Datapaq® Multipaq21



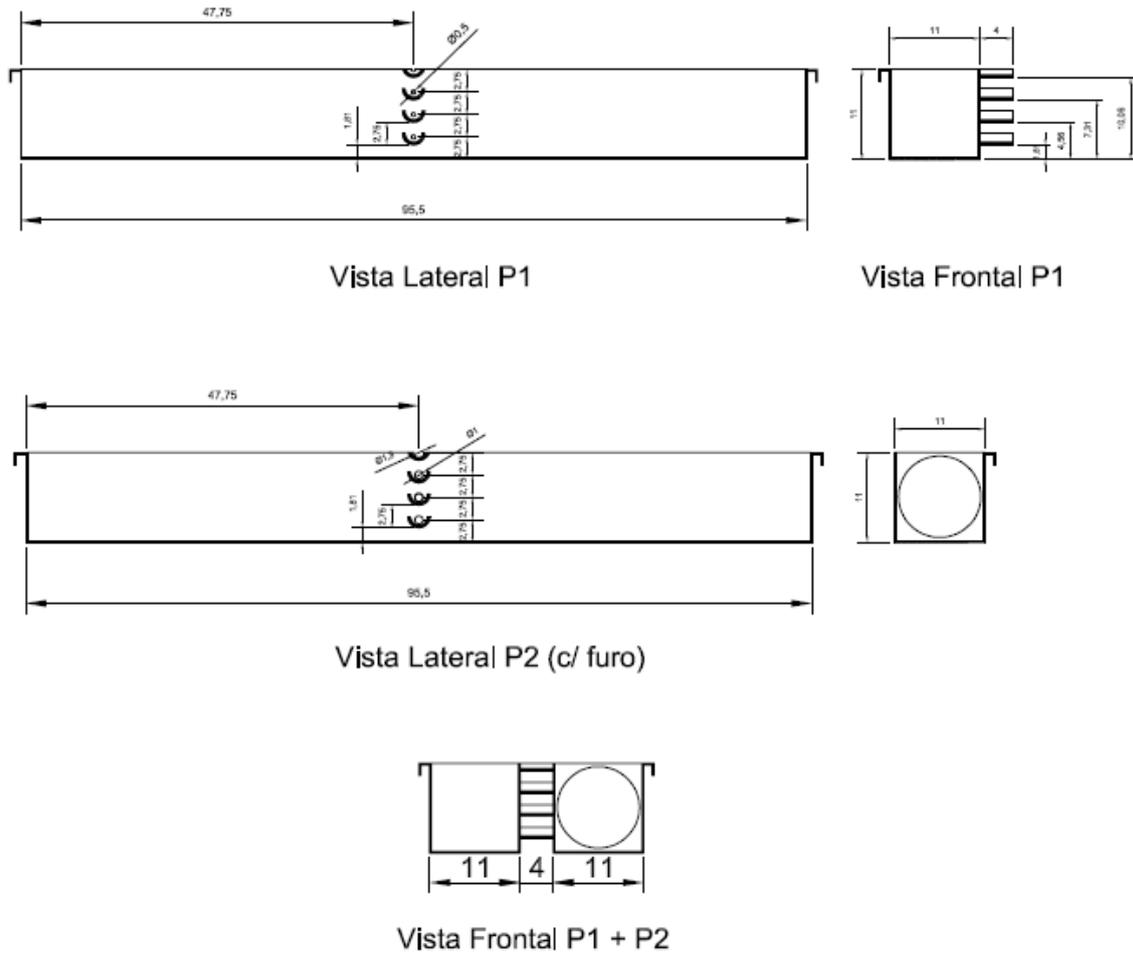
Fonte: <http://datapaq.pl/produkty/food-tracker-system/food-tracker-system/>

Durante a inserção das sondas e retirada das formas seria necessário a aplicação de força, uma vez que a acomodação daquelas é justa para que não ocorra acidentes durante a movimentação da gaiola na nórea.

Como o *data logger* e as sondas apresentam elevada sensibilidade à choques mecânicos, projetou-se um equipamento a fim de amenizá-los e oferecer proteção às sondas submersas, constituído de duas formas de aço inox, idênticas às utilizadas no processo, mas devidamente adaptadas, sendo uma para a colocação do *data logger* e a outra para a colocação da peça de presunto, havendo, entre ambas, nichos e orifícios para a inserção das sondas na peça, projetados de forma a permitir o monitoramento das temperaturas em quatro pontos (quatro sondas). O projeto foi realizado em software Autodesk® AutoCAD 2014 para posterior confecção do equipamento, conforme demonstrado nas Figura 11, Figura 12 e Figura 13.

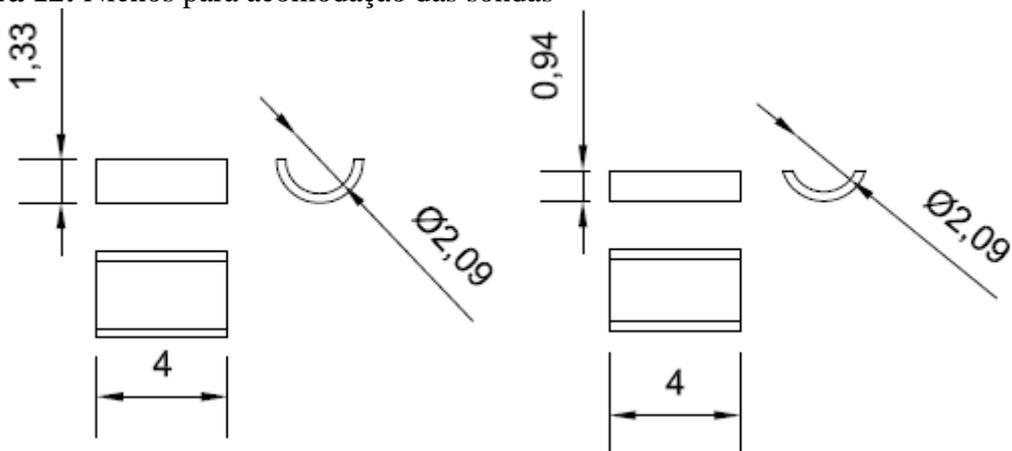
Na Figura 11 constam as vistas lateral e frontal das formas adaptadas para acomodação do *data logger* (equipamento). Na peça 1 (P1) foram feitos quatro orifícios de acordo com a posição de cada sonda, sendo três sondas para coleta de temperatura na peça de presunto e uma sonda para a coleta da temperatura da água próximo à superfície. Foram soldados quatro suportes de aço inox (nichos) externamente à P1 para cada orifício feito, de forma a acomodar com segurança as sondas. Na peça 2 (P2) também foram realizados quatro furos, de forma a coincidir com os furos da P1. Após, as duas formas foram soldadas entre si, formando uma peça única. A P1 recebeu o *data logger* e a P2, as peças de presunto. As sondas eram inseridas na peça do presunto através dos orifícios feitos em P1 e P2.

Figura 11: Projeto do equipamento para acomodação do *data logger* e sondas



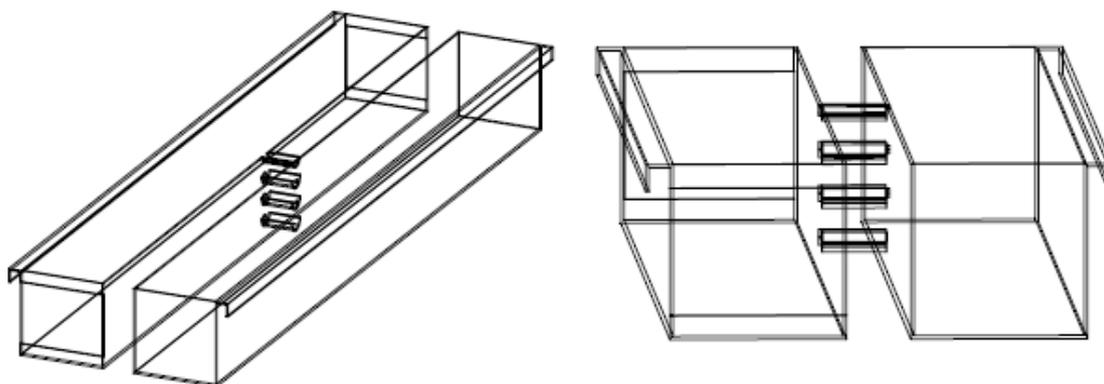
Fonte: O autor

Figura 12: Nichos para acomodação das sondas



Fonte: O autor

Figura 13: Representação 3D do equipamento



Fonte: O autor

Para realizar a coleta dos dados, foram confeccionados dois equipamentos conforme o projeto desenvolvido (Figura 14). Desta forma, foi possível realizar a coleta de dados em duas gaiolas no mesmo tanque.

Figura 14: Fotos do equipamento confeccionado

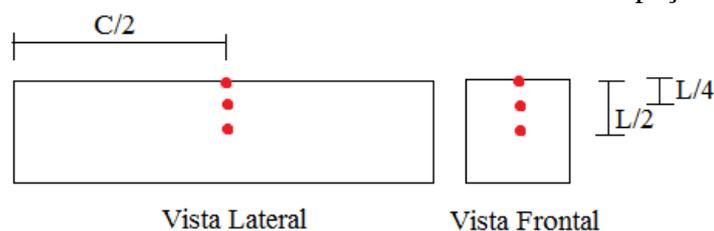


Fonte: O autor

3.2.4 Coleta de Dados Experimentais

Os três pontos de monitoramento no interior da peça foram escolhidos de forma a contemplar o núcleo da peça, ou seja, o seu centro radial, a superfície da peça e uma posição intermediária entre estes dois pontos, conforme demonstrado na Figura 15. Ademais, monitorou-se a temperatura da água próxima aos pontos de inserção para a posterior definição da condição de contorno do modelo.

Figura 15: Esquema de tomada de dados amostrais no interior da peça



Fonte: O autor

Os quatro pontos de coleta foram adotados em duas posições distintas na mesma gaiola de forma a estudar a homogeneidade de temperatura da água em diversos pontos do tanque, totalizando oito locais de retirada de dados por experimento.

Como cada gaiola possui sete *linhas* e cinco *colunas*, utilizou-se como referência uma matriz 5x7 para identificar cada posição. Assim, os testes foram distribuídos e identificados segue a seguinte terminologia:

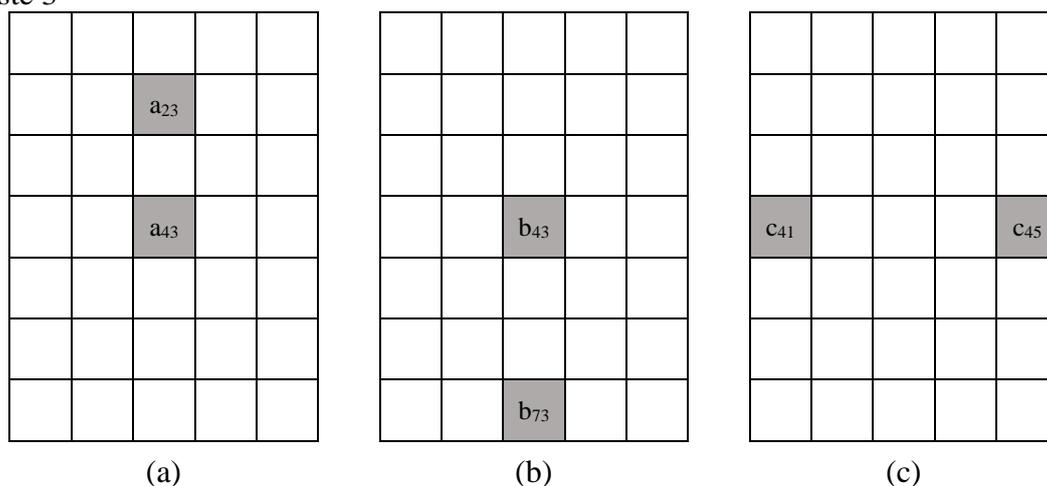
Teste 1 – peças nas posições (2,3) e (4,3): a_{23} e a_{43} ;

Teste 2 – peças nas posições (4,3) e (7,3): b_{43} e b_{73} ;

Teste 3 – peças nas posições (4,1) e (4,5): c_{41} e c_{45} ;

A representação das posições das peças por teste nas gaiolas encontra-se na Figura 16.

Figura 16: Representação das posições das peças nas gaiolas: (a) Teste 1; (b) Teste 2; (c) Teste 3



Fonte: O autor

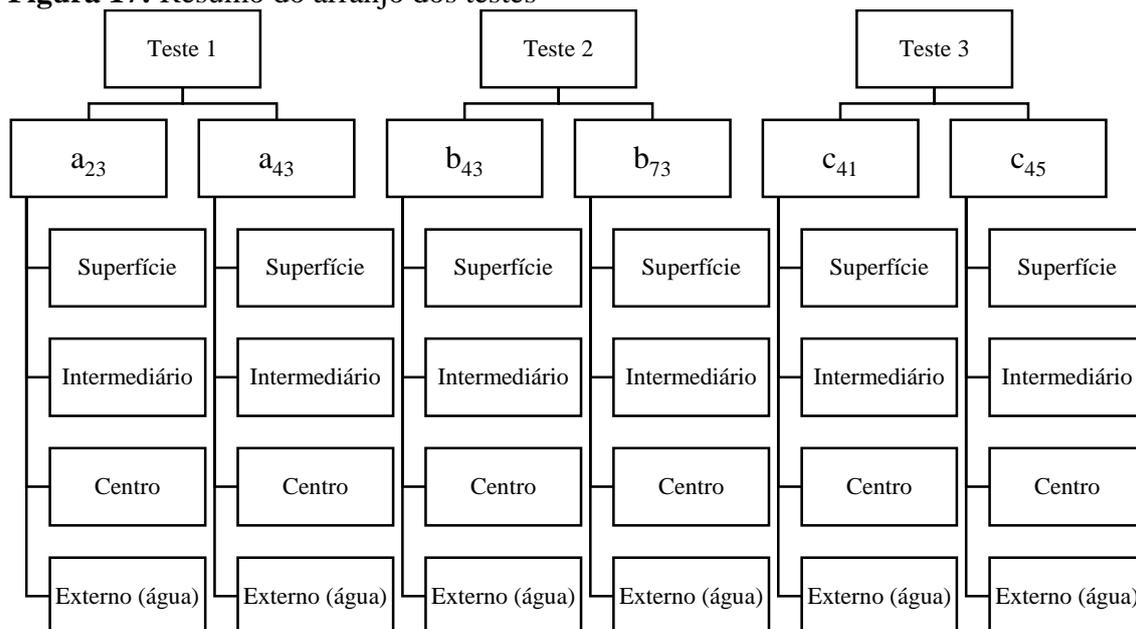
As sondas 1 e 5 foram inseridas nos pontos superficiais das peças; as sondas 2 e 6 foram inseridas nos pontos intermediários das peças; as sondas 3 e 7 foram inseridas nos pontos centrais da peça e as sondas 4 e 8 foram postas pertos a superfície da peça a fim de coletar a temperatura da água. A numeração e posição das sondas em cada teste podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4: Relação sonda/posição na gaiola

N° da Sonda	Posição na Gaiola	
Teste 1	2,3	4,3
Teste 2	7,3	4,3
Teste 3	4,1	4,5

Fonte: O autor

O resumo das coletas de temperatura realizadas, bem como a distribuição das posições em cada teste encontra-se na Figura 17.

Figura 17: Resumo do arranjo dos testes

Fonte: O autor

3.2.5 Homogeneidade da Temperatura da Água de Resfriamento

Com os dados obtidos pelas sondas 4 e 8, que mediram as temperaturas da água externamente às peças de presunto, próximo às suas superfícies, avaliou-se a homogeneidade da temperatura da água durante todo o processo de resfriamento. Esta avaliação teve por objetivo confirmar ou não a hipótese de homogeneidade da temperatura da água de resfriamento durante o transcorrer do processo, bem como o seu comportamento para melhorar o ajuste do modelo caso necessário.

3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

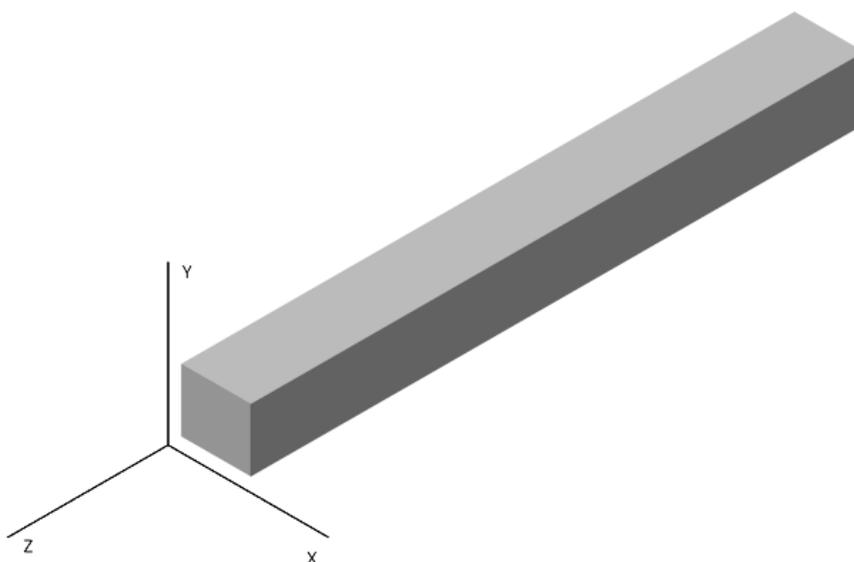
3.3.1 Balanço de Energia

A equação da difusão de calor é uma equação diferencial parcial parabólica de segunda ordem. Essa equação determina o campo de temperatura, ou seja, representa como a temperatura varia com a posição no meio e com o tempo (INCROPERA et al., 2014). Para simular os dados experimentais, foi proposto um modelo seguindo o balanço de energia apresentado em Incropera et al. (2014), conforme Equação 6, tomando como volume de controle a peça de presunto em coordenadas cartesianas, devido suas particularidades de geometria.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad \text{Equação 6}$$

Onde k , ρ e C_p são as propriedades físicas do material, que são funções da temperatura e representam a condutividade térmica ($\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$), densidade (kg.m^{-3}) e a capacidade calorífica do material ($\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$), respectivamente. t expressa o tempo (s), T a temperatura (°C) e \dot{q} a taxa na qual a energia é gerada por unidade de volume no meio (W.m^{-3}).

Figura 18: Volume de controle e suas coordenadas representando a peça de presunto



Fonte: O autor

O modelo considera a variação bidimensional de temperatura no interior da peça - variação de temperatura somente nas coordenadas espaciais x e y - desconsiderando os efeitos de borda. A consideração do comprimento semi-infinito foi feita, onde não há variação do perfil de temperatura na coordenada espacial z , uma vez que o comprimento da peça de presunto é aproximadamente 10 vezes maior que a sua largura. Ademais, tomou-se as seguintes hipóteses ao balanço de energia:

- Não há transferência de massa devido a impermeabilidade do envoltório;
- Propriedades físicas não variam na faixa de temperatura estudada;
- Não há geração de energia no interior do produto.

- Difusividade térmica (α) do presunto cozido conforme obtido por Oliveira et al. (2003).

A difusividade térmica α ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) é a propriedade física definida pela relação entre condutividade térmica e o calor específico volumétrico (Equação 7).

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad \text{Equação 7}$$

Assim, introduzindo-se o parâmetro da difusividade térmica e as considerações acima, a Equação 6 é simplificada à Equação 8:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{Equação 8}$$

Onde α é a difusividade térmica ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

3.3.2 Definição das Condições Para Resolução

Em virtude da equação de condução do calor (Equação 8) ser uma equação diferencial parcial de segunda ordem nas coordenadas espaciais x e y , são necessárias para sua resolução duas condições de contorno, e como é de primeira ordem no tempo, é necessária uma condição inicial.

Para condição inicial, tomou-se que toda a peça, no instante inicial, t_0 , apresenta uma temperatura uniforme T_{in} , conforme Equação 9. Essa temperatura depende do processo de cozimento do presunto, ou seja, é a temperatura final do processo de cozimento.

$$T(x, y)|_{t_0} = T_{in} \quad \text{Equação 9}$$

Onde t_0 é o instante inicial, T_{in} é a temperatura inicial da peça.

Para a condição de contorno do centro da peça, adotou-se a hipótese de simetria da temperatura (Equação 10), pois neste ponto a temperatura apresenta seu pico máximo

durante o processo de resfriamento. Com isso, a soma das derivadas da temperatura em relação às coordenadas é nula.

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} + \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad \text{Equação 10}$$

Para a condição de contorno na superfície da peça, a temperatura é constante ao longo do tempo e igual a temperatura da água, (Equação 11);

$$T(L, L) = T_{H2O} \quad \text{Equação 11}$$

Onde $T(L, L)$ é a temperatura na superfície da peça e T_{H2O} é a temperatura da água de resfriamento.

3.3.3 Modelo

Com o balanço de energia, condição inicial e condições de contorno estipuladas, o modelo matemático referente ao resfriamento do presunto em tanques é representado pelas Equação 8 à Equação 11, já apresentadas anteriormente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \end{array} \right. \quad \text{Equação 8}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x, y) \Big|_{t_0} = T_{in} \end{array} \right. \quad \text{Equação 9}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} + \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \end{array} \right. \quad \text{Equação 10}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T(L, L) = T_{H2O} \end{array} \right. \quad \text{Equação 11}$$

3.3.4 Adimensionalização das Variáveis Espaciais

A fim de generalizar o modelo para qualquer volume de controle que garanta as hipóteses anteriores, foi aplicada a adimensionalização nas coordenadas x e y (Equação 12 e Equação 13).

$$\eta_x = x \cdot L_t \quad \text{Equação 12}$$

$$\eta_y = y \cdot L_t \quad \text{Equação 13}$$

Onde η_x e η_y são as variáveis adimensionalizadas no eixo x e y , respectivamente, e L_t é o lado da região quadrática da peça de presunto.

O modelo adimensionalizado, obtido através das Equações 8 à Equação 11, é representado pela Equação 14 à Equação 17:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{L_t^2} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \eta_x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \eta_y^2} \right) \end{array} \right. \quad \text{Equação 14}$$

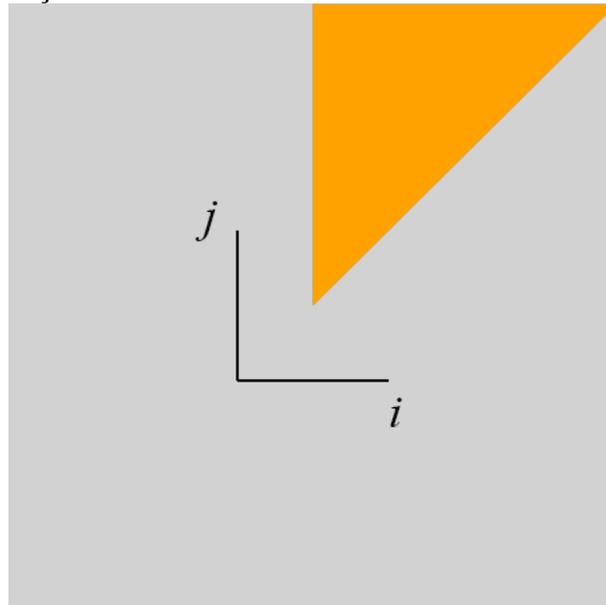
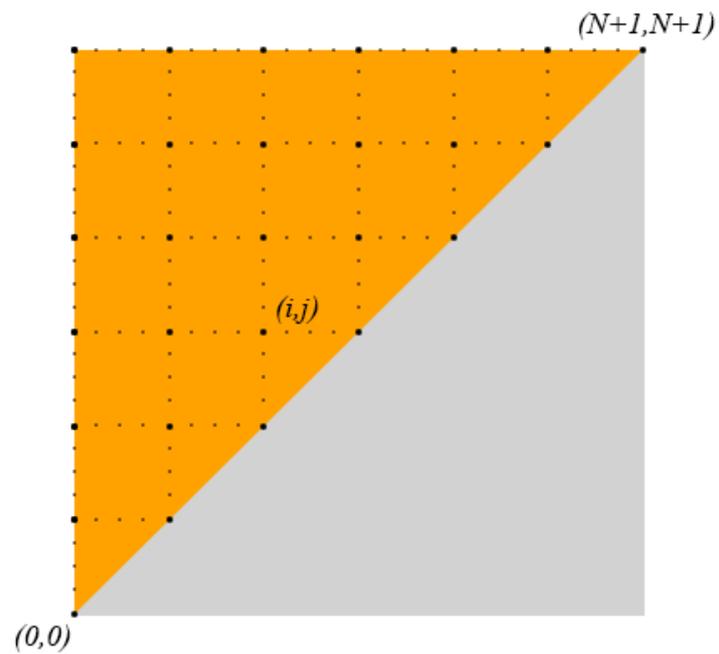
$$T(x, y)|_{t_0} = T_{in} \quad \text{Equação 15}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial \eta_x} \Big|_{\eta_x = 0} + \frac{\partial T}{\partial \eta_y} \Big|_{\eta_y = 0} = 0 \end{array} \right. \quad \text{Equação 16}$$

$$T(1,1) = T_{H2O} \quad \text{Equação 17}$$

3.3.5 Definição da Malha do Problema

Com o objetivo de facilitar a resolução do problema, foi proposta a simplificação do espaço bidimensional a ser analisado por uma malha triangular como representado na Figura 19 e Figura 20. Tal simplificação pode ser feita devido a simetria do espaço, onde cada 1/8 da área quadrada se equivale. A malha é montada do ponto da origem, (0,0), até o ponto mais externo, (N+1, N+1), onde N é o número de pontos internos para um eixo da malha. O ponto (i,j) é um ponto genérico no interior da malha.

Figura 19: Representação da malha bidimensional**Fonte:** O autor**Figura 20:** Detalhamento da malha bidimensional com a distribuição dos pontos**Fonte:** O autor

O número de pontos internos da malha pode ser calculado pela Equação 18.

$$N_{\text{pontos}} = \frac{(1 + N + 1)}{2} \cdot (N + 1)$$

Equação 18

Onde N_{pontos} é a quantidade de pontos internos da malha e N é a quantidade de pontos internos para um eixo da malha.

3.3.6 Discretização por Diferenças Finitas

Para resolução do modelo, utilizou-se o método de diferenças finitas apresentado por PINTO (2001). O modelo matemático discretizado é representado pela Equação 19 à Equação 22.

$$\frac{dT(i,j)}{dt} = \frac{\alpha}{L_t^2} \cdot \left[\frac{T(i+1,j) - 2 \cdot T(i,j) + T(i-1,j)}{h_x^2} + \frac{T(i,j+1) - 2 \cdot T(i,j) + T(i,j-1)}{h_y^2} \right]$$

Equação 19

$i = 1 \dots N, j = 1 \dots N$

$$T(i,j) = T_0$$

Equação 20

$$T(i, N + 1) = T_{H_2O}$$

Equação 21

$$T(0,0) = \frac{4 \cdot T(1,0) + 4 \cdot T(0,1) - T(2,0) - T(0,2)}{6}$$

Equação 22

3.3.7 Implementação do Modelo no Software MathWorks® Matlab para Resolução

O modelo discretizado e adimensionalizado foi implementado no software MathWorks® Matlab R2013a. O sistema foi resolvido pelo método numérico de Runge-Kutta, representado pela função *ode45* disponível no software.

Adotou-se a malha com 19 pontos internos em i e em j , com formação triangular superior, totalizando 231 pontos.

O tempo final de cálculo adotado foi de 340 min, definido de forma a extrapolar o tempo de resfriamento obtido no processo industrial. O passo de integração no software Matlab foi mantido como variável, seguindo o implementado na rotina *ode45*.

3.3.8 Validação do Modelo

Com objetivo de validar o modelo, simulou-se as condições dos três testes para posterior análise gráfica dos valores calculados e das temperaturas experimentais. As condições adotadas para as simulações estão apresentadas na Tabela 5 e foram obtidas através das condições obtidas experimentalmente.

Tabela 5: Condições para realização das simulações

Condições das Simulações		
	T_0 [°C]	T_{H2O} [°C]
Teste 1	75,0	5,0
Teste 2	72,0	4,6
Teste 3	73,5	3,6

Fonte: O autor

Além da análise gráfica, foi calculado o coeficiente de determinação R^2 para cada teste e posição estudada, para verificar o ajuste dos valores calculados com os dados experimentais (Equação 23).

$$R^2 = \left(\frac{\sum(T_{exp} - \bar{T}_{exp})(T_{calc} - \bar{T}_{calc})}{\sqrt{\sum(T_{exp} - \bar{T}_{exp})^2 \sum(T_{calc} - \bar{T}_{calc})^2}} \right)^2 \quad \text{Equação 23}$$

Onde R^2 é o coeficiente de determinação, T_{exp} é a temperatura experimental (°C), \bar{T}_{exp} é a média das temperaturas experimentais (°C), T_{calc} é a temperatura calculada e \bar{T}_{calc} é a média das temperaturas calculadas (°C).

Para realizar o comparativo das variações de temperatura nas posições dentro das peças (centro, superfície e posição intermediária) entre os dados experimentais e os

valores calculados e o resultado destas variações obtidas na literatura (CEPEDA et al., 2013), utilizou a Raiz do Desvio Médio Quadrático (*Root Mean Square Error*).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{exp} - T_{calc})^2}{n}} \quad \text{Equação 24}$$

Onde $RMSE$ é a raiz do desvio médio quadrático, T_{exp} é a temperatura experimental ($^{\circ}\text{C}$), T_{calc} é a temperatura calculada e n é a quantidade de medições.

3.3.9 Teste de sensibilidade para a difusividade térmica (α)

Com o intuito de avaliar a influência da difusividade térmica estimada através da Equação 5 no ajuste do modelo, realizou-se o teste de sensibilidade deste parâmetro, variando-se seu valor em $\pm 25\%$.

Os resultados obtidos foram comparados com os dados experimentais e com a difusividade térmica estimada originalmente de forma a verificar se a variação deste parâmetro nos níveis estabelecidos melhorou o ajuste do modelo.

3.3.10 Simulação Utilizando o Modelo

Com o objetivo de simular o processo dentro das diretrizes descritas pelo USDA-FSIS (máximo 1,5 h na faixa de temperatura de 54 a 26 $^{\circ}\text{C}$ e não mais do que 5 h na faixa de temperatura de 54 a 4,4 $^{\circ}\text{C}$), realizou-se duas simulações utilizando o modelo desenvolvido.

3.3.10.1 Simulação da Operação Considerando Temperatura de Resfriamento Constante

Simulou-se o modelo com as condições mais severas, sendo a temperatura inicial, T_0 , 75 $^{\circ}\text{C}$, com uma variação da temperatura da água de resfriamento, T_{H2O} , de 1 a 20 $^{\circ}\text{C}$, para verificar a relação tempo de permanência da peça em temperaturas de 54 a 26 $^{\circ}\text{C}$ em seu centro com a temperatura da água de resfriamento. De 1 até 15 $^{\circ}\text{C}$, o incremento de temperatura foi de 1 $^{\circ}\text{C}$ e, após 15 $^{\circ}\text{C}$, de 5 $^{\circ}\text{C}$.

3.3.10.2 Simulação da Operação com Patamares de Temperaturas de Resfriamento Distintas

Com o tempo máximo de resfriamento recomendado pelo USDA-FSIS, simulou-se a condições de patamares operacionais de temperatura, onde na primeira etapa há entrada de água fria à 12 °C e na segunda etapa, entrada de água fria a uma temperatura a ser estabelecida. Para definir essa temperatura, simulou-se o segundo patamar com água a temperatura variando de 1 a 3 °C.

Para modelar essa etapa, aplicou-se o balanço de energia no tanque, considerando equalização perfeita de temperatura no interior, densidade da água constante ao longo da variação de temperatura e vazões de saída igual a de entrada. Adotou-se como velocidade nas tubulações como 2 m.s⁻¹, valor de velocidade recomendado para água na indústria (MACINTYRE, 2010). Com isso, o balanço energético é expresso pela Equação 25.

$$\begin{cases} \frac{dT_{H2O}}{dt} = \frac{\dot{v} \cdot T_{H2O}^{2^{\circ}Pat}}{V} - \frac{\dot{v}}{V} \cdot T_{H2O} \\ T_{H2O}(t = 0) = T_{H2O}^{1^{\circ}Pat} \end{cases} \quad \text{Equação 25}$$

Onde T_{H2O} é a temperatura da água no interior do tanque (°C), V é o volume de água no tanque (2,82 m³), \dot{v} é a vazão de entrada e saída de água do tanque (m³.min⁻¹), $T_{H2O}^{i^{\circ}Pat}$ é a temperatura de entrada da água referente ao patamar i (°C).

Resolvendo analiticamente a Equação 25, encontra-se a equação referente à equalização de temperatura do tanque do instante de troca de patamares ao final da operação de resfriamento (Equação 26).

$$T_{H2O}(t) = T_{H2O}^{2^{\circ}Pat} + (T_{H2O}^{1^{\circ}Pat} - T_{H2O}^{2^{\circ}Pat}) \cdot e^{\left[\left(-\frac{\dot{v} \cdot t}{V}\right) - t^{2^{\circ}Pat}\right]} \quad \text{Equação 26}$$

Onde $t^{2^{\circ}Pat}$ (min) é o tempo referente ao início do segundo patamar de temperatura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir estão apresentados os resultados para os dados experimentais dos processos de resfriamento de presunto em tanques, os modelos obtidos, os ajustes propostos e as simulações utilizando o modelo matemático desenvolvido.

4.1 DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α)

4.1.1 Obtenção do Teor de Umidade

Os resultados das análises do teor de umidade e proteína das amostras, bem como a relação umidade:proteína calculada são mostrados na Tabela 6. A média do teor de umidade encontrada para as oito amostras foi de 75,84% \pm 0,35. Os valores de proteína e a relação umidade:proteína ficaram de acordo com o preconizado pela legislação brasileira sendo para a proteína o mínimo de 14% e a relação umidade:proteína máximo 5,2 (BRASIL, 2000).

Tabela 6: Resultado do teor de umidade para as amostras de presunto

Amostra	Proteína [%]	Umidade [%]	Relação Umidade:Proteína
1	17,09	75,72	4,43
2	17,40	75,56	4,34
3	17,03	75,80	4,45
4	16,95	76,06	4,49
5	17,23	75,73	4,40
6	17,08	76,55	4,48
7	17,23	75,94	4,41
8	17,10	75,39	4,41
Média	17,14	75,84	-

Fonte: O autor

4.1.2 Determinação da Difusividade Térmica

Com a umidade média de 75,84%, a difusividade térmica calculada em função da umidade obtida através da Equação 5 foi determinada em $8,48 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$. Este valor fica de acordo com os encontrados para presuntos por Ashrae (1993), Oliveira (2005) e Marcotte (2008).

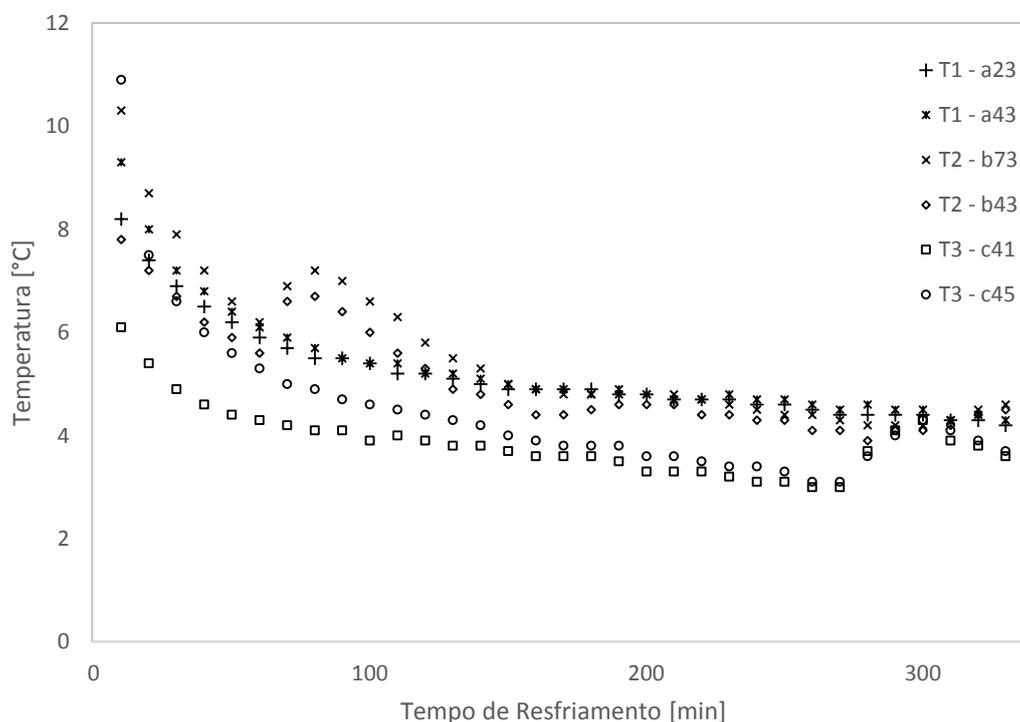
4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

4.2.1 Homogeneidade da temperatura da água de resfriamento

Na Figura 21 é mostrada a variação da temperatura da água no tanque de resfriamento obtida através das medições nos Testes 1, 2 e 3 para cada gaiola e posição. Assim, T1 – a₂₃ refere-se às medições da temperatura da água de resfriamento no Teste 1 posição (2,3) e assim por diante.

Verifica-se valores de temperatura maiores no início do processo com redução logo em seguida. As temperaturas da água mais altas no início do processo de resfriamento são explicadas pela transferência de calor das gaiolas provenientes do processo de cozimento para a água de resfriamento do tanque, fazendo com que a temperatura total do sistema se eleve. Contudo, em seguida as temperaturas se reduzem, mantendo-se na faixa de 4 a 6 °C.

Figura 21: Homogeneidade da temperatura da água durante o processo de resfriamento



Fonte: O autor

Para o modelo matemático desenvolvido, não se levou em consideração esta variação inicial da temperatura da água de resfriamento já que, após algum tempo, as

temperaturas se estabilizam, com uma diferença em torno de 2 °C entre as medições observadas.

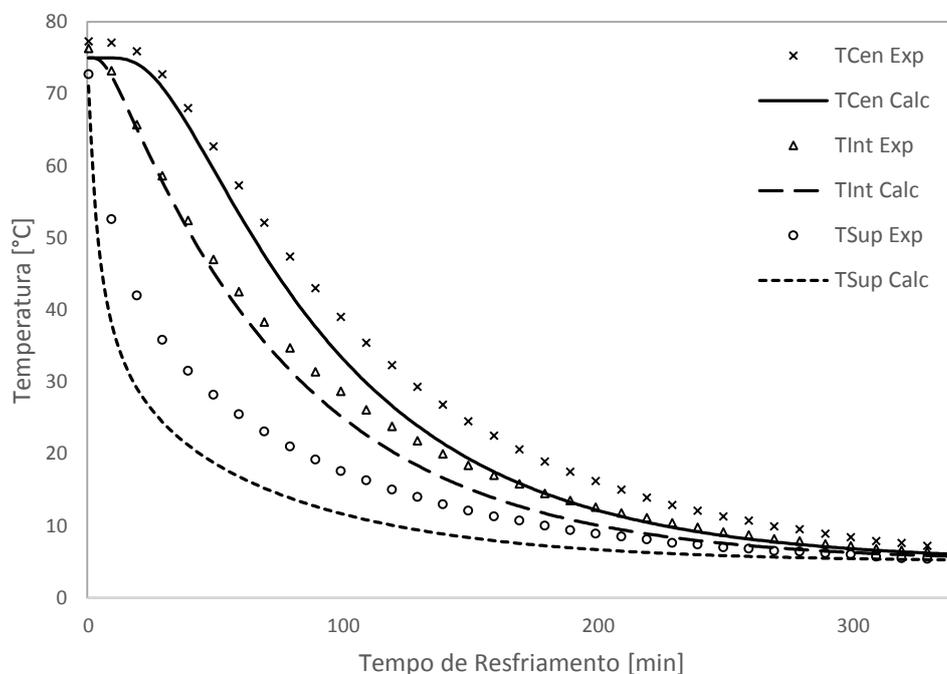
Esta estabilização se deve à renovação contínua da água de resfriamento. Assim, a temperatura da água de resfriamento foi considerada constante, conforme hipóteses iniciais.

4.2.2 Validação do modelo

Nas figuras abaixo (Figura 22 à Figura 27) encontram-se os resultados experimentais e os valores calculados através do modelo matemático da temperatura em função do tempo para os três testes (Teste 1, Teste 2 e Teste 3) com a tomada de dados nas seções planejadas no interior da peça:

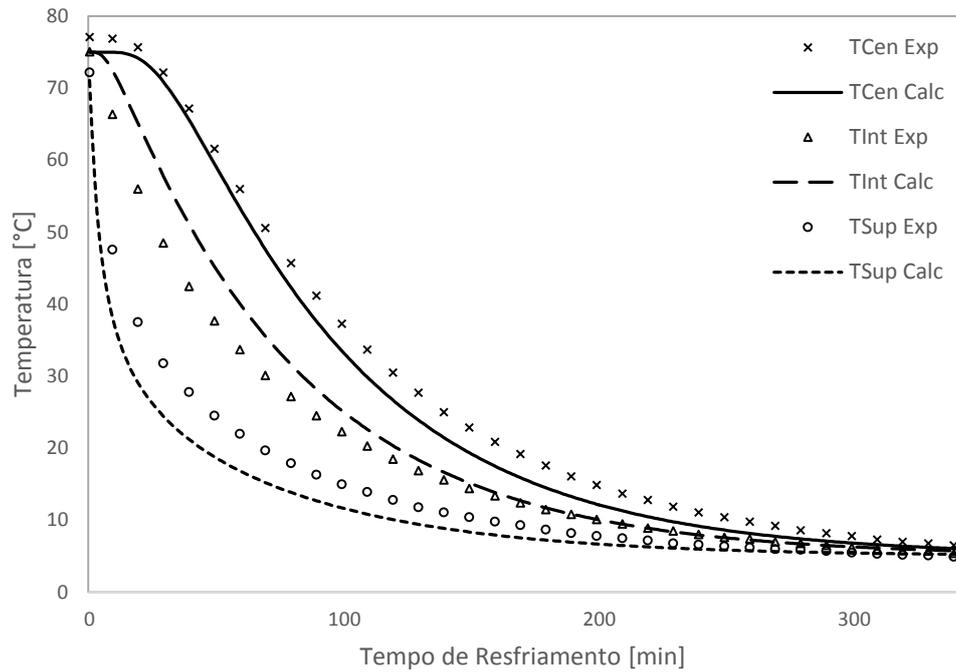
- Temperatura no núcleo calculada ($T_{Cen\ Calc}$) e experimental ($T_{Cen\ Exp}$);
- Temperatura na posição intermediária calculada ($T_{Int\ Calc}$) e experimental ($T_{Int\ Exp}$);
- Temperatura na superfície calculada ($T_{Sup\ Calc}$) e experimental ($T_{Sup\ Exp}$).

Figura 22: Comparação das temperaturas experimentais e os valores calculados para o resfriamento no Teste 1 – a_{23}



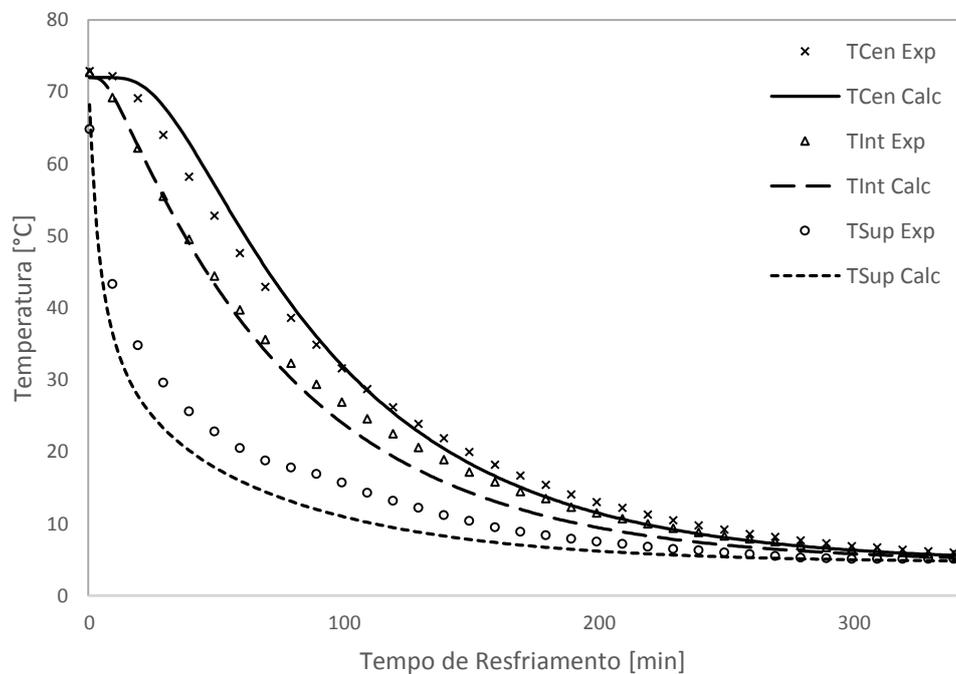
Fonte: O autor

Figura 23: Comparação das temperaturas experimentais e os valores calculados para o resfriamento no Teste 1 – a₄₃



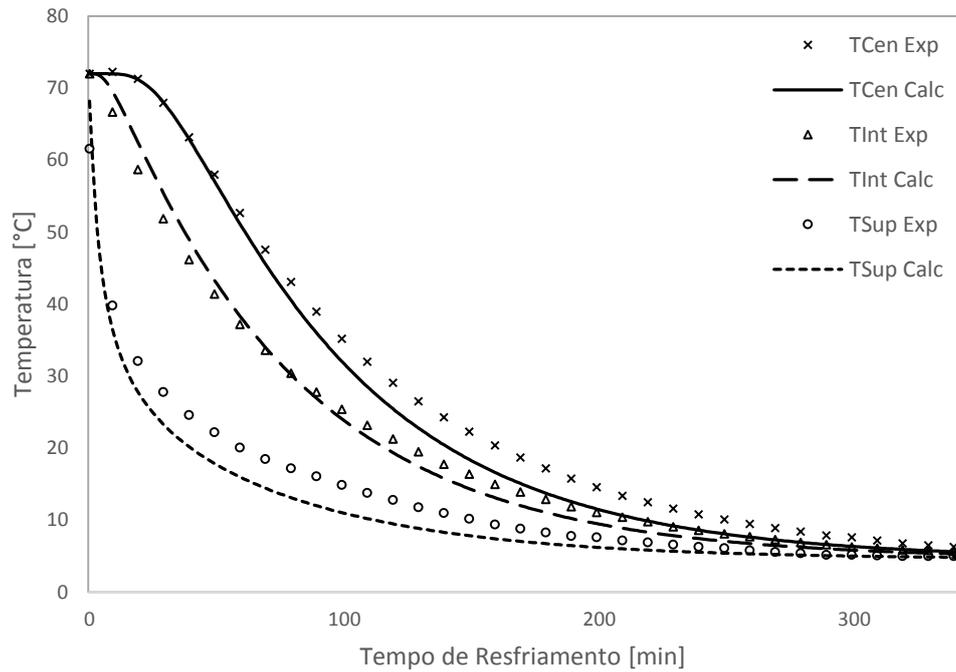
Fonte: O autor

Figura 24: Comparação das temperaturas experimentais e os valores calculados para o resfriamento no Teste 2 – b₄₃



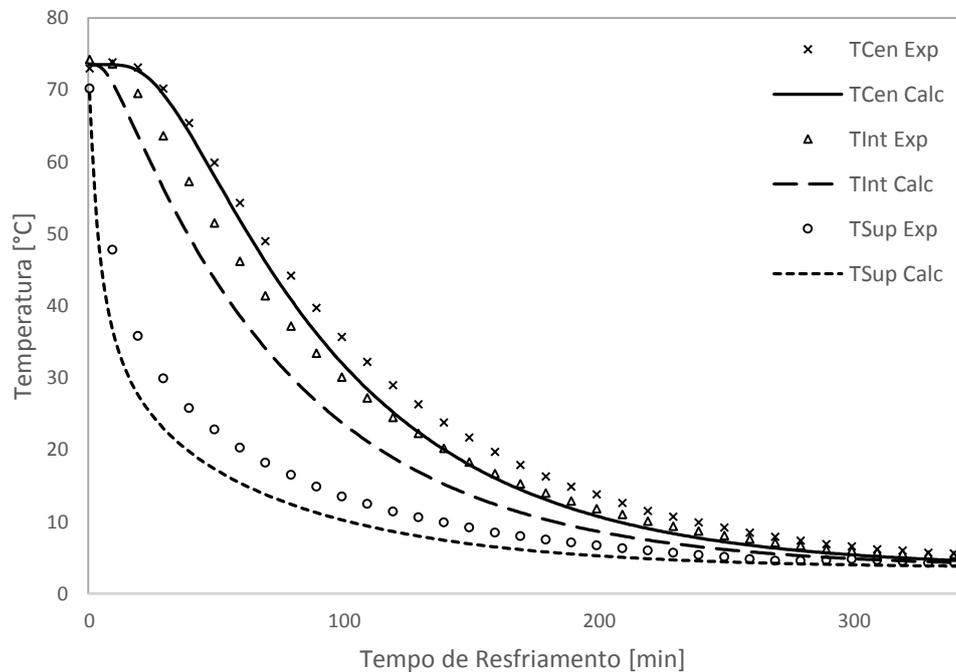
Fonte: O autor

Figura 25: Comparação das temperaturas experimentais e os valores calculados para o resfriamento no Teste 2 – b₇₃



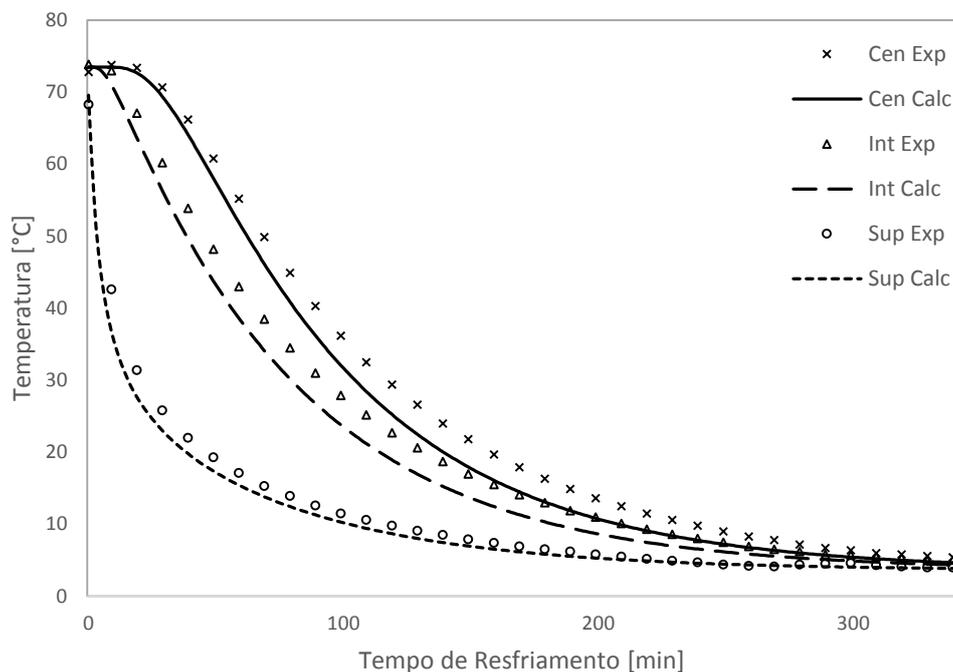
Fonte: O autor

Figura 26: Comparação das temperaturas experimentais e os valores calculados para o resfriamento no Teste 3 – c₄₅



Fonte: O autor

Figura 27: Comparação das temperaturas experimentais e os valores calculados para o resfriamento no Teste 3 – c₄₁



Fonte: O autor

Alguns desvios, principalmente nas etapas inicial e intermediária do processo são observadas, podendo ser explicados pela movimentação das sondas no interior da peça, que, apesar dos posicionamentos previstos nos nichos e orifícios do equipamento projetado, não impede pequenas variações no interior do produto. Cabe ressaltar que os experimentos foram conduzidos em situações reais e em escala industrial, portanto os modelos representam sistemas reais, que levam em consideração desvios de ampliações de escala laboratorial e piloto.

Na Tabela 7 são demonstrados os valores para o coeficiente de determinação R^2 . Observa-se que o coeficiente de determinação R^2 para todos os testes e posições apresenta valores superiores a 0,96, indicando que o modelo desenvolvido no presente estudo é adequado para representar o comportamento experimental do processo de resfriamento de presunto em tanques. Assim, temperaturas previstas pela modelagem matemática para os pontos de coleta são muito próximas daquelas temperaturas obtidas experimentalmente e, particularmente, há tendências similares para todas as posições estudadas nos três testes realizados.

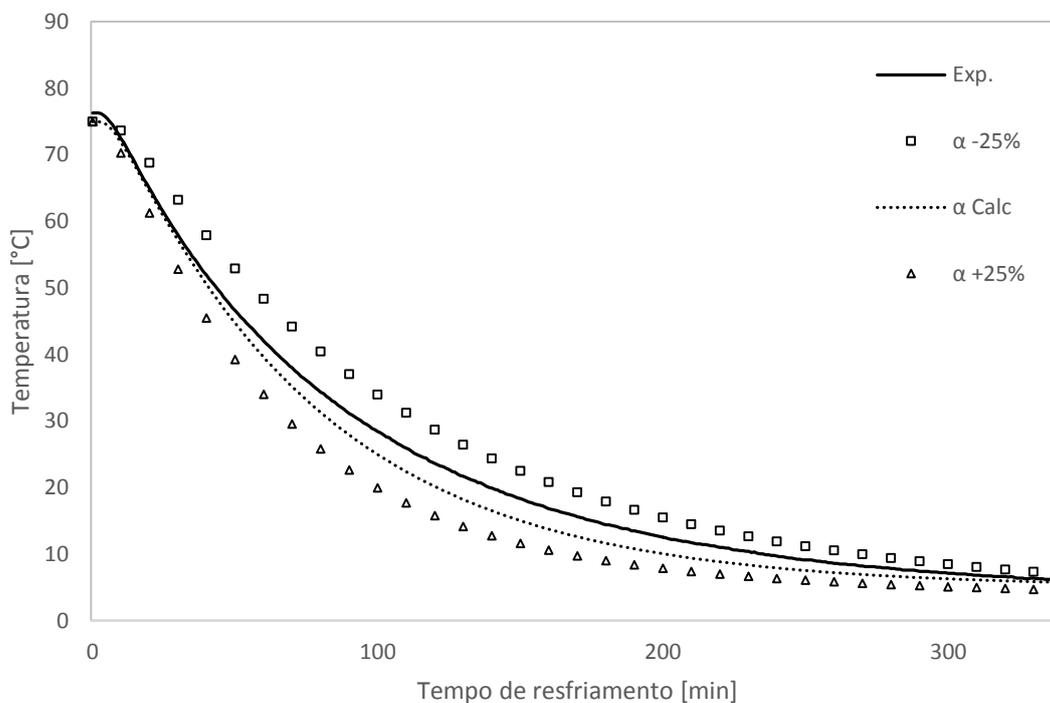
Tabela 7: Coeficientes de determinação R^2

Teste	Posição	Sonda					
		1	2	3	5	6	7
1	a23	0,969086	0,996483	0,995003	-	-	-
	a43	-	-	-	0,985929	0,992318	0,997529
2	b43	-	-	-	0,974278	0,996743	0,99673
	b73	0,972648	0,99662	0,996541	-	-	-
3	c41	0,994503	0,996562	0,996672	-	-	-
	c45	-	-	-	0,989503	0,991318	0,997486

Fonte: O autor

4.2.3 Teste de sensibilidade para a difusividade térmica (α)

Além das possíveis movimentações das sondas, outro fator que pode ter levado a variações entre os dados experimentais e os valores calculados foi a estimativa da difusividade térmica. Como mencionado anteriormente, este parâmetro foi estimado em função da umidade do produto. Para avaliar se uma variação na difusividade térmica ocasionaria uma melhora no ajuste do modelo, foi realizado teste de sensibilidade com uma variação de $\pm 25\%$ no valor da difusividade térmica, conforme demonstrado na Figura 28.

Figura 28: Teste de sensibilidade para a difusividade térmica

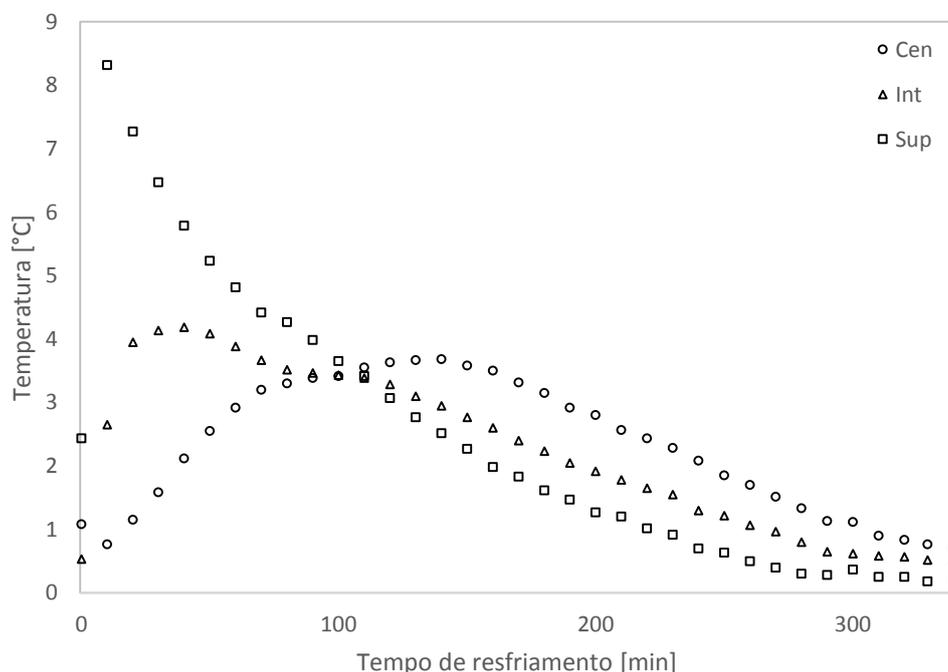
Fonte: O autor

Um aumento de 25% do α ocasionou maiores desvios entre os dados experimentais e os valores calculados. Já a redução de 25% do α também não implicou numa melhora dos desvios entre os dados experimentais e os valores calculados. Optou-se, assim, por manter o α estimado inicialmente.

4.2.4 Diferenças de temperatura entre os dados experimentais e os valores calculados

As maiores variações na etapa inicial do processo ocorrem nas medições próximas à superfície, o que é explicado pela maior possibilidade de variação no posicionamento das sondas em virtude de sua localização. Contudo, após o decorrer do processo de resfriamento, estas variações se reduzem ficando próximo a 1 °C na etapa final. As médias dos desvios entre os dados experimentais e os valores calculados por localização encontram-se na Figura 29.

Figura 29: Diferenças médias de temperaturas entre os dados experimentais e os valores calculados



Fonte: O autor

Variações semelhantes foram encontradas por Wang e Sun (2002), onde os mesmos relatam maiores diferenças de temperatura na superfície entre as medições experimentais e os valores calculados durante o processo de resfriamento de carnes

cozidas. Os autores também observaram variações menores de temperatura no núcleo do que na superfície. Amézquita et al. (2005), encontraram comportamentos semelhantes para o processo de resfriamento de presunto cozido desossado.

Cepeda et al. (2013) utilizaram o método *RMSE – Root-mean-square error* (raiz do erro médio quadrático) para validar o modelo de resfriamento de carnes RTE. Na Tabela 8 encontram-se os valores para as médias e desvio-padrão do modelo proposto e os resultados da média e desvio-padrão obtidos por Cepeda et al. (2013). Os resultados encontrados foram semelhantes aos encontrados por estes autores ao levar em consideração as diferentes seções do produto, sendo as médias menores para o núcleo do produto e maiores para a superfície. Este fato corrobora a prática das indústrias em utilizar as tomadas de temperatura no núcleo do produto – centro radial – para validação de processos e sua utilização em programas como *HACCP – Hazard Analysis and Critical Control Point* (APPCC – Análise de Perigos e Controle de Pontos Críticos).

Tabela 8: Avaliação do modelo em diferentes seções/posições do produto na gaiola

Teste (posição)	RMSE [°C]		
	Cen	Int	Sup
Teste 1 (4,3)	2,53	3,68	3,61
Teste 1 (2,3)	3,74	2,31	5,87
Teste 2 (4,3)	1,87	1,84	3,30
Teste 2 (7,3)	2,44	1,68	2,63
Teste 3 (4,5)	2,55	4,58	3,89
Teste 3 (4,1)	2,75	2,86	1,97
Média	2,65 – 1,19 ^a	2,82 – 1,73 ^a	3,55 – 2,01 ^a
Desvio-padrão	0,61 – 0,54 ^a	1,13 – 0,48 ^a	1,33 – 1,01 ^a

Fonte: O autor

^a Resultados obtidos por Cepeda et al., (2013) para as posições similares

4.2.5 Simulação da Operação para Adequação às Recomendações do USDA-FSIS

O USDA-FSIS recomenda que durante o processo de resfriamento a temperatura interna do produto não pode permanecer entre 54 a 26 °C mais do que 1,5 h e nem entre 54 e 4,4 °C por mais do que 5 h. A importância de observar legislações e diretrizes como as do USDA-FSIS reside no fato de que estas legislações e diretrizes, por trazerem condições de processo mais severas, acabam por se tornarem as normas globais. Assim, as adequações a estas normas acabam por se tornarem obrigatórias em países como o

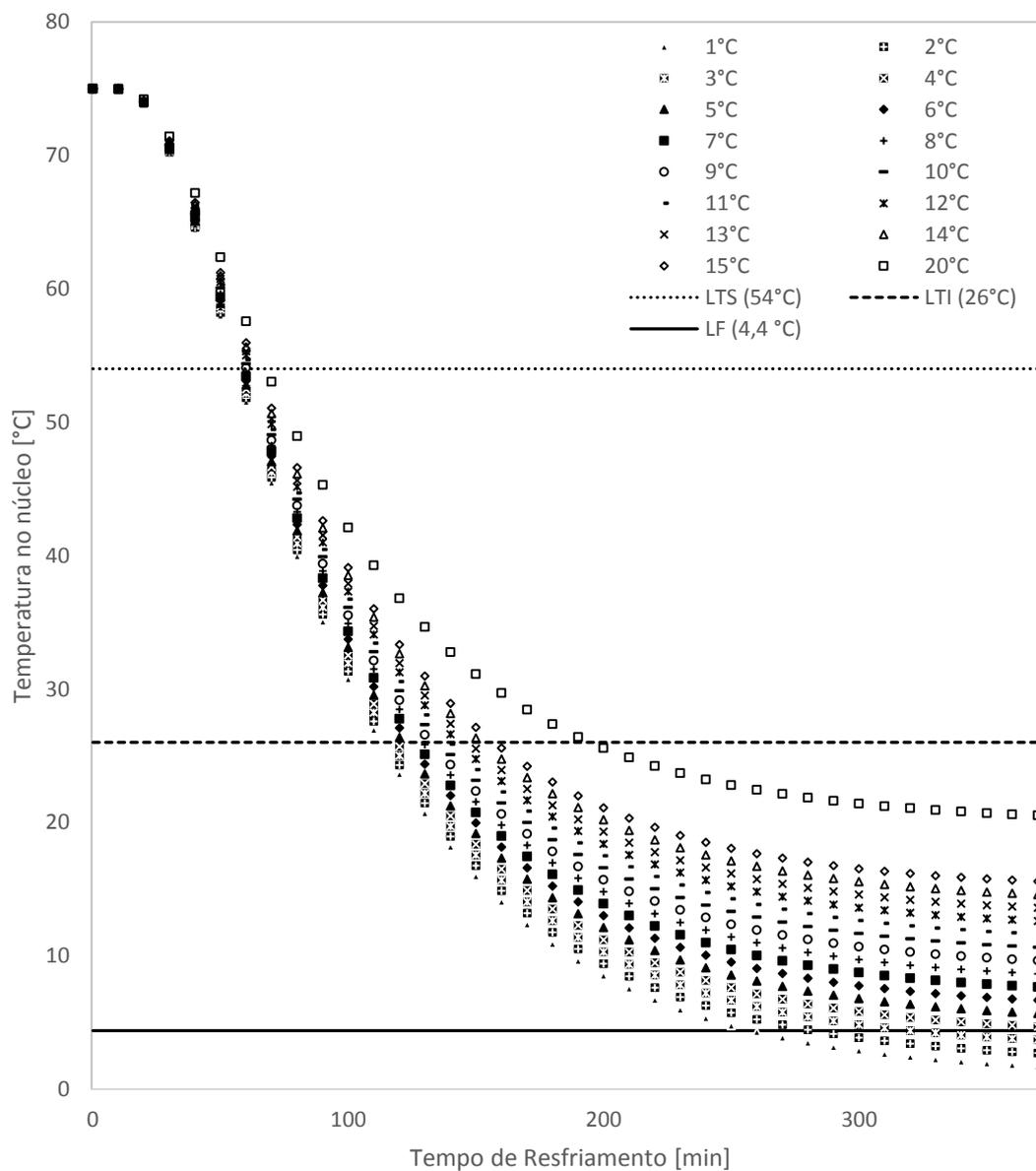
Brasil, ou antes disso, de países importadores de produtos brasileiros, que possui, como neste caso, legislações mais brandas e menos aprofundadas quanto a segurança alimentar.

Assim, com base nas duas diretrizes, foram realizadas simulações, tanto com a temperatura da água constante e com a temperatura da água em dois patamares.

4.2.5.1 Simulação da Operação com Temperatura da Água de Resfriamento Constante

Os resultados para a simulação com a temperatura da água de resfriamento constante encontram-se na Figura 30 e Tabela 9.

Figura 30: Simulação do resfriamento com apenas um patamar de temperatura



Fonte: O autor

Tabela 9: Simulação com a temperatura da água de resfriamento constante

T _{H2O} [°C]	Tempo 54 a 26 °C				Tempo até 4,4 °C		
	Entrada 54°C [min]	Saída 26°C [min]	54/26°C [min]	55/26°C [h]	4,4°C [min]	T _{total} [min]	T _{total} [h]
1	57	113	56	0,93	257	200	3,33
2	57	115	58	0,97	282	225	3,75
3	58	117	59	0,98	321	263	4,38
4	58	119	61	1,02	-	-	-
5	58	122	64	1,07	-	-	-
6	59	124	65	1,08	-	-	-
7	60	127	67	1,12	-	-	-
8	60	130	70	1,17	-	-	-
9	61	133	72	1,20	-	-	-
10	61	136	75	1,25	-	-	-
11	62	140	78	1,30	-	-	-
12	62	144	82	1,37	-	-	-
13	63	148	85	1,42	-	-	-
14	64	153	89	1,48	-	-	-
15	64	158	94	1,57	-	-	-
20	68	195	127	2,12	-	-	-

Fonte: O autor

As temperaturas da água de resfriamento utilizadas variaram de 1 a 20 °C. O limite de temperatura superior da faixa 54 a 26 °C (LTS), 54 °C, e o limite de temperatura inferior da faixa 54 a 26 °C (LTI), 26 °C, bem como o limite final de temperatura (LF), 4,4 °C, encontram-se plotados nos gráficos de forma a auxiliar a visualização dos parâmetros de temperatura estabelecidos pelas diretrizes do USDA-FSIS.

Para a primeira diretriz – *a temperatura interna do produto não pode permanecer entre 54 a 26 °C mais do que 1,5 h* – observa-se que até a uma temperatura da água de resfriamento de 14 °C, essa diretriz é satisfeita. A uma temperatura de 14 °C, tem-se a temperatura de 56 °C no núcleo do produto após 64 min do início do processo de resfriamento. A essa temperatura, atinge-se 26 °C após 153 min, perfazendo um total de 89 min com a temperatura no núcleo de 54 até 26 °C. Acima de 14 °C, a primeira diretriz não é satisfeita. Em todas as temperaturas simuladas acima desta temperatura, o tempo em que o produto teve temperatura no núcleo de 54 a 26 °C foi maior do que 1,5 h.

Para a segunda diretriz – *temperatura no núcleo entre 54 a 4,4 °C por não mais de 5 h* – observa-se que somente temperaturas da água de resfriamento de até 3 °C satisfazem esta condição, com um tempo total com as temperaturas no núcleo de 54 a 4,4

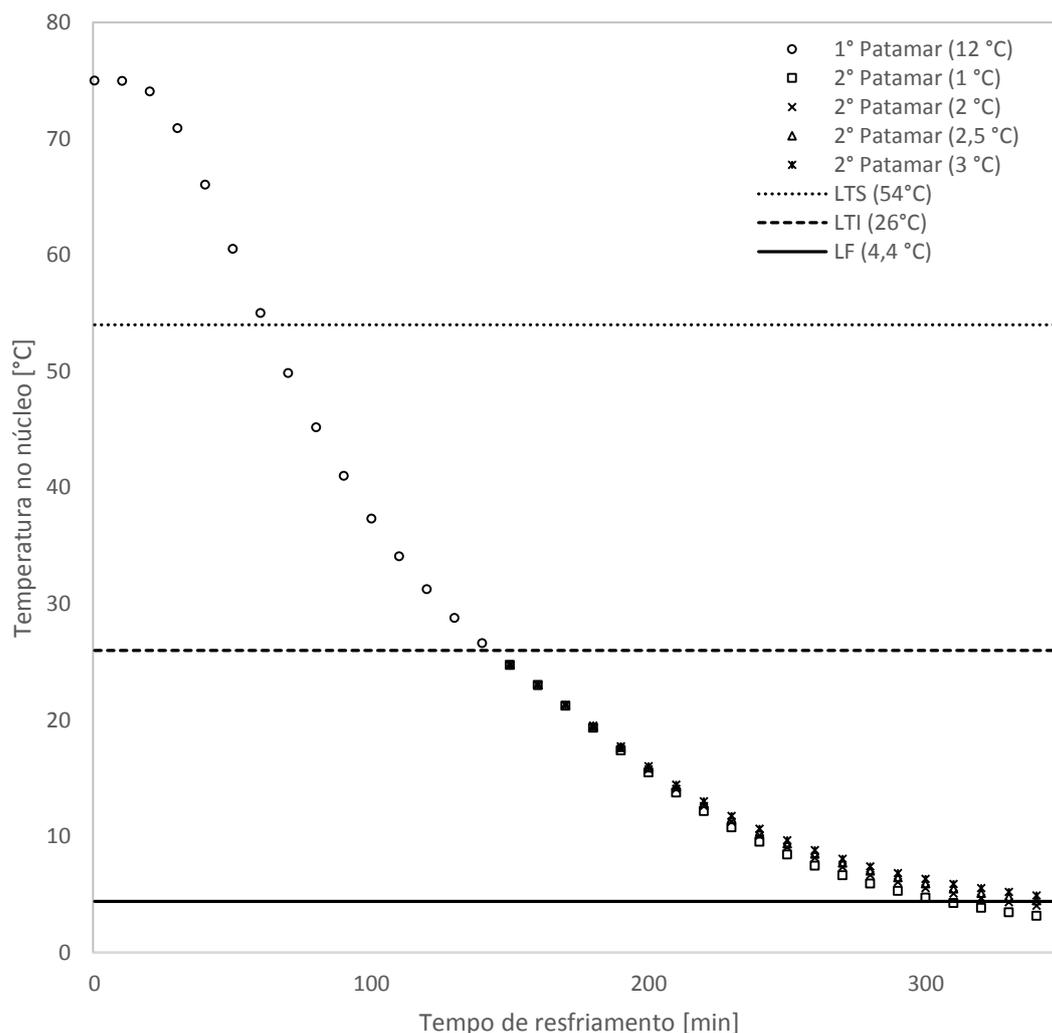
°C de 4,38 h. Temperaturas da água de resfriamento de 4 °C e acima desta, fazem com que o tempo de processo com a temperatura no núcleo até 4,4 °C sejam superiores a 5 h.

4.2.5.2 Simulação da Operação com Temperatura da Água de Resfriamento em Dois Patamares

Os resultados da simulação com a utilização da temperatura da água de resfriamento em dois patamares encontram-se na Figura 31 e Tabela 10. Esta configuração de resfriamento se torna útil na indústria devido a melhora na eficiência energética.

Em 2011, a tarifa média de 329,00 R\$.MWh⁻¹ para a indústria no Brasil foi mais do que 50% superior à média de 215,50 R\$.MWh⁻¹ encontrada para um conjunto de 27 países do mundo, para os quais há dados disponíveis na Agência Internacional de Energia. Quando comparado aos países constituintes dos BRICs, a tarifa de energia elétrica industrial brasileira foi 134% maior do que a média das tarifas de China, Índia e Rússia (140,70 R\$.MWh⁻¹). A comparação com quatro de seus principais parceiros comerciais – EUA, Argentina, Alemanha e China – mostra, igualmente, que o país tem tarifa de energia elétrica para indústria muito acima do padrão internacional (FIRJAN, 2011). A situação desde então piorou com o acionamento das usinas termoelétricas em virtude da crise hídrica e da ingerência do governo no setor elétrico, levando as empresas geradoras e distribuidoras amargarem piora nos seus resultados e o consequente repasse dos seus custos aos consumidores.

Desta forma, a racionalização dos processos se torna essencial em um ambiente de aumento de custos e de concorrência. Realizar o resfriamento com dois patamares de temperatura melhora a eficiência energética, já que a operação não trabalha em condições tão severas onde o consumo de energia elétrica é maior. Utilizou-se a água de resfriamento no primeiro patamar a 12 °C, já que nesta temperatura o produto atinge a temperatura de 54 °C no núcleo após 62 min do início do processo de resfriamento e 26 °C após 144 min, com um total de 82 min nesta etapa, satisfazendo a primeira diretriz proposta pelo USDA-FSIS com uma pequena margem de 8 min, margem necessária devido às variações inerentes aos processos industriais. A simulação no segundo patamar utilizou quatro temperaturas distintas: 1, 2, 2,5 e 3 °C, conforme apresentado na **Figura 31**: Simulação com a água de resfriamento em dois patamares de temperatura Figura 31.

Figura 31: Simulação com a água de resfriamento em dois patamares de temperatura

Fonte: O autor

Conforme a Figura 31, para a água de resfriamento a 1 °C, atingiu-se a temperatura de 4,4 °C com um tempo total do processo de 308 min e entre 54 e 4,4 °C de 246 min (4,1 h). Com a água a 3 °C, a condição de temperatura de 54 a 4,4 °C não ser superior a 5 h não é satisfeita, sendo o tempo total de 54 a 4,4 °C de 302 min.

Tabela 10: Simulação com a utilização de dois patamares de temperatura

$T_{H_2O}^{1°Pat}$ [°C]	Tempo 54 a 26 °C [min]				$T_{H_2O}^{2°Pat}$ [°C]	Tempo até 4,4 °C [min]		
	Entrada 54°C [min]	Saída 26°C [min]	54/26°C [min]	55/26°C [h]		4,4°C [min]	T_{total} [min]	T_{total} [h]
12	62	144	82	1,37	1	308	246	4,10
					2	329	267	4,45
					2,5	344	282	4,70
					3	364	302	5,03

Fonte: O autor

Assim, para a operação em escala industrial, pode-se trabalhar com a temperatura de 12 °C na primeira etapa e, após o produto atingir 26 °C no núcleo, reduz-se a temperatura da água de resfriamento a temperatura de 1 a 2,5 °C, até atingir 4,4 °C no núcleo. Desta forma, têm-se as condições necessárias para atender as diretrizes recomendadas pelo USDA-FSIS.

É possível ainda, realizar otimizações do processo em temperatura mais baixas do que 12 °C no primeiro patamar, de acordo com a estrutura disponível na indústria, lembrando que em sistemas de bateladas como os sistemas de resfriamento em tanques, a disponibilidade de tanques é um fator importante para a produtividade da planta. Assim, resfriamentos mais rápidos elevam a capacidade de produção da planta, já que se consegue atingir menores temperaturas em menor tempo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os valores calculados através do modelo matemático proposto para a temperatura do presunto em tanques de resfriamento foram condizentes com os dados experimentais obtidos através das medições realizadas com *data logger*. O modelo foi validado e quanto mais próximo do núcleo, menor é a diferença encontrada entre o valor calculado e o dado experimental, garantindo a aplicação do modelo de acordo com a prática das indústrias, que é a coleta de temperatura no centro geométrico da peça de produto.

A difusividade térmica calculada como uma função da umidade do produto foi adequada nas faixas de temperatura estudadas, bem como com o teor de umidade do produto em estudo.

O modelo matemático obtido neste trabalho pode ser empregado para a previsão de tempo e temperatura no processo de resfriamento de presunto em tanques. Além disso, o modelo pode ser utilizado para simulações de tempo e temperatura em diversas situações além das apresentadas neste estudo, auxiliando no dimensionamento de instalações e processos na indústria, bem como para outros produtos com características semelhantes de geometria e composição.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação do modelo para simulação e otimização de processos industriais além daquelas simulações apresentadas neste trabalho, frente à, por exemplo, diversas exigências legais de outros países, mais ou menos severas do que aquelas sugeridas pelo USDA-FSIS.

É possível também realizar a modelagem de crescimento de micro-organismos durante o resfriamento implementando este modelo, de acordo com as necessidades da indústria.

Também é possível utilizar a metodologia proposta neste trabalho para produtos com geometria similar, considerando as características individuais de cada produto quanto às diferenças de composição,

Podem ser realizados estudos quanto às propriedades termofísicas do produto estudado, principalmente quanto à difusividade térmica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABPA – Associação Brasileira de Proteína Animal. Relatório anual 2015. Disponível em: < <http://abpa-br.com.br>>. Acesso em: 08 março de 2016.
- ADKINS, W. A., DAVIDSON, M. G. Ordinary differential equations. New York: Springer Science+Business Media, 2012.
- AGDI – Agência Gaúcha de Desenvolvimento e Promoção do Investimento. **Programa setorial Agroindústria Carne Suína 2012-2014**. Porto Alegre: Política Industrial, 2012.
- AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. Belo Horizonte: UFMG, 2000.
- ALVARADO, J.D.; ROMERO, C.H. Physical properties of fruits-I-II: density and viscosity of juices as functions of soluble solids and content and temperature. *Latin American Applied Research*, v.19, p.15-21, 1989.
- AMÉZQUITA, A., WELLER, C. L., WANG, L., THIPPAREDD, H. BURSON, D. E. Development of an integrated model for heat transfer and dynamic growth of *Clostridium perfringens* during the cooling of cooked boneless ham. *International Journal of Food Microbiology*, v.101, p.123–144, 2005.
- AMENDOLA, M.; TERUEL, B. Uso de um esquema implícito e de splines para a simulação numérica do processo de resfriamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, n. 1, p. 78-82, 2005.
- AOAC. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of the association analytical chemists**. Maryland: AOAC, 2007.
- ARAÚJO, J. L., QUEIROZ, A. J. M., FIGUEIREDO, R. M. F. Propriedades termofísicas da polpa do cupuaçu com diferentes teores de sólidos. *Ciência Agrotécnica*, v.28, n.1, p.126-134, 2004.
- ASHRAE. **Thermal properties of foods. Fundamentals handbook**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, Air-Conditioning Engineers, 1993.
- BARBA, C.; SANTA-MARIA, G.; CALVO, M. M. Analysis of irradiated cooked ham by direct introduction into the programmable temperature vaporizer of a multidimensional gas chromatography system. *Food Chemistry*, v.139, p.241-245, 2013.

- BARBIN, D. F.; NEVES FILHO, L. C.; SILVEIRA JUNIOR, V. Processo de congelamento em túnel portátil com convecção forçada por exaustão e insuflação para paletes. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.29, n.3, p. 667-675, jul/set, 2009.
- BASSANEZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia**. 2 ed. São Paulo: Contexto, 2004.
- BECKER, B. R.; FRICKE, B. A. Hydro cooling time estimation methods. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 29, n. 2, p. 165-174, 2002.
- BELCHIOR, N. C. **Transferência de calor no congelamento da polpa de maracujá**. 2012. 127p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- BENET, L.; GUARDIA, M.D.; IBAÑEZ, C.; SOLÀ, J.; ARNAU, J.; ROURA, E. Low intramuscular fat (but high in PUFA) content in cooked cured pork ham decreased Maillard reaction volatiles and pleasing aroma attributes. **Food Chemistry**, v.196, p.76-82, 2016.
- BIEMBENGUT, M. S; HEIN, N. **Modelagem matemática no ensino**. 3 ed. São Paulo: Contexto, 2003.
- BORÉM, F, M; RIBEIRO, R. C. M. S; CORREA, P. C; PEREIRA, R. G. F. A. Propriedades térmicas de cinco variedades de café cereja descascado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p.475-480, 2002.
- BOUKOULAS, C. J.; KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Density and porosity: Literature data compilation for foods tuffs. **International Journal of Food Properties**, v.9, p. 715-746, 2006.
- BRASIL, Ministério da Agricultura. Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade de Presunto. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, nº419. seção 1, p.7-12, 2000.
- BRESSAN, M. C.; LODI, F.; FERREIRA, M.W.; ANDRADE, P.L.; BOARI, C.A.; PICCOLI, R.H. Influência da embalagem na vida útil de presuntos fatiados. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, p. 433-438, 2007.
- BRESSAN, M. C.; PEREZ, J. R. O. **Tecnologia de carnes e pescados**. Lavras: FAEPE, 2001.
- CARSON, J.K. Review OF effective termal conductivity models for food. **International Journal of Refrigeration**, v. 29, n.6, p.958-977, 2006.

- CASIRAGHI, E., ALAMPRESE, C., POMPEI, C. Cooked ham classification on the basis of brine injection level and pork breeding country. **LWT - Food Science and Technology**, v.40, n. 1, p.164-169, 2007.
- CEPEDA, J. F.; WELLER, C.L.; THIPPAREDDI, H.; NEGAHBAN, M.; SUBBIAH, J. . Modeling cooling of ready-to-eat meats by 3D finite element analysis: Validation in meat processing facilities. **Journal of Food Engineering**, v. 116, p. 450-461, 2013.
- CHAPRA, S. C., CANALE, R. P. **Numerical methods for engineers**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- COSTA, M. R.; FILHO, W.B.; VIEIRA, K.M.; CIPOLLI, A.B.; SILVEIRA, E.T.F. FELÍCIO, E. Perfil sensorial e aceitação de presuntos crus produzidos por métodos tradicionais e acelerados. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, p.170- 176, 2007.
- DAMODARAN, S.; PARKIN, K.; FENNEMA, O.R. **Química de Alimentos de Fennema**.4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.
- DANTAS, L. A; MATA, M. E. R. M; DUARTE, M. E. M.. Programa Computacional Dinâmico para Simulação de Secagem de Grãos e Sementes de Milho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.13, n.3, p.309-318, 2011.
- DENN, M. **Process modeling**. New York: Longman, 1986.
- DESMOND, E. M., KENNY, T. A., WARD, P., SUN, D. W. Effect of rapid and conventional cooling methods on the quality of cooked ham joints. **Meat Science** v.56, p.271 – 277, 2000.
- DRUMMOND, L.; SUN, D.W. Evaluation of the immersion vacuum cooling of cooked beef joints-mathematical simulation of variations in beef size and porosity and pressure reduction rates. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v.16, p.205-210, 2012.
- DUFFY, E. A.; BELK, K. E.; SOFOS, J. N.; BELLINGER, G. R.; PAPE, A.; SMITH, G. C. Extent of microbial contamination in United States pork retail products. **Journal Food Protect**, v. 64, 172-178, 2001.
- DUSCOVÁ, M.; KAMENÍK, J.; LACANIN, I.; SEDO, O.; ZDRÁHAL, Z. Lactic acid bacteria in cooked hams – Sources of contamination and chances of survival in the product. **Food Control**, v.61, p.1-5, 2016.
- FACHINELLO, J.P.; CASARIL, K.B.P.B. Evaluation of microbiological quality of sliced hams, marketed in the municipality. **Alimentos e nutrição**, v.24, n.3, p. 333-337, 2013.

- FEINER, G. **Meat Products Handbook**. England: CRC Press, p. 671, 2006.
- FELLOWS, P.J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: princípios e práticas**. Artmed: Porto Alegre, 2006.
- FIRJAN. **Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil?** Sistema Firjan: Rio de Janeiro, 2011.
- FONTANA, A.J.; VARITH, J.; IKEDIALA, J.; REYES, J.; WACKER, B. **Thermal properties of selected foods using a dual needle heat-pulse sensor**. Toronto: ASAE/CSAE –SCGR, Meeting, 1999.
- GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. Editora da Universidade de São Paulo, 2009.
- GERMANO, P. M. L.; GERMANO, M. I. S. **Higiene e vigilância sanitária de alimentos**. São Paulo: Varela, 2001.
- GONÇALVES, J. R. **Classificação dos embutidos cárneos. Princípios do processamento de embutidos cárneos**. Campinas: CTCITAL, 2002.
- GUMERATO, H. F.; SCHMIDT, F.L.; GOLDONI, J.S. Transferência de calor transiente na agitação linear intermitente de latas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.27, n.3, p. 649-657, 2007.
- HELDMAN, D. R. **Food freezing**. In: HELDMAN, D. R.; LUND, D. B. (Ed.). Handbook of food engineering. New York: Dekker, 1992.
- HOUSKA, M.; SUN, D.W.; LANDFELD, A.; ZHANG, Z. Experimental study of vacuum cooling of cooked beef in soup. **Journal of Food Engineering**, v. 59, 105-110, 2003.
- HUI, Y. H. **Meat and meat processing**. Boca Raton, FL: CRC Press. 2012
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- KATSARAS, K.; BUDRAS, K. **The relationship of the microstructure of cooked ham to its properties and quality**. Lebensm Wiss Technology, v.26, n.3, p.229-234, 1993.
- KOSOY, V.D.; DOROCHOV, V.P. Calculation methodology of grinding operation of fresh chorizos meat. **The Meat Industry**, p. 58-61, 2006.

- KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2002.
- LAGUERRE, O.; BEN AMARA, S.; FLICK, D. Heat transfer between wall and packed bed crossed by low velocity airflow. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 16, p. 1951-1960, 2006.
- LAWRIE, R. A. **Ciência da Carne**. Porto Alegre: Artmed, 2005.
- LEE, H. J., SCHIESSER, W. E. **Ordinary and partial differential equation routines in C, C++, Fortran, Java, Maple, and MATLAB**. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2004.
- LI, C.T. Myofibrillar protein extracts from spent hen meat to improve whole muscle processed meat. **Meat Science**, v.72, p.581-583, 2006.
- LLORET, E.; PICOUET, P.A.; TRBOJEVICH, R.; FERNÁNDEZ, A. Colour stability of cooked ham packed under modified atmospheres in polyamide nanocomposite blends. **LWT - Food Science and Technology**, v.66, p.582-589, 2016.
- LUCAS, T.; RAOULT-WACK. A. L. Immersion chilling and freezing in aqueous refrigerating media: review and future trends. **International Journal of Refrigeration**, v. 21, n. 6, p. 419-429. 1998.
- MACINTYRE, A. J. **Instalações Hidráulicas Prediais e Industriais**. [S.l.]: LTC, 2010.
- MARCOTTE, M., TAHERIAN, A. R., KARIMI, Y. M. Thermophysical properties of processed meat and poultry products. **Journal of Food Engineering**, v.88, p. 315–322, 2008.
- MCDONALD, K.; SUN, D. W.; KENNY, T. Comparison of the quality of cooked beef products cooled by vacuum cooling and by conventional cooling. **Lebensmittel – Wissenschaft und – Technologie**, v. 33, 21-29, 2000.
- MENDONZA, F.; VALOUS, N.A.; ALLEN, P.; KENNY, T.A.; WARD, P.; SUN, D. Analysis and classification of commercial ham slice images using directional fractal dimension features. **Meat Science**, v. 81, p.313-320, 2009.
- MITCHELL, G. **Cooling horticultural commodities need for cooling**. In: Post harvest technology of horticultural crops. Kader, A. A. (ed.) California. University of California, 1992.
- MOURA, S. C. S. R. M.; FRANÇA, V. C. L.; LEAL, M. C. B. L., Propriedades termofísicas de soluções modelos similares a sucos - Parte I. **Ciência Tecnologia Alimentos**, v.23, n.1, 2003.

- MYINT-U, T., DEBNATH, L. **Linear Partial Differential Equations for Scientists and Engineers**. 4 ed. New York: Birkhauser Boston, 2007.
- NECKEL, J. V.; MARIANI, V. C. Modelagem do congelamento da beterraba. **Asociación Argentina de Mecánica Computacional**, v.XXIX, p.5729-5749, 2010.
- NEVES FILHO, L.C. Resfriamento rápido de frutas e hortaliças. **Revista Frutas & Legumes**, p. 14-20, jan/fev. 2002.
- NUNES, A. S.; PARK, K. J.; FABBRO, I. M. D.; PARK, K. J. B.; BROD, F. P. R. Métodos de determinação experimental da condutividade e difusividade térmica de materiais biológicos. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos (SBCTA)**, v. 36, n. 1, p. 55-58, 2002.
- OBUZ, E., POWELL, T. H. DIKEMAN, M. E. Simulation of cooking cylindrical beef roasts. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, 35, 637–644, 2002.
- OECD (2016), Meat consumption (indicator). doi: 10.1787/fa290fd0-en (Accessed on 06 June 2016).
- OLIVEIRA, G. S., LOPES FILHO, J. F. THOMÉO, J. C. Difusividade térmica do presunto cozido e seus constituintes sólidos principais. **Braz. J. Food Technol.**, v.6, n.2, p.137-142, 2003.
- OLIVEIRA, G.S., TRIVELIN, M.O., LOPES FILHO, J.F. THOMÉO, J.C. Thermo-physical properties of cooked ham. **International Journal of Food Properties**, v.8, p.387–394, 2005.
- OLIVO, R. **O mundo do frango**. Criciúma: Rubison Olivo, 2006.
- ORDÓÑEZ, J. A. **Tecnologia de Alimentos: Componentes dos Alimentos e Processos**. Porto Alegre: Artmed; 2005.
- PARDI, M. C.; SANTOS, I. F.; SOUZA, E. R.; PARDI, H. S. **Ciência, Higiene e Tecnologia da Carne**. v.2. Goiânia: UFMG, 1996.
- PEARSON, A.M.; GILLET, T.A. **Processed Meats**, Aspen: Maryland, 1999.
- PEREDA, J.A.O; RODRIQUEZ, M.I.C; ÁLBAREZ, L.F; SANZ, M.L.G; MINQUILLÓM, G.D.G.F; PERALES. L de la H; CORTECERO, M.D.S. **Tecnologia de Alimentos**, v. 1. Porto Alegre: Artmed, 2005.
- PRESTES, R.C. **Efeitos da adição de colágeno na qualidade de presunto de frango**. 2011, 188 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Alimentos) –

Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Erechim, 2011.

PINTO, J. C.; LAGE, P. L. C. **Métodos numéricos em problemas de engenharia química**. Rio de Janeiro, RJ: E-papers serviços Editoriais Ltda., 2001.

RAGHU KUMAR, A. Y., JAGATH, M. C. Boundary element methods for thermal problems – review. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 2, n. 10, 2013.

RENKEN, M. D. **Handbook of meat product technology**. Malden, MA: Blackwell Science Ltd., 2000.

RESENDE, J. V.; NEVES FILHO, L. C.; SILVEIRA JÚNIOR, V. Coeficientes de transferência de calor efetivos no congelamento com ar forçado de modelos de polpas de frutas em caixas comerciais. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 5, n. 1, p. 33-42, 2002.

RESENDE, J. V.; SILVEIRA, V. Escoamento de ar através de embalagens de polpa de frutas em caixas comerciais: efeitos sobre os perfis de velocidade em túneis de congelamento. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 22, n. 2, p. 184-191, 2002.

RIEDEL, L. **Measurements of thermal diffusivity of foodstuffs rich in water**. Kaltetechnik-Klimatisierung. 1969. Citado por Oliveira et al. (2003)

RICHARDSON, P. **Improving the thermal processing of foods**. Boca Raton: CRC Press. 2004.

ROÇA, R. **Tecnologia de carnes e derivados: apostila técnica**. São Paulo: Universidade Estadual de São Paulo, 2000.

RODRIGUES, F. A. **Tecnologia dos produtos cárneos. Centro de tecnologia da carne**, ITAL, São Paulo, 1978.

SAHIN, S., SUMNU, S. G. **Physical Properties of Foods**. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2006.

SÁNCHEZ, D. A. **Ordinary differential equations: a brief eclectic tour**. Washington: Cambridge University Press, 2002.

SARAVACOS, G. D., MAROULIS, Z. B. **Transport properties of foods**. New York: Marcel Decker. 2001.

- SCHMIDT, F.; LAURINDO, J.B. Alternative processing strategies to reduce the weight loss of cooked chicken breast fillets subjected to vacuum cooling. **Journal of Food Engineering**, v.128, p.10-16, 2014.
- SILVA, J. A. **Tópicos da tecnologia de alimentos**. São Paulo: Varela, 2000.
- SILVA, R. R. **Estudo da transferência de calor em tanque submerso: influências do modo e da intensidade da agitação da água**. 2007. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- SINGH, R. P. Thermal diffusivity in food processing. *Food Technology*, v. 36, n. 2, p. 87-91, 1982.
- SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introduction to food engineering**. 4th ed. London: Academic Press, 2009.
- SUN, D. W. **Thermal food processing: New technologies and quality issues**. Boca Raton: CRC Press. 2006.
- SUN, D. W.; WANG, L. Heat Transfer Characteristics of Cooked Meats using Different Cooling Methods. **International Journal of Refrigeration**, v. 23, p. 508-516, 2000.
- TERRA, N. N. **Apontamentos de tecnologia de Carnes**. São Leopoldo: Unisinos, 1998.
- TERUEL, B.; CORTEZ, L.; LIMA, A. Transferência de calor durante o resfriamento de frutas com ar forçado e com água. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 5, p. 131-138. 2002.
- TERUEL, B.; CORTEZ, L.; NEVES FILHO, L. Estudo comparativo do resfriamento de laranja valência com ar forçado e com água. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.23, n.2, p. 174-178, 2003.
- THOMS, E.; ROSSA, L.S.; STAHLKE, E.R.; FERRO, I.D.; MACEDO, R.E.F. Perfil de consumo e percepção da qualidade da carne suína por estudantes de nível médio da cidade de Irati, PR. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 8, n. 4, p. 449-459, 2010.
- TIJSKENS, L. M. M.; HERTOOG, M. L. A. T. M.; NICOLAÏ, B. M. **Food process modelling**. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- TOLDRÁ, F. **Handbook of meat processing**. Ames. IA. Wiley-Blackwell, 2010.

- TOLDRÁ, F.; REIG, M. Ham: Cooked Ham. **Encyclopedia of Food and Health**, p.303-306, 2016.
- TOMOVIC, V. M.; JOKANOVIC, M. R.; PETROVIC, L. S.; TOMOVIC, M. S.; TASIC, T. A.; IKONIC, P. M.; SUMIC, Z. M.; SOJIC, B.; SKALJAC, S. B.; SOSO, M. M. Sensory, physical and chemical characteristics of cooked ham manufactured from rapidly chilled and earlier deboned *M. semimembranosus*. **Meat Science**, v. 93, p.46–52, 2013.
- TREFETHEN, L. N. **Finite difference and spectral methods for ordinary and partial differential equations**. Lloyd N. Trefethen, 1996
- TRES, M. V.; BORGES, G. R.; CORAZZA, M. L.; ZAKRZEWSKI, C. A. Determinação da difusividade térmica de alimentos: medidas experimentais e simulação numérica. **Perspectiva**, v.35, n.131, p. 43-56, 2011.
- USDA-FSIS. United States Department of Agriculture. **Food Safety and Inspection Service. Performance Standards for the Production of Certain Meat and Poultry Products**. 1999a. Disponível em: <<http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-1999-01-06/pdf/99-32.pdf>>. Acesso em: 11 de março de 2016.
- USDA-FSIS. United States Department of Agriculture. Food Safety and Inspection Service. **Compliance Guidelines for Cooling Heat-Treated Meat and Poultry Products (Stabilization)**. 1999b. Disponível em: <[http://www.fsis.usda.gov/OPPDE/rdad/FRPubs/95-033F/95033F App endix %20B .htm](http://www.fsis.usda.gov/OPPDE/rdad/FRPubs/95-033F/95033F_App%20endix%20B.htm)>. Acesso em: 11 de março de 2016.
- VÁLKOVÁ, V.; SALÁKOVÁ, A.; BUCHTOVÁ, H.; TREMLOVÁ, B. Chemical, instrumental and sensory characteristics of cooked pork ham. **Meat Science**, v.77, p.608-615, 2007.
- 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, 2006.
- VIGNEAULT, C., GOYETTE, B. **Fruit and Vegetable Precooling**. Training Seminar of the NB Fruit Growers Association. Canada: Fredericton, 1994.
- VODYANOVA, I. V.; STORRO, I.; OLSEN, A.; RUSTAD, T. Mathematical modelling of mixing of salt in minced meat by bowl-cutter. **Journal of Food Engineering**, v.112, p. 144–151, 2012.
- 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 & Technology**, v. 14 p. 408–423, 2003.

- WANG, L.; SUN, D.W. Evaluation of performance of slow air, air blast and water immersion cooling methods in the cooked meat industry by the finite element method. **Journal of Food Engineering**, v. 51, p. 329-340. 2002.
- WEISS, J.; GIBIS, M.; SCHUH, V.; SALMINEN, H. Advances in ingredient and processing systems for meat and meat products. **Meat Science**, v.86, p.196-213, 2010.
- ZACH, L. Heat Transfer. In: Y. H. HUI. **Handbook of food science, technology, and engineering**. v. 3, Boca Raton: CRC Press, 2006.
- ZEFERINO, R. C. F. **Modelagem matemática dos processos de cozimento e resfriamento de mortadelas em estufas**. 2016, 76 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Erechim, 2016.
- ZHANG, Z.; DRUMMOND, L.; SUN, D.W. Vacuum cooling in bulk of beef pieces of different sizes and shape – Evaluation and comparison to conventional cooling methods. **Journal of Food Engineering**, v.116, p.581-587, 2013.