

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

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Rubielí Carla Frezza Zeferino

**MODELAGEM MATEMÁTICA DOS PROCESSOS DE COZIMENTO E
RESFRIAMENTO DE MORTADELAS EM ESTUFAS**

Erechim - RS, Brasil.

Janeiro, 2016.

RUBIELI CARLA FREZZA ZEFERINO

**MODELAGEM MATEMÁTICA DOS PROCESSOS DE COZIMENTO E
RESFRIAMENTO DE MORTADELAS EM ESTUFAS**

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 Erechim.

Orientadora: Prof. Dra Mônica B. Alvarado Soares

Orientador: Prof. Dr Marcelo Mignoni

Co-orientador: Prof. Dr Weber da Silva Robazza

Erechim - RS, Brasil.

Janeiro, 2016.

**MODELAGEM MATEMÁTICA DOS PROCESSOS DE COZIMENTO E
RESFRIAMENTO DE MORTADELAS EM ESTUFAS**

RUBIELI CARLA FREZZA ZEFERINO

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 Erechim.

Comissão Julgadora

Prof. Dra Mônica B. Alvarado Soares/URI-Erechim (Orientadora)

Prof. Dr Marcelo Mignoni/URI-Erechim (Co-orientador)

Prof. Dr Weber da Silva Robazza/UDESC-Pinhalzinho (Co-orientador)

Prof. Dr Eduardo Huber/IF Catarinense-Concórdia (Membro)

Prof. Dra Clarice Steffens/URI/Erechim (Membro)

Erechim, Janeiro, 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 – ERECHIM.

AGRADECIMENTOS

A todos que de alguma forma contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional, em especial ao meu amor Adriano, por me entender e me apoiar em todos os momentos, meus sinceros agradecimentos.

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 DOS PROCESSOS DE COZIMENTO E RESFRIAMENTO DE MORTADELAS EM ESTUFAS

Rubieli Carla Frezza Zeferino

Janeiro/2016

Orientadora: Prof. Dra. Mônica B. Alvarado Soares

Orientador: Prof. Dr Marcelo Mignoni

Co-orientador: Prof. Dr. Weber da Silva Robazza

Resumo: Um dos fatores mais importantes na conservação de alimentos é a temperatura. A ocorrência do tratamento térmico está baseada nos mecanismos de transferência de calor, condução, convecção e radiação. Conforme o mecanismo atuante faz-se necessário o conhecimento dos fatores que nele interferem, os quais envolvem as características do produto, tais como propriedades termofísicas, geometria e dimensões, bem como as propriedades do fluido e condições de escoamento. Estas por sua vez, estão diretamente ligadas com o equipamento no qual ocorre o processamento térmico. Por toda a sua importância, condições ótimas de operação para o tratamento térmico são cada vez mais visadas pela indústria, o que amplia o campo de estudos em busca dessas condições. Nesse contexto, a modelagem matemática e a simulação de processos podem ser alternativas viáveis, pois dispensam a necessidade de realização de experimentos, permitem encontrar os parâmetros envolvidos no processamento térmico, e após a validação do modelo, possibilitam a obtenção de condições ótimas de operação. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo matemático computacional para os processos de cozimento e resfriamento de mortadelas em estufas. Os ensaios foram conduzidos em estufas, utilizando circulação forçada de vapor de água no cozimento e ar frio no resfriamento. Foram avaliados dois produtos de geometria cilíndrica, com composição e dimensões diferentes. A resolução numérica foi realizada no software Matlab[®] utilizando o Método de Procura em Rede Modificado. Os parâmetros de processo avaliados foram calor específico, massa específica, condutividade térmica e coeficiente convectivo de transferência de calor. Os resultados mostraram que os modelos representaram adequadamente os processos de cozimento e resfriamento para ambos os produtos. Os dados experimentais foram condizentes com a geometria e característica dos produtos. Os parâmetros obtidos pelo ajuste dos dados experimentais apresentaram-se de acordo com os apresentados por correlações descritas na

literatura. Os modelos podem ser utilizados para previsão de temperatura e tempo, bem como de parâmetros envolvidos nos processos de cozimento e resfriamento de mortadelas em estufas.

Palavras-chave: Modelagem matemática; Cozimento; Resfriamento; Coeficiente Convectivo; Condutividade Térmica.

Abstract of Dissertation presented to Food Engineering Program as a partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master in Food Engineering.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF COOKING AND COOLING MORTADELLA IN STOVE

Rubieli Carla Frezza Zeferino

January/2016

Advisors: Prof. Dra. Mônica B. Alvarado Soares

Prof. Dr Marcelo Mignoni

Prof. Dr. Weber da Silva Robazza

Abstract: One of the most important factors in food preservation is the temperature. The occurrence of thermal treatment is based on the heat transfer mechanisms, conduction, convection and radiation. Therefore, it is necessary to understand the factors that affect, the underlying characteristics of it, such as the physical thermodynamic properties, geometry and dimensions as well as the properties of the fluid and flow conditions. These are directly connected with the equipment in which there is thermal processing. For all its importance, optimal operating conditions for heat treatment are increasingly targeted by the industry, which extends the search field studies in these conditions. In this context, mathematical modeling and process simulation can be a viable alternative, since it eliminates the need for conducting experiments, allows to find the parameters involved in thermal processing, and following the model validation, enables the achievement of optimal operating conditions. Thus, this study aims to develop a computational mathematical model for the cooking and cooling processes of mortadella in stoves. The tests were conducted in stoves, using forced circulation of water vapor in cooking and cold air in the cooling. There were two products, with cylindrical geometry with different dimensions and compositions. The numerical solution was performed in software no software Matlab[®] using a Network Search Method. The following process parameters were evaluated: specific heat, density, thermal conductivity and convective heat transfer coefficient. The results showed that the model adequately accounted for the cooking and cooling procedures for both products. The experimental data were consistent with the geometry and characteristics of the products. The parameters obtained numerically resulted in good accordance with the correlations presented in described in the literature. Templates can be used for prediction of temperature and time as well as parameters involved in cooking processes and mortadella cooling in stoves.

Keywords: Mathematical modeling; Cooking; Cooling; Convective coefficient; Thermal conductivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa do Suíno com os Principais Cortes.....	17
Figura 2: Distribuição Produto A.....	33
Figura 3: Distribuição Produto B.....	33
Figura 4: Corte Central da Peça indicando os Pontos de Coleta de Temperatura	34
Figura 5: Parte Interna da Estufa.	35
Figura 6: Alocação dos Termopares.....	35
Figura 7: Resultados Experimentais para o Cozimento do Produto A.....	40
Figura 8: Resultados Experimentais para o Cozimento do Produto B.....	41
Figura 9: Resultados Experimentais para o Resfriamento do Produto A.....	42
Figura 10: Resultados Experimentais para o Resfriamento do Produto B.....	42
Figura 11: Calor Específico em função da Temperatura para o Produto A.....	44
Figura 12: Calor Específico em função da Temperatura para o Produto B.....	44
Figura 13: Massa Específica em função da Temperatura para o Produto A.....	44
Figura 14: Massa Específica em função da Temperatura para o Produto B.....	44
Figura 15: Condutividade Térmica em função da Temperatura para o Produto A.	44
Figura 16: Condutividade Térmica em função da Temperatura para o Produto B.	44
Figura 17: Número de Reynolds em função da Temperatura no Cozimento.	47
Figura 18: Número de Reynolds em função da Temperatura no Resfriamento.	47
Figura 19: Número de Prandtl em função da Temperatura no Cozimento.....	47
Figura 20: Número de Prandtl em função da Temperatura no Resfriamento.....	47
Figura 21: Coeficiente Convectivo em função da Temperatura no Cozimento.	47
Figura 22: Coeficiente Convectivo em função da Temperatura no Resfriamento.....	47
Figura 23: Resultados para a Temperatura Adimensional no Cozimento do Produto A.....	50
Figura 24: Resultados para a Temperatura Adimensional no Cozimento do Produto B.....	50
Figura 25: Resultados para a Temperatura Adimensional no Resfriamento do Produto A.....	51
Figura 26: Resultados para a Temperatura Adimensional no Resfriamento do Produto B.....	51
Figura 27: Resultados da Modelagem para a Temperatura no Núcleo no Cozimento do Produto A.....	58
Figura 28: Resultados da Modelagem para a Temperatura no Núcleo no Cozimento do Produto B.....	58

Figura 29: Resultados da Modelagem para a Temperatura no Núcleo no Resfriamento do Produto A.....	59
Figura 30: Resultados da Modelagem para a Temperatura no Núcleo no Resfriamento do Produto B.....	59
Figura 31: Resultados da Modelagem para a Temperatura Intermediária Radial no Cozimento do Produto A.....	60
Figura 32: Resultados da Modelagem para a Temperatura Intermediária Radial no Cozimento do Produto B.....	61
Figura 33: Resultados da Modelagem para a Temperatura Intermediária Radial no Resfriamento do Produto A.....	61
Figura 34: Resultados da Modelagem para a Temperatura Intermediária Radial no Resfriamento do Produto B.....	62
Figura 35: Resultados da Modelagem para a Temperatura Superficial no Cozimento do Produto A.....	62
Figura 36: Resultados da Modelagem para a Temperatura Superficial no Cozimento do Produto B.....	63
Figura 37: Resultados da Modelagem para a Temperatura Superficial no Resfriamento do Produto A.....	63
Figura 38: Resultados da Modelagem para a Temperatura Superficial no Resfriamento do Produto B.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Informação Nutricional referente à formulação para uma porção de 40 g de produto.	33
Tabela 2: Dados de Dimensões do Produto e Alocação no Carro.	33
Tabela 3: Equações Utilizadas para Cálculo das Propriedades Termofísicas.....	36
Tabela 4: Constantes c e m para a Correlação de Hilpert	37
Tabela 5: Composição Centesimal dos Produtos A e B.	43
Tabela 6: Modelo Obtido para as Propriedades dos Produtos usando as Equações da Tabela 3.	45
Tabela 7: Velocidade Experimental do Fluido nos Processos de Cozimento e Resfriamento..	48
Tabela 8: Modelo Obtido para os Números de Reynolds e para o Coeficiente Convectivo. ...	48
Tabela 9: Resultados do Ajuste para os Parâmetros Obtidos pela Modelagem Matemática. ...	52

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CMS	Carne Mecanicamente Separada
DFD	<i>Dry, Firm, Dark</i> (Seca, Dura, Escura)
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MATLAB	MATrix LABoratory
ODE	<i>Ordinary Differential Equations</i>
PD	Problema Direto
pH	Potencial Hidrogeniônico
PI	Problema Inverso
PRM	Procura em Rede Modificado
PSE	<i>Pale, Soft, Exsudative</i> (Pálida, Flácida, Exsudativa)
PVC	Problema de Valor de Contorno
PVI	Problema de Valor Inicial
UFC	Unidades Formadoras de Colônia

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
TT1	Temperatura do fluido na posição 1, porta frontal	°C
TT2	Temperatura do fluido na posição 2, porta traseira	°C
TN	Temperatura no núcleo do produto, no centro do carro	°C
TS	Temperatura na superfície do produto, no centro do carro	°C
TSN	Temperatura intermediária do produto na direção radial, no centro do carro	°C
TLN	Temperatura intermediária do produto na direção longitudinal, no centro do carro	°C
TT	Temperatura média do fluido entre as posições	°C
c_P	Calor específico do produto	J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹
c_{Pj}	Calor específico do componente j	J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹
X_j^v	Fração volumétrica do componente j	% (m ³ /m ³)
k	Condutividade térmica do produto	W.m ⁻¹ .°C ⁻¹
k_j	Condutividade térmica do componente j	W.m ⁻¹ .°C ⁻¹
ρ	Massa específica do produto	kg.m ⁻³
ρ_j	Massa específica do componente j	kg.m ⁻³
X_j	Fração mássica do componente j	% (kg/kg)
h	Coefficiente convectivo médio de transferência de calor	W.m ⁻² .°C ⁻¹
k_∞	Condutividade térmica do fluido	W.m ⁻¹ .°C ⁻¹
D	Diâmetro do produto	m
Re_D	Número Adimensional de Reynolds	-
Pr	Número Adimensional de Prandtl	-
Nu_D	Número Adimensional de Nusselt	-
ρ_∞	Massa específica do fluido	kg.m ⁻³
u_∞	Velocidade do fluido	m.s ⁻¹
μ_∞	Viscosidade dinâmica do fluido	m.s ⁻¹

$c_{p,\infty}$	Calor específico do fluido	$\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
$\frac{\partial T}{\partial t}$	Derivada parcial temporal da temperatura	°C.s^{-1}
$\frac{\partial T}{\partial r}$	Derivada parcial radial da temperatura	°C.m^{-1}
$\frac{\partial T}{\partial \theta}$	Derivada parcial angular da temperatura	°C.m^{-1}
$\frac{\partial T}{\partial z}$	Derivada parcial longitudinal da temperatura	°C.m^{-1}
\dot{q}	Taxa de geração volumétrica de calor	W.m^{-3}
r	Raio do produto, compreendido entre $0 \leq r \leq R$	m
R	Raio total do produto, medido do centro até a superfície	m
T_i	Temperatura inicial do produto	°C
T_∞	Temperatura média do fluido	°C
θ	Temperatura adimensional	-
λ_n	Constante do método de separação de variáveis	-
J_0	Função de Bessel de primeira espécie de ordem zero	-
J_1	Função de Bessel de primeira espécie de primeira ordem	-
Bi	Número Adimensional de Biot	-
τ, Fo	Número Adimensional de Fourier	-
α	Difusividade térmica do produto	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
t	Tempo do processo	s
$\beta_{p \min}$	Parâmetro de menor valor no intervalo de estimação no Método PRM	
$\beta_{p \max}$	Parâmetro de maior valor no intervalo de estimação no Método PRM	
β_p	Parâmetro a ser estimado no Método PRM	
β_{ot}	Parâmetro ótimo estimado no Método PRM	
$\Delta\beta_p$	Intervalo do parâmetro β_p no Método PRM	
β_{pk}	Partição de parâmetros no Método PRM	
$\beta_{1k}, \beta_{2k}, \dots, \beta_{nk}$	Parâmetros do conjunto k no Método PRM	
ε	Critério de Parada no Método PRM	

d_i	Diferença entre a solução estimada e os dados experimentais no Método PRM	
d_{\min}	Menor d_i do Método PRM	
p	Iteração de parâmetros do Método PRM	
k	Iteração da partição de parâmetros do Método PRM	
I_p	Intervalo do parâmetro p do Método PRM	
$y_{\text{exp}}(j,t)$	Dados experimentais para cada posição j e tempo t no Método PRM	°C
$y_{\text{est}}(j,t)$	Dados estimados para cada posição j e tempo t no Método PRM	°C
m	Iteração dos refinamentos do Método PRM	
I_{pm}	Intervalo do parâmetro p no refinamento m no Método PRM	
i	Iteração e índice de referencia no Método PRM	
nr	Número de refinamentos no Método PRM	
n	Número de parâmetros no Método PRM	
tf	Tempo final no Método PRM	s
S	Número de dados calculados de cada parâmetro no Método PRM	
R^2	Coeficiente de Determinação	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivos	15
1.1.1. Objetivo Geral	15
1.1.2. Objetivos Específicos.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Produtos Cárneos	17
2.1.1. Produtos Cárneos Curados	18
2.1.2. Produtos Cárneos Curados de Massa Fina	19
2.1.3. Mortadelas.....	20
2.2. Micro-organismos Relacionados com a Carne e o Controle de Qualidade	21
2.3. Conservação Empregando Calor (Aquecimento)	22
2.4. Conservação Empregando Frio (Resfriamento)	23
2.5. Transferência de Calor	26
2.6. Modelagem Matemática.....	28
3. MATERIAL E MÉTODO.....	32
3.1. Dados Experimentais dos Processos.....	32
3.1.1. Preparação de Massa e Embutimento	32
3.1.2. Cozimento e Resfriamento em Estufas	34
3.2. Propriedades Termofísicas do Produto.....	35
3.3. Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor	37
3.4. Modelagem Matemática dos Processos	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1. Dados Experimentais dos Processos.....	40
4.2. Propriedades Termofísicas do Produto.....	43
4.3. Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor	46
4.4. Modelagem Matemática dos Processos	49
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1. INTRODUÇÃO

Um dos fatores mais importantes na conservação dos alimentos é a temperatura. Os métodos de processamento térmico ainda são os mais aplicados na indústria de alimentos de grande porte. No segmento de produtos cárneos, apesar do surgimento e evolução de outros métodos de conservação, o processamento térmico é essencial na elaboração de produtos industrializados cozidos, não apenas por sua função na segurança alimentar, mas também por sua função tecnológica, em relação às características sensoriais desses produtos.

O dimensionamento do tratamento térmico de um determinado alimento deve compreender as características de transferência de calor do meio para o produto e através do produto. Propriedades químicas, físicas e microbiológicas inerentes ao alimento, características de sua embalagem e do equipamento e/ou do meio de aquecimento e resfriamento, devem ser consideradas, de modo a garantir a segurança no consumo com menores alterações sensoriais, nutricionais e menor custo (AUGUSTO et al., 2008).

Segundo Desmond et al. (2000), os benefícios do tratamento térmico, tal como o cozimento, quando aplicado para produtos que possuem cortes cárneos em sua composição, têm possibilitado o desenvolvimento de produtos com alto valor agregado e com *shelf life* prolongado.

Os gastos energéticos com o tratamento térmico são elevados para a indústria, 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. A otimização dos processos, além de permitir a redução de custos, impacta na qualidade dos produtos, o que torna a empresa mais competitiva e reconhecida no mercado. Segundo Lobo e Silva (2014), sob este aspecto é importante adotar meios inovadores para a melhoria dos processos.

No entanto, a otimização do processo na indústria se torna difícil devido a limitações experimentais, uma vez que envolvem grandes volumes de produção. Nesse contexto, a modelagem e simulação de processos destacam-se como alternativas importantes, uma vez que abordam aspectos que muitas vezes são desconsiderados em soluções analíticas, permitindo uma maior aproximação do processo real e conseqüentemente, a otimização das condições operacionais, o que resulta na redução de custos e melhoria da qualidade do produto (DANTAS et al., 2011; PAIVA, 2005).

A utilização de modelagem matemática aplicada na transferência de calor vem se

mostrando uma poderosa ferramenta na garantia da segurança sem comprometer a qualidade nutricional e sensorial dos alimentos (PORNCHALOEMPONG et al., 2003; PINHO; CRISTIANINI, 2005).

De acordo com Neckel e Mariani (2010), a modelagem da transferência de calor em alimentos sólidos de geometria simples em condições unidimensionais, sem mudança de fase e na ausência de transferência de massa, geralmente é realizada pela resolução da equação da condução de calor em regime transiente utilizando soluções analíticas e numéricas. No entanto, trabalhos propondo a modelagem de alimentos em três dimensões não são tão explorados na literatura.

A duração do tratamento térmico do alimento, tanto no cozimento quanto no resfriamento, pode ser influenciada pela variabilidade dos coeficientes de troca térmica, e quanto maior a geometria do mesmo, maior pode ser a influência. Desta forma, é possível realizar a modelagem usando condições de contorno sujeitas a estas variações no ambiente, e no coeficiente convectivo, o que possibilita a obtenção de resultados mais apurados (NECKEL; MARIANI, 2010).

Após o modelo ter sido desenvolvido, o mesmo pode ser validado através da comparação com dados experimentais, e então pode ser aplicado a outras condições, sendo possível através da simulação computacional, obter as condições ótimas de operação.

Diante de todos esses fatores, e do fato de a literatura apresentar poucos trabalhos nesta área, justifica-se que a modelagem matemática computacional em tratamentos térmicos na indústria de alimentos seja mais explorada. Neste contexto o tema do presente trabalho envolve o desenvolvimento de um modelo matemático computacional para os processos de cozimento e resfriamento de mortadelas em estufas.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver e validar um modelo matemático computacional para os processos de cozimento e resfriamento de mortadelas em estufas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Obter dados experimentais dos processos de cozimento e resfriamento de mortadelas em estufas;

- Desenvolver um modelo matemático para os processos de cozimento e resfriamento de mortadelas em estufas;
- Determinar os parâmetros envolvidos nos processos de cozimento e resfriamento de mortadelas em estufas, as propriedades termofísicas do produto e o coeficiente convectivo de transferência de calor;
- Ajustar o modelo matemático aos dados experimentais dos processos de cozimento e resfriamento de mortadelas em estufas;
- Validar o modelo matemático dos processos de cozimento e resfriamento de mortadelas em estufas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No texto a seguir serão abordados temas relacionados aos produtos cárneos industrializados, no qual faz parte a mortadela, tais como características sensoriais, segurança alimentar, tratamento térmico, fundamentos de transferência de calor e modelagem e simulação de processos, todos necessários para o entendimento do presente trabalho.

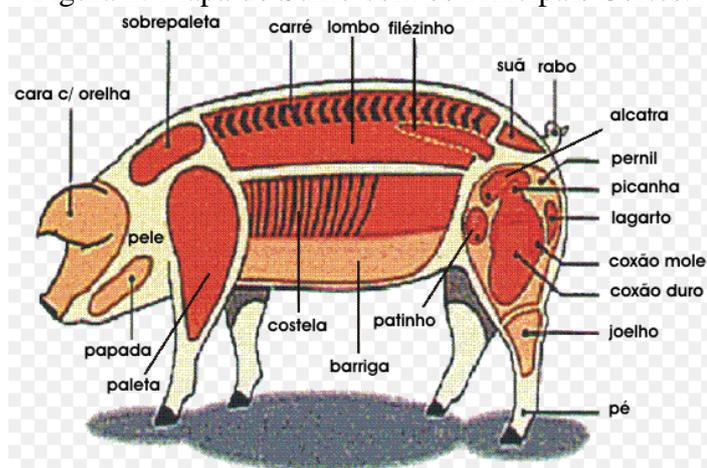
2.1. Produtos Cárneos

De acordo com Pardi (2001), a carne se caracteriza pela natureza das proteínas que a compõem. Além de sua riqueza em aminoácidos essenciais, ela contém umidade, gordura, vitaminas, glicídios e sais minerais como elementos nutritivos complementares.

A composição da carne varia de acordo com a idade, sexo e raça do animal. Além disso, ela é influenciada pelo manejo, alimentação e espécie animal. A composição dos diferentes cortes de carne varia de acordo com a função exercida por cada um deles no organismo (PARDI, 2001).

A industrialização consiste na transformação das carnes em produtos cárneos, cujos objetivos principais incluem aumentar a sua vida útil, desenvolver diferentes sabores e utilizar partes do animal de difícil comercialização no estado fresco (TERRA, 1998). A Figura 1 mostra os principais cortes da carne suína, muitos dos quais são utilizados na formulação de produtos industrializados.

Figura 1: Mapa do Suíno com os Principais Cortes.



Fonte: ETFTO, 2008.

A ação das enzimas sobre a carne e seus derivados provoca uma série de mudanças desejáveis, dentre elas o processo de maturação e o desdobramento de nitratos no envelhecimento da carne. No entanto, também provocam alterações indesejáveis, tais como putrefação, coloração anormal, acidificações, fermentações e rancificação das gorduras (PARDI, 2001).

Segundo Terra (1998), devido ao seu elevado valor nutricional e à grande quantidade de água disponível, o emprego de aditivos, do calor e do frio, bem como o uso das boas práticas de fabricação, possibilitam a obtenção de produtos cárneos saudáveis e seguros.

A comercialização de alguns subprodutos, face às suas características intrínsecas, é difícil devido à sua reduzida durabilidade. Por exemplo, a medula espinhal, o sangue, o bucho, o fígado e a pele suína, são na maioria das vezes comercializáveis como participantes de alguma formulação de produtos cárneos (TERRA, 1998).

Ao utilizar Carne Mecanicamente Separada (CMS) na elaboração de embutidos, por exemplo, deve-se saber que a mesma é passível de modificações que poderão comprometer a qualidade final do produto. A composição da CMS é variável, devido principalmente ao tipo de matéria-prima utilizada na sua fabricação. Dos seus constituintes merece atenção a gordura, que reflete diretamente tanto na estabilidade da emulsão cárnea, como nos processos oxidativos (TERRA, 1998).

Segundo Ordoñez (2005b), os produtos cárneos podem ser classificados em 5 grupos principais: produtos cárneos frescos, crus condimentados, tratados pelo calor, embutidos crus curados e cárneos salgados.

Serão abordadas a seguir considerações a respeito dos produtos cárneos tratados pelo calor, do qual fazem parte as mortadelas, objeto de estudo deste trabalho.

2.1.1. Produtos Cárneos Curados

Os produtos cárneos curados são aqueles que em sua formulação são utilizados os chamados sais de cura. Esses sais são constituídos de uma mistura de cloreto de sódio, nitrato e nitrito ou de apenas cloreto de sódio e nitrito. A primeira mistura é utilizada em produtos cárneos cuja elaboração consome vários dias, tendo em vista a necessidade de tempo para que as bactérias reduzam nitrato a nitrito (TERRA, 1998).

Segundo Jay (2005), além dos sais de cura, pode utilizar-se açúcar, fosfatos, eritorbato de sódio, glutamato monossódico, proteínas, temperos e outros aditivos.

Segundo Evangelista (2005), os aditivos são definidos como substâncias não nutritivas com a finalidade de melhorar a aparência, sabor, textura e tempo de armazenamento de um

produto. Entretanto, em certos casos, as substâncias químicas incluídas para melhorar esta qualidade podem elevar a capacidade nutritiva do alimento.

Os aditivos, segundo sua origem e constituição, têm funções específicas e correlatas que podem ser de natureza química, como conservantes e acidulantes, ou física, como estabilizantes e emulsificantes (EVANGELISTA, 2005).

De acordo com Jay (2005), o sal serve para prevenir o crescimento microbiano antes e depois da cura. Nitrito e nitrato servem para estabilizar a cor vermelha da carne. Além disso, eles contribuem para o sabor da carne curada, retardam a rancidez e previnem a germinação de *Clostridium*.

O eritorbato de sódio serve para estabilizar a cor, acelerar a cura e torná-la mais uniforme. O açúcar está relacionado com a estabilização da cor, sabor e serve como substrato para a fermentação láctica, além de moderar o sabor do cloreto de sódio. Os fosfatos aumentam a retenção de água (JAY, 2005).

2.1.2. Produtos Cárneos Curados de Massa Fina

Os embutidos de massa fina são produtos curados que se caracterizam pelo elevado grau de divisão dos seus constituintes. Durante a sua fabricação ocorrem fatos de extrema relevância na qualidade tais como a cura, a emulsão e o cozimento (TERRA, 1998).

De acordo com Terra (1998), o emulsão da gordura é que possibilita sua importante participação no sabor e textura do produto cárneo. A emulsão cárnea é constituída de duas fases, uma delas contínua representada pela água e uma descontínua representada pelas gotículas de gordura. Essas duas fases, apesar de imiscíveis, são estabilizadas por meio da ação de um agente estabilizante, geralmente uma proteína solúvel. O estabilizante produz a estabilização quando recobre integralmente as gotículas de gordura.

Durante a emulsificação, merecem atenção especial a temperatura de trabalho, o grau de divisão da gordura, o cloreto de sódio e os polifosfatos, visto que a proteína atua como estabilizante somente enquanto solúvel. Portanto, a temperatura de trabalho deve ser inferior à temperatura de desnaturação das proteínas. Além disso, o tempo de trabalho deve ser o suficiente para obter uma massa “sedosa” (TERRA, 1998).

Segundo Terra (1998), a função do cloreto de sódio é aumentar a solubilidade das proteínas e diminuir a interação entre elas. No que concerne os polifosfatos, sua atuação consiste em aumentar a velocidade de adsorção e liberar as proteínas dos seus complexos ao sequestrarem o cálcio.

De acordo com Ordoñez (2005b), a eficácia emulsificante das proteínas e a

estabilidade da emulsão cárnea também dependem do pH da carne. O ideal é que o pH esteja acima de 5,7 quando o conteúdo de sal superar 4%.

Concluída a emulsificação e embutimento, passa-se ao cozimento, onde o calor ao desnaturar as proteínas, irá transformá-las em alvéolos, similar ao favo de mel, que conterão as gotículas de gordura (TERRA, 1998).

Segundo Ordoñez (2005b), o tratamento térmico resulta em diversas vantagens para o produto, tais como:

- Ligação da massa mediante a coagulação das proteínas, estabelecendo-se um gel cárneo e favorecendo o aparecimento da textura desejada em temperaturas de 65 a 70°C;
- Desenvolvimento das características sensoriais desejadas, no caso da mortadela, sabor, textura e cor;
- Inativação das enzimas cárneas que poderiam causar alterações posteriores no produto, que ocorrem na faixa de 60 a 70°C;
- Destruição das formas vegetativas dos micro-organismos, na faixa de 72°C.

2.1.3. Mortadelas

A definição de mortadela de acordo com a legislação brasileira é:

“... produto cárneo industrializado, obtido de uma emulsão das carnes de animais de açougue, acrescido ou não de toucinho, adicionado de ingredientes, embutido em envoltório natural ou artificial, em diferentes formas, e submetido ao tratamento térmico adequado (BRASIL, 2000).”

Segundo o anexo II da Instrução Normativa nº 4 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento de 31 de março de 2000 (BRASIL, 2000), a mortadela pode ser classificada como:

- Mortadela: carnes de diferentes espécies de animais, CMS (máximo 60%), miúdos comestíveis de diferentes espécies de animais (estômago, coração, língua, fígado, rins e miolos), pele e tendões (máximo de 10%) e gorduras.
- Mortadela tipo Bologna: carne bovina e/ou suína e/ou ovinas, CMS (máximo 20%), miúdos comestíveis de bovino e/ou suíno e/ou ovino (estômago, coração, língua, fígado, rins e miolos), pele e tendões (máximo de 10%) e gorduras.
- Mortadela tipo Italiana: porções musculares de carnes de diferentes espécies de animais de

- açougue e toucinho, não sendo permitida a adição de amido.
- Mortadela Bologna: porções musculares de carnes bovina e/ou suína e toucinho, embutida na forma arredondada, não sendo permitida a adição de amido.
 - Mortadela de carne de ave: Carne de ave, CMS (máximo 50%), até 5% de miúdos comestíveis de aves e gordura.

2.2. Micro-organismos Relacionados com a Carne e o Controle de Qualidade

Há dois tipos de micro-organismos envolvidos no processamento de carnes, os deteriorantes e os patogênicos. Os primeiros são inevitáveis, pode-se controlar o número, mas sempre estarão presentes na carne. Já os segundos, são indesejáveis, e o controle de qualidade tenta impedir sua presença (CASTILLO, 2006).

Segundo Castillo (2006), no caso dos micro-organismos deteriorantes os objetivos são:

- Reduzir a contaminação no processo;
- Impedir a multiplicação microbiana.

Já os objetivos para os micro-organismos patogênicos são:

- Impedir o seu ingresso no abatedouro;
- Impedir a contaminação cruzada entre as carcaças contaminadas e não contaminadas;
- Eliminar a contaminação das carcaças adquirida no processo de abate.

É ampla a gama de micro-organismos comuns em carnes devido à sua complexa composição, proteínas, glicídios, lipídios, vitaminas e sais minerais. Além disso, a carne possui elevado teor de umidade da carne, de 65 a 75%, e pH apropriado para o crescimento microbiano (PARDI, 2001).

De acordo com Castillo (2006), a carne possui cerca de 19% de proteínas. Como o carboidrato é um fator limitante ao crescimento bacteriano, a maioria das bactérias são proteolíticas, fato este que contribui ainda mais para o crescimento microbiano.

Entretanto, o músculo possui cerca de 1,1% de glicogênio e 1% de glicose. Observa-se que no processo de *rigor mortis* o metabolismo muscular consome os carboidratos, produzindo ácido láctico. Após a transformação do músculo em carne, este tem cerca de 1,1% de ácido láctico. O pH do músculo é 7,0, após o *rigor mortis* mas pode cair para 5,2-6,2, isto dificulta o crescimento bacteriano, sendo fundamental para a conservação da carne (CASTILLO, 2006).

Segundo Castillo (2006), na carne suína, problemas no *rigor mortis* podem produzir a carne DFD (*Dry, Firm, Dark*), que possui um pH maior que 6,2. Este tipo de carne é mais susceptível à deterioração bacteriana. O problema oposto, a carne PSE (*Pale, Soft*,

Exsudative), possui pH ácido, menor que 5,6, e resiste mais à deterioração bacteriana, porém tecnologicamente, esta é uma carne de má qualidade.

A deterioração da carne é percebida de acordo com as alterações causadas pelos micro-organismos. Quando a população bacteriana atingir entre 10^6 e 10^7 UFC/cm², o odor torna-se perceptível. A partir de uma população de 10^8 UFC/cm², a carne apresenta formação de limo. Já acima disto, surgem alterações de cor e da consistência da carne (CASTILLO, 2006).

Os micro-organismos necessitam de água, nutrientes e condições apropriadas de temperatura e pH para se multiplicarem. As propriedades inerentes ao alimento com relação ao pH, atividade de água e temperatura determinam quais os micro-organismos, dentre os inicialmente presentes, que podem se desenvolver e constituir a microbiota deteriorante (SILVA JR., 1997).

Segundo Silva Jr. (1997), o tempo de vida de prateleira dos alimentos pode ser aumentado pela manipulação desses três fatores, isto é, aquecendo por tempo suficiente para matar os micro-organismos que interessam, removendo a água por secagem ou por adição de solutos, reduzindo a temperatura de conservação ou reduzindo o pH tanto pela adição direta de ácido como por processo de fermentação.

De acordo com Castillo (2006), dependendo da temperatura em que a carne permanecer, um grupo de deteriorantes irá se desenvolver. Os mesófilos possuem a faixa de temperatura ótima de crescimento de 30 a 35°C, os psicrotóxicos de 25 a 30°C, sendo que também crescem sob refrigeração, e os psicrófilos de 12 a 15°C. As bactérias mesófilas, além de crescerem mais rapidamente, incluem a maioria dos patógenos, e por isso, estas faixas de temperaturas ideais para o crescimento bacteriano devem ser evitadas.

Devido a estes fatores o tratamento térmico de produtos cárneos é fundamental para a qualidade e segurança dos mesmos, tanto envolvendo temperaturas baixas (resfriamento), quanto temperaturas altas (aquecimento). No texto a seguir, estes itens serão abordados.

2.3. Conservação Empregando Calor (Aquecimento)

O *Food Safety and Inspection Service* (USDA-FSIS) sugere que produtos cárneos industrializados submetidos ao tratamento térmico devem possuir três padrões de desempenho: letalidade (tratamento térmico - aquecimento), estabilização (resfriamento) e manipulação, (USDA, 1999). Os produtos, ao atenderem a estes três padrões, não possuem riscos de presença de micro-organismos patogênicos viáveis.

Os métodos de calor visam a eliminação de micro-organismos inconvenientes, e

quando isso não é possível, eles procuram impedir ou retardar o seu crescimento. De modo geral, a aplicação dos processos de conservação pelo calor está condicionada ao grau adequado de temperatura e ao tempo de sua exposição às diferentes características dos produtos a serem tratados (EVANGELISTA, 2005).

De acordo com Evangelista (2005), a intensidade e o tempo de exposição ao calor, apesar de sua vantajosa ação sobre os germes, poderão originar no produto, alterações de seu valor nutritivo e modificações de natureza histológica, física e química.

A extensão do tratamento térmico necessário para estabilizar um alimento é determinada pelo valor D (tempo requerido a certa temperatura para matar 90% da população inicial) da enzima ou micro-organismo mais termo resistente que pode estar presente nele. Cabe ressaltar ainda que as condições podem ser otimizadas para manter a qualidade sensorial e nutricional do alimento, através da utilização de altas temperaturas e tempos curtos (FELLOWS, 2006).

Os equipamentos industriais utilizados nos processos de aquecimento são geralmente de circulação forçada ou de imersão. Os que compreendem circulação forçada de ar com vapor indireto são utilizados em processos de secagem, com controle da umidade relativa. Os que compreendem circulação forçada com vapor direto, o fluido trocador de calor, geralmente vapor de água, substitui o ar, entrando em contato com o produto, e o meio fica saturado de umidade. No segundo caso, a eficiência da troca térmica é maior e o tempo de tratamento é menor, em relação ao primeiro.

A maioria dos equipamentos no formato de câmaras são projetados para atender aos dois processos, que comumente são chamados de secagem (vapor indireto) e cozimento (vapor direto), sendo esta uma vantagem em relação aos equipamentos de imersão, os quais não podem ser aplicados em etapas de secagem.

2.4. Conservação Empregando Frio (Resfriamento)

A aplicação do frio baseia-se em uma das operações unitárias mais empregadas na indústria de alimentos, a transferência de calor. Nesse caso, diferentemente da aplicação de calor, o foco quente é o alimento, do qual o calor passa para um meio exterior frio (ORDOÑEZ, 2005a).

Segundo Pardi (2001), o tratamento pelo frio constitui a técnica mais generalizada de conservação das carnes, seja para fins de estocagem, transporte, industrialização ou consumo.

O uso do frio oferece uma série de vantagens de grande interesse para a indústria, tais como máximo prolongamento da conservação dos alimentos, mínima modificação das

características sensoriais e do valor nutritivo, ampla esfera de uso, custos razoáveis e ausência de ações nocivas para a saúde (ORDOÑEZ, 2005a).

Segundo Ordoñez (2005a), o efeito conservador do frio baseia-se na inibição total ou parcial dos principais agentes responsáveis pela alteração dos alimentos. Dentre estes estão incluídos o crescimento e a atividade dos micro-organismos, as atividades metabólicas dos tecidos animais após o sacrifício, as enzimas e as reações químicas.

De acordo com Evangelista (2005), as baixas temperaturas exercem ação direta sobre os micro-organismos, que em sua temperatura sensível ficam inibidos ou destruídos, pois as atividades enzimáticas e as reações químicas são retardadas ou anuladas.

O resfriamento é uma etapa crítica no processamento de carnes bovinas, suínas, de aves e produtos cozidos que não necessitam de nenhuma preparação antes do consumo, pois contribui com a letalidade do produto (USDA, 1999). Se os produtos são adequadamente resfriados imediatamente após o cozimento, o potencial de germinação e crescimento de micro-organismos patogênicos formadores de esporos que são capazes de sobreviver ao tratamento por calor aplicado durante a cozimento pode ser minimizado (CEPEDA et al., 2013).

Entende-se por refrigeração, a redução e a manutenção da temperatura dos alimentos acima de seu ponto de congelamento, sendo mais usuais as temperaturas compreendidas entre -1°C e 8°C , o que implica apenas em mudanças no calor sensível do produto (ORDOÑEZ, 2005).

A refrigeração não tem ação esterilizante sobre os micro-organismos e por isso não pode melhorar as condições sanitárias do alimento, apenas retardar e impedir o surgimento de novos agentes deteriorantes (EVANGELISTA, 2005).

A refrigeração e o armazenamento em refrigeração constituem um dos métodos mais suaves de conservação. Os alimentos refrigerados geralmente são considerados frescos e de boa qualidade, sendo essa a razão de sua grande aceitação pelos consumidores (ORDOÑEZ, 2005a).

De acordo com Evangelista (2005), o processo de refrigeração é governado pelo grau de temperatura empregado e pela duração de tempo em que o alimento permanece armazenado. Seu objetivo é manter a qualidade original do alimento através da permanência dos valores nutritivos, qualidades de sanidade e prolongamento da vida de prateleira.

Os refrigeradores mecânicos possuem quatro elementos básicos: um evaporador, um compressor, um condensador e uma válvula de expansão. Os componentes dos refrigeradores normalmente são construídos de cobre, pois a baixa condutividade térmica proporciona altas taxas de transferência de calor e alta eficiência térmica (FELLOWS, 2006).

De acordo com Fellows (2006), um refrigerante circula entre os quatro elementos do refrigerador, alternando seu estado entre líquido e gasoso da seguinte forma:

- No evaporador, o líquido refrigerante evapora sob pressão reduzida, absorvendo calor latente de vaporização, o que faz com que o meio fique resfriado;
- O vapor refrigerante passa do evaporador para o compressor, onde a pressão é aumentada;
- Em seguida, o vapor vai para o condensador, onde a alta pressão é mantida, e o vapor é condensado;
- Finalmente, o líquido passa através da válvula de expansão, onde a pressão é reduzida para reiniciar o ciclo de refrigeração.

De acordo com Pardi (2001), os fatores importantes no processo de condicionamento da atmosfera de uma câmara fria são o controle da temperatura, da umidade relativa do ar, da circulação do ar e de sua velocidade.

Segundo Pardi (2001), o aumento da umidade relativa do ar reduz a perda de peso por evaporação de forma proporcional à diferença entre as pressões parciais de vapor da água e na superfície do produto. A velocidade de circulação do ar exerce influência na eliminação do calor e da umidade e na uniformidade da temperatura da câmara.

No processo de tratamento da carne, a velocidade da ação do frio é influenciada pelo calor específico, pelas proporções ou volume do produto, pela quantidade de gordura externa e pela temperatura. A gordura, por sua vez, reduz a eficiência de dissipação do calor. A temperatura a ser empregada depende do tipo de produto, do tempo em que se pretende conservá-lo e da técnica a ser utilizada, associada a outros fatores condicionantes da atmosfera (PARDI, 2001).

A escolha e o projeto adequado do sistema e do equipamento que serão utilizados para a refrigeração exigem que se saiba qual a quantidade de calor que deve ser eliminada. A carga de refrigeração é a quantidade de calor a ser extraída do alimento que se deseja refrigerar, reduzindo a temperatura do alimento de um valor inicial até o valor adequado para seu armazenamento (ORDOÑEZ, 2005a).

De acordo com Ordoñez (2005a), essa carga dependerá basicamente da massa total do produto, de seu calor específico em temperaturas superiores à do congelamento e da diferença existente entre a temperatura inicial e a temperatura final desejada.

Trabalhos que avaliam os métodos de tratamentos térmicos foram estudados por diversos autores. O resfriamento por imersão em água gelada e o resfriamento a vácuo são os mais rápidos métodos de resfriamento com um grande uso principalmente em produtos com a superfície rígida (KAYS, 1991). Laurindo et al. (2010) investigaram a influência da agitação da água sobre o coeficiente de transferência de calor por convecção, observando aumento do

coeficiente com o aumento da agitação. Dirita et al. (2007) investigaram a influência do jato de refrigeração e aquecimento do ar nos coeficientes local de troca térmica, concluindo que a taxa de transferência de calor é alterada pela condução de calor do alimento, pelo local e tempo de incidência do jato, assim como existem áreas onde o resfriamento (ou aquecimento) é mais lento em função das condições de contorno.

2.5. Transferência de Calor

De acordo com Incropera et al. (2008), transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço. A transferência de calor pode ocorrer de três formas diferentes: condução, convecção e radiação.

A condução de calor é resultado das atividades atômicas e moleculares, sendo vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância por causa das interações entre partículas (INCROPERA et al., 2008). A condução de calor ocorre com maior intensidade em sólidos, em consequência das interações moleculares serem maiores nestes do que em líquidos e gases. A condução é diretamente dependente das características do material, representada na Lei de Fourier pela condutividade térmica, k .

Segundo Çengel (2009), as condutividades térmicas dos materiais variam com a temperatura. Para alguns materiais, esta variação ao longo de determinados intervalos de temperatura é insignificante, porém para outros é significativa. A dependência da condutividade térmica sobre a temperatura não provoca uma complexidade considerável na análise da condução, por isso é comum avaliá-la no valor médio da temperatura e considerá-la constante nos cálculos.

De forma geral, nos problemas de transferência de calor, para a análise da condução, além da Lei de Fourier, é possível realizar um balanço de energia, onde, além da condutividade térmica, é importante avaliar a massa específica, ρ , e o calor específico, C_p , do sólido. A razão do produto de tais propriedades pela condutividade térmica define a difusividade térmica, α , do sólido.

Na análise de transferência de calor, um material geralmente é considerado isotrópico, isto é, com propriedades uniformes em todas as direções (ÇENGEL, 2009). Desta forma, as mesmas não variam com a posição, apenas com a temperatura.

A transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos de transmissão de calor. Além do mecanismo de energia por causa do movimento molecular aleatório (difusão), a energia também é transferida por meio do movimento global, ou macroscópico do fluido

(INCROPERA et al., 2008). Este tipo de transferência de calor ocorre entre o fluido em movimento e uma superfície quando ambos se encontram com temperaturas diferentes.

Pode-se classificar a transferência de calor por convecção de acordo com a natureza do escoamento. Quando o escoamento é causado por forças externas, ocorre a convecção forçada. Quando o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo a partir das diferenças de densidades do fluido ocasionadas pela diferença de temperatura, ocorre a convecção natural (INCROPERA et al., 2008).

A transferência de calor por convecção é diretamente dependente do coeficiente convectivo de transferência de calor, h , presente na Lei de Resfriamento de Newton. De acordo com Incropera et al. (2008), o coeficiente de transferência de calor varia com o tipo de fluxo (laminar ou turbulento), geometria do corpo e a área de escoamento, propriedades físicas do fluido, temperatura média, posição ao longo da superfície do corpo e do tipo de convecção.

Em muitos casos de transferência de calor através de um material sólido mais de um mecanismo está envolvido no processo. Por exemplo, um sólido submetido a um processo de aquecimento ou resfriamento, terá a superfície em contato com o fluido, a qual estará sujeita à convecção, enquanto que a condução ocorrerá no interior do sólido, entre centro e superfície.

Geralmente a energia que é transferida por convecção é a energia sensível, ou energia térmica interna do fluido, porém em alguns processos de convecção também existe a troca de calor latente, que vem acompanhada da mudança de fase do fluido, sendo as principais a ebulição e a condensação (INCROPERA et al., 2008).

Incropera et al. (2008) também descrevem a radiação térmica como a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não nula. Ela é mais intensa quando emitida por sólidos, mas gases e líquidos também emitem. É ocasionada por mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas e transportada por ondas eletromagnéticas. Ocorre mais eficientemente no vácuo, porém quando está em conjunto com a convecção natural também é relevante. Para convecção forçada, costuma-se desprezar a transferência de calor por radiação, uma vez que sua ordem de grandeza em relação à de convecção é muito menor.

Qualquer que seja o mecanismo de transferência de calor é necessário o conhecimento das propriedades termofísicas envolvidas em cada mecanismo. As propriedades termofísicas de produtos semelhantes à mortadela tem sido estudadas por diferentes autores (CARCIOFI et al., 2002; RINALDI et al., 2011; MARCOTE et al., 2008), também de outros produtos cárneos cozidos (BAIRI et al., 2007; MARCOTTE et al., 2008, RINALDI et al. 2010) e diferentes processos térmicos para diferentes alimentos (VERBOVEN et al., 2000;

TRUJILLO et al., 2007; CARSON et al., 2006).

2.6. Modelagem Matemática

A modelagem e a simulação de processos é uma ferramenta de análise importante, tem utilidade em qualquer uma das fases do ciclo de vida de um sistema de produção, simulando processos ou fenômenos físicos, através de modelos matemáticos que representam características observadas em sistemas reais possibilitando avaliar formas de otimizar a operação (PAIVA, 2005).

A simulação numérica em mecânica dos fluidos e transferência de calor teve grande desenvolvimento nas últimas décadas, sendo uma ferramenta poderosa para solução de importantes problemas aplicados às engenharias. A relativa facilidade de aplicação de métodos numéricos e a grande disseminação da computação foram os responsáveis pelo avanço nessa área (MALISKA, 1995).

Segundo Dantas et al., (2011), a utilização de modelos matemáticos que consideram as características do sistema de transferência de calor e massa em alimentos é uma ferramenta cada vez mais explorada pelos pesquisadores, tendo em vista a melhoria no processamento, redução de perdas e aumento da qualidade do produto final.

Fernandes et al. (2010) relatam que, uma vez com o modelo do sistema, com o uso de programa computacional para simulação, testes experimentais podem ser realizados para a verificação dos dados que permitam a validação do modelo. Depois de validado o modelo, podem ser obtidos os dados do processo em diversas condições, podendo ser realizada então a otimização, não sendo necessário realizar experimentos em tais condições, o que possibilita a economia de tempo, dinheiro, energia e pessoal.

Segundo Singh e Kulshrestha (1987), os modelos matemáticos podem ser divididos em dois grupos principais: empíricos e fenomenológicos. Os modelos empíricos geralmente são obtidos a partir de simples correlações matemáticas dos dados experimentais e os seus parâmetros, normalmente, não possuem significado físico. De acordo com Coutinho et al., (2005), os modelos fenomenológicos, por sua vez, consideram as etapas elementares dos processos de transferência e os seus parâmetros, frequentemente, apresentam significado físico.

Para Resende et al. (2010), a modelagem fenomenológica é baseada nos princípios básicos de conservação de massa e energia, sendo composta de várias etapas. A primeira delas é a definição do sistema a ser modelado, em seguida a escolha das variáveis dependentes fundamentais as quais descrevem o sistema. O terceiro passo é a escolha das variáveis de

estado que permitem medir as variáveis dependentes fundamentais: temperatura, velocidade, concentração.

Segundo Fracasso (2011), os modelos fenomenológicos podem ser de parâmetros concentrados ou distribuídos e, geralmente, representam as principais tendências do processo, mesmo fora das condições experimentais. De acordo com Mellado (2007), o fenômeno pode ser representado por uma equação diferencial ordinária ou uma equação diferencial parcial, que pode ou não ter solução analítica. Se não houver solução analítica, deve-se encontrar uma solução numérica, sendo que os principais métodos utilizados são diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos.

Esses métodos se baseiam na substituição de equações diferenciais por sistemas de equações algébricas e na discretização das equações diferenciais. O Método do Volume de Controle determina a equação das diferenças diretamente a partir das considerações da equação da conservação da energia (KREITH; BOHN, 2003).

De acordo com Maliska (1995), o Método de Diferenças Finitas pode ser empregado para solucionar as equações de modelos a parâmetros concentrados ou distribuídos, sendo utilizado para resolver problemas de valor de contorno ou valor inicial.

Ruggiero e Lopes (1996) citam que além dos Métodos de Runge-Kutta, podem ser utilizado os Métodos de Série de Taylor, os quais fornecem solução para qualquer equação diferencial. Sendo esses mais utilizados para Problemas de Valor Inicial (PVI). Para Problemas de Valor de Contorno (PVC), o Método das Diferenças Finitas é o mais comum. Para geometrias irregulares, Wang e Sun (2002) recomendam o Método dos Elementos Finitos.

Qualquer que seja o método numérico utilizado, Çengel (2009) recomenda diferentes formas para avaliar o erro, variando o tamanho da malha e o passo de tempo e interpretando os resultados obtidos.

De acordo com Costa (2004), o MATrix LABoratory (MATLAB) é um ambiente de trabalho computacional que possui ferramentas avançadas de análise e visualização de dados, além de possuir características de linguagem de programação. O MATLAB possui diversas funções destinadas à resolução de sistemas de equações diferenciais ordinárias. O método padrão utilizado para resolução do sistema de equações diferenciais pelo comando *Ordinary Differential Equations* (ODE) é o Runge-Kutta. No entanto, outros métodos podem ser utilizados.

De acordo com Cervi (2009), um Problema Direto (PD) é utilizado quando se deseja encontrar os efeitos resultantes a partir do conhecimento das causas. Causas, em modelos matemáticos, são as condições iniciais e condições de contorno do sistema. Já um Problema

Inverso (PI) é utilizado quando se deseja encontrar as causas desconhecidas, através de observações dos efeitos desse fenômeno. Assim é possível estimar os parâmetros através da aplicação de algum método de resolução do Problema Inverso acoplado ao Problema Direto.

Segundo Parolin (2010), o Problema Direto em transferência de calor é obtido a partir da resolução da Equação de Condução do Calor, via modelo fenomenológico, com condições iniciais e condições de contorno, por meio de soluções analíticas ou numéricas.

Segundo Su e Silva Neto (2001), a solução de Problemas Inversos de transferência de calor tem se tornado parte essencial do desenvolvimento de aplicações relevantes na engenharia, tais como, projetos de equipamentos térmicos, sistemas e instrumentos. Por meio da resolução do PI busca-se aproximar a distribuição da variável calculada com o PD, aos dados experimentais, minimizando as diferenças, sendo possível assim, estimar os coeficientes ou parâmetros do modelo. Através da função objetivo, representada pelo coeficiente de determinação (R^2), é possível comparar os dados calculados com os dados experimentais, qualificando os parâmetros do PD.

Métodos determinísticos como o Método de Newton, o Método Quase-Newton, o Método de Levenberg-Marquardt, entre outros, são baseados em informação de gradiente, para minimizar a função objetivo. Embora estes métodos convirjam geralmente a mínimos locais ao invés de globais, a principal vantagem é a boa taxa de convergência. Porém, apresentam problemas de singularidades e derivadas nulas (PAROLIN, 2010). Desta forma, para a resolução do PI neste trabalho foi escolhido o Método de Procura em Rede Modificado (PRM).

No PRM são definidos os intervalos válidos de cada parâmetro a ser estimado, considerada a possível de solução, e a partição de cada intervalo relativo a cada parâmetro. O método encontra o melhor conjunto de parâmetros por exaustão, calculando as distribuições da variável medida através de todas as possibilidades de combinações dos coeficientes ou parâmetros dentro dos intervalos iniciais, refinando os intervalos a cada término deste processo, com um número máximo de refinamentos pré-definidos (SILVA NETO e MOURA NETO, 2005; BORGES et al. 2008; PAROLIN e BORGES, 2008).

A modelagem matemática em tratamentos térmicos de alimentos vem sendo estudada por diversos autores, com diversos métodos de resolução.

Neckel e Mariani (2010) desenvolveram um modelo matemático computacional para o congelamento da beterraba utilizando o Método de Diferenças Finitas Explícito. Os resultados mostraram que a associação do método de predição das propriedades termofísicas e a equação entálpica de transferência de calor em regime transiente utilizadas permitiram prever com razoável precisão a evolução da temperatura no interior de um alimento submetido ao

processo de congelamento.

Augusto et al. (2009) e Augusto et al. (2010), trabalharam com modelo matemático em processos de pasteurização e esterilização de carne bovina em conserva, respectivamente, utilizando a Análise dos Elementos Finitos. Para o processo de esterilização, comparando dois tipos de embalagem, os resultados mostraram a redução de cerca de 7% do tempo de aquecimento e 11% do de resfriamento da geometria proposta em relação a tradicional. Os resultados obtidos indicaram a possibilidade de economia de energia, tempo e recursos hídricos através de seleção de embalagens com geometrias mais eficientes.

Mariani e Silva (2006) modelaram o congelamento de morangos utilizando o Método das Diferenças Finitas Explícito. Os resultados mostraram que a equação modificada de transferência de calor em regime transiente utilizada permitiu prever com razoável precisão a evolução da temperatura no interior de um alimento submetido ao processo de resfriamento ou congelamento. Os autores também observaram que a transferência de calor na superfície do morango é significativamente afetada pela modificação do coeficiente de transferência de calor, principalmente para o processo de congelamento.

Silva (2015) modelou o processo de cozimento de linguiça tipo calabresa. Os resultados mostraram que o modelo matemático proposto foi apropriado para a secagem da linguiça calabresa e permitiu a otimização do processo, reduzindo cerca de 60 minutos o tempo do processo.

Wang e Sun (2002) modelaram o processo de secagem e cozimento de pernil suíno utilizando o Método dos Elementos Finitos. Mittal e Zhang (2000) modelaram o cozimento de salsichas usando redes neurais. Siripon et al. (2007) modelaram o processo de cozimento de frango em água a 85°C, 90°C e 95°C utilizando Análise de Diferenças Finitas. Já Ahmad et al. (2015) modelaram o cozimento de carne cilíndrica por convecção natural utilizando o método de Runge-Kutta. Em todos os trabalhos, os autores encontraram modelos adequados aos dados experimentais, sendo que quanto mais próximo do núcleo do produto, menores foram os desvios encontrados.

Em relação ao PRM, diversos autores têm utilizado o método em trabalhos de modelagem que envolvem transferência de calor e outras áreas: Su e Silva Neto (2001), Borges et al. (2008), Parolin e Borges (2008), Cervi (2009), Parolin (2010), Zucolotto et al (2015). No entanto, ainda é escassa a produção de trabalhos de modelagem de tratamentos térmicos de alimentos utilizando este método.

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1. Dados Experimentais dos Processos

3.1.1. Preparação de Massa e Embutimento

Os ensaios experimentais foram realizados em uma planta de abate e industrialização de suínos localizada no oeste catarinense. As matérias-primas utilizadas no preparo da formulação para os ensaios foram CMS, retalhos de carne de miúdos internos e externos, músculo, rim, fígado, carnes entre outros.

Depois de previamente montadas as formulações de acordo com a agroindústria, elas foram transportadas para o setor de preparação de massa. Os blocos de matéria-prima congelada foram moídos em moedor (Seydelmann, modelo GW-300). O CMS resfriado foi adicionado diretamente na rosca sem fim conectada ao moedor, que transporta as carnes para o silo dosador, no qual realizou-se a dosagem em misturadeira (Seydelmann, modelo MTV-700), onde então foram adicionados os demais ingredientes e realizada a homogeneização da mistura. Ao sair da misturadeira, a massa foi bombeada para o emulsificador (Karl Schnell, modelo DKV-138) para a retirada do ar através de vácuo e a refino da massa. Cabe ressaltar que a massa da emulsão deve estar lisa, consistente, bem homogeneizada e em uma única fase. Nas mortadelas que possuem toucinho, este é adicionado na massa depois de refinada.

O toucinho utilizado na formulação dessas mortadelas foi previamente picado no picador de toucinhos (Holac, modelo VA-200), composto por grupos de navalhas internas posicionadas em duas direções, de modo a picar o toucinho na forma de cubos.

Depois de preparada a massa das mortadelas, realizou-se o embutimento destas em envoltórios plásticos de poliamida previamente hidratados em água a 35°C por 30 a 40 minutos para aumentar o calibre e deixá-los mais flexíveis, facilitando o embutimento.

Para o processo de embutimento os envoltórios foram colocados em um funil e a massa foi então embutida. Ajustou-se nas máquinas (Handtmann, modelo VF-630) o peso das peças, pressão de grampeamento e extração do ar da massa, conseguindo-se assim conferir peso e tamanho das peças. As mortadelas foram então colocadas em varas dispostas em carros para serem encaminhadas para cozimento.

Os ensaios foram realizados com dois tipos de mortadelas com formulação e

dimensões diferentes. A Tabela 1 apresenta a informação nutricional referente à formulação e a Tabela 2 a especificação de dimensões, massa e alocação no carro de cada produto.

Tabela 1: Informação Nutricional referente à formulação para uma porção de 40 g de produto.

Produto	A	B
Valor energético [kJ]	400	372
Carboidratos [g]	2,3	2,2
Proteínas [g]	5,0	5,3
Gorduras Totais [g]	7,5	6,6
Fibra Alimentar [g]	0,0	0,4
Sódio [mg]	554,0	534,0

Fonte: Autoria própria.

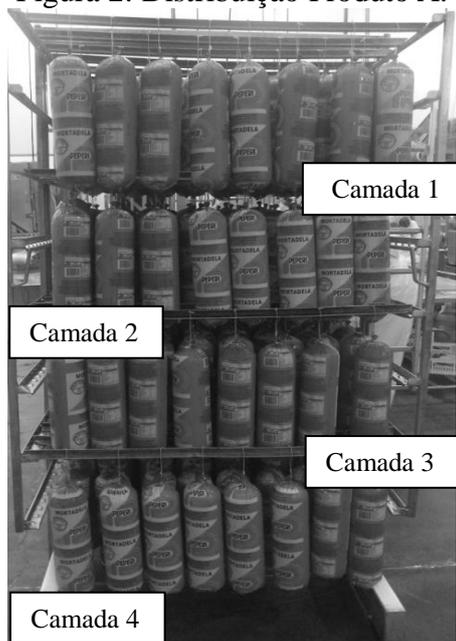
Tabela 2: Dados de Dimensões do Produto e Alocação no Carro.

Produto	A	B
Massa Média [kg]	2,50 ± 0,01	5,00 ± 0,01
Diâmetro Médio [mm]	101 ± 1,0	150 ± 1,0
Raio Médio [mm]	50,5 ± 0,5	75,0 ± 0,5
Comprimento Médio [mm]	390 ± 2,0	400 ± 2,0
N° de Peças por Vara	8	5
N° de Varas por Carro	28	22
N° Varas por Camada	8	6 e 5
N° Camadas por Carro	4	4

Fonte: Autoria própria.

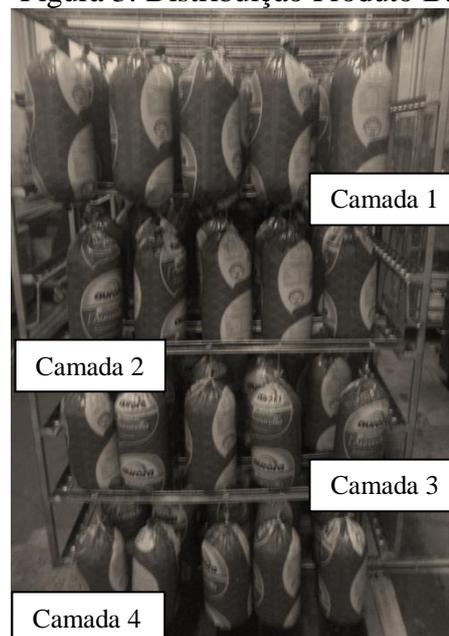
As peças foram acondicionadas nas varas verticalmente, lado a lado. As varas foram distribuídas nos carros de maneira uniforme e espaçadas igualmente entre si. A Figura 2 apresenta a alocação do produto A e a Figura 3 do produto B nas varas e no carro.

Figura 2: Distribuição Produto A.



Fonte: Autoria Própria

Figura 3: Distribuição Produto B.



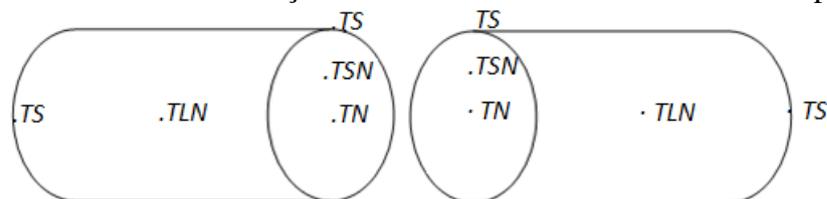
Fonte: Autoria Própria

3.1.2. Cozimento e Resfriamento em Estufas

Nas estufas (Maurer, modelo semi-contínua) foram realizados o cozimento e o resfriamento das mortadelas. Cada estufa possui dois ambientes, o de cozimento e o de resfriamento. Cada ambiente comporta 10 carros, de forma longitudinal. O ambiente do cozimento é separado do ambiente de resfriamento por uma porta intermediária, isolada termicamente e com vedações nas extremidades. Cada posição de um carro possui um motor individual para a circulação forçada do fluido de trabalho.

O cozimento é realizado por calor úmido (vapor direto, a baixa pressão) e o resfriamento por ar frio e banhos de água. A temperatura interna das estufas no ambiente de cozimento foi monitorada por dois termopares (J da Luz, modelo PT100) um próximo à porta de entrada (TT1) e outro próximo à porta que isola os ambientes (TT2), na parte inferior. Os sensores encontram-se nestes locais, pois a entrada de vapor, ar e água encontra-se na parte superior, portanto, é o local considerado ponto frio no processo de cozimento e ponto quente no processo de resfriamento. Além disso, outro PT100 é introduzido no centro de uma peça do produto (TN) para acompanhar a temperatura interna do produto, no centro do carro, devido ao movimento de circulação do fluido, e outro preso a superfície do produto (TS) para acompanhar a temperatura neste local. Para os ensaios, também foram inseridos sensores de mesmo modelo em um ponto intermediário entre o centro e a superfície na direção radial (TSN) e na direção longitudinal (TLN). A Figura 4 apresenta o esquema do corte central da peça indicando os pontos de coleta de temperatura onde os sensores foram inseridos no produto.

Figura 4: Corte Central da Peça indicando os Pontos de Coleta de Temperatura



Fonte: Autoria Própria.

A velocidade de escoamento do fluido foi medida em triplicata, com anemômetro digital (Minipa, modelo MDA-11) em três pontos diferentes, na parte superior, inferior e no centro da estufa, conforme recomendação do fabricante.

O aquecimento foi gradativo para não ocasionar a quebra da emulsão através da dilatação rápida da gordura, que pode romper a rede proteica formada na emulsão. O

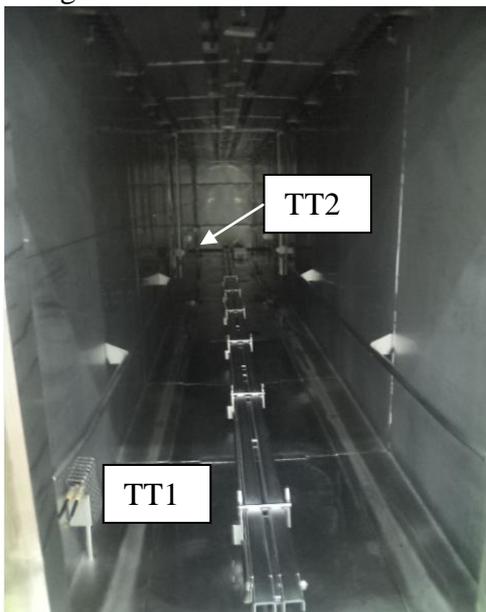
cozimento foi concluído quando a temperatura interna no núcleo do produto atingiu no mínimo 75°C. O resfriamento foi concluído quando a temperatura no núcleo do produto atingiu 30°C.

O sistema de funcionamento das estufas é programado em painéis eletrônicos, e funciona com tempo e temperatura controlados. Os dados são registrados em um sistema supervisor. Caso atinja a temperatura desejada dentro do tempo estabelecido, o programa encerra a operação, caso contrário, o sistema continua operando até que a temperatura desejada seja atingida, independentemente do tempo.

Foram realizados três ensaios de cozimento e resfriamento para cada produto, somente para a confirmação do comportamento das temperaturas. Para realização da modelagem matemática, utilizou-se os dados de um ensaio.

A parte interna do equipamento está apresentada na Figura 5 e a alocação dos termopares na Figura 6, através das quais é possível observar os pontos de coleta das temperaturas do fluido, ou seja, do ambiente interno das estufas.

Figura 5: Parte Interna da Estufa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 6: Alocação dos Termopares.



Fonte: Autoria própria.

3.2. Propriedades Termofísicas do Produto

Para a determinação das propriedades termofísicas utilizou-se a metodologia descrita por Choi e Okos (1986) onde avaliou-se a condutividade térmica, massa específica e calor específico dos produtos em função da temperatura e em função da composição. Para a condutividade térmica, também utilizou-se a metodologia descrita por Murakami e Okos

(1989) como função do modelo de circuito térmico em paralelo e em série. Ambas as metodologias estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Equações Utilizadas para Cálculo das Propriedades Termofísicas

Propriedade	Dependência com a Composição	Dependência com a Temperatura para cada Componente
Calor Específico [kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹]	$c_p = \sum c_{p_j} \cdot X_j^v$	$c_{p,proteínas} = 2,0082 + 1,2089x10^{-3}T - 1,3129x10^{-6}T^2$
		$c_{p,lipídeos} = 1,9842 + 1,4733x10^{-3}T - 4,8008x10^{-6}T^2$
		$c_{p,carboidratos} = 1,5488 + 1,9625x10^{-3}T - 5,9399x10^{-6}T^2$
		$c_{p,agua} = 4,1762 + 9,0864x10^{-5}T - 5,4731x10^{-6}T^2$
		$c_{p,minerais} = 1,0926 + 1,8896x10^{-3}T - 3,6817x10^{-6}T^2$
Condutividade Térmica [W.m ⁻¹ .°C ⁻¹]	$k = \sum k_j \cdot X_j^v$ (Paralelo) $k = \frac{1}{\sum (X_j^v / k_j)_j}$ (Série)	$k_{proteínas} = 1,7781x10^{-1} + 1,1958x10^{-3}T - 2,7178x10^{-6}T^2$
		$k_{lipídeos} = 1,8071x10^{-1} - 2,7604x10^{-3}T - 1,7749x10^{-7}T^2$
		$k_{carboidratos} = 2,0141x10^{-1} + 1,3874x10^{-3}T - 4,3312x10^{-6}T^2$
		$k_{agua} = 5,7109x10^{-1} + 1,7625x10^{-3}T - 6,7036x10^{-6}T^2$
		$k_{minerais} = 3,2962x10^{-1} + 1,4011x10^{-3}T - 2,9069x10^{-6}T^2$
Fração Volumétrica em função da Massa Específica [kg.m ⁻³]	$X_j^v = \frac{X_j / \rho_j}{\sum (X_j / \rho_j)_j}$ $\rho = \sum \rho_j \cdot X_j$	$\rho_{proteínas} = 1,3299x10^3 - 5,1840x10^{-1}T$
		$\rho_{lipídeos} = 9,2559x10^2 - 4,1757x10^{-1}T$
		$\rho_{carboidratos} = 1,5991x10^3 - 3,1046x10^{-1}T$
		$\rho_{agua} = 9,9718x10^2 + 3,1439x10^{-3}T - 3,7574x10^{-3}T^2$
		$\rho_{minerais} = 2,4238x10^3 - 2,8063x10^{-1}T$

Fonte: CHOI e OKOS, 1986; MURAKAMI e OKOS, 1989.

Na determinação da condutividade térmica, utilizou-se a média aritmética entre a condutividade do modelo em série e do modelo em paralelo conforme recomendado por Neckel e Mariani (2010).

Optou-se por avaliar a variação das propriedades físicas do produto com a temperatura em função da mudança na característica dos produtos, principalmente na faixa de temperatura que envolve o cozimento, na qual o produto inicia o processo com a característica de uma massa fluida pastosa e termina como produto sólido firme.

Para a determinação da composição dos produtos foram realizadas análises físico-químicas, em triplicata, para determinação de proteínas (BRASIL, 1999), lipídeos (AOAC, 2000; BRASIL, 1999), resíduo mineral fixo (BRASIL, 1999), umidade (BRASIL, 1999) e carboidratos (BRASIL, 2003).

3.3. Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor

Para a determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor, utilizou-se a correlação de Hilpert, recomendada por Incropera et al. (2008), conforme Equação 1.

$$Nu_D = \frac{hD}{k_\infty} = c \cdot Re_D^m Pr^{1/3} \quad \text{Equação 1}$$

onde os coeficientes c e m dependem do regime de escoamento determinado pelo número de Reynolds, conforme Tabela 4 e Equação 2. As propriedades são avaliadas na temperatura de filme, ou seja, na temperatura média entre fluido e superfície.

$$Re_D = \frac{\rho_\infty Du_\infty}{\mu_\infty} \quad \text{Equação 2}$$

Tabela 4: Constantes c e m para a Correlação de Hilpert

Re_D	C	m
0,4 – 4	0,989	0,330
4 – 40	0,911	0,385
40 – 4000	0,683	0,466
4000 – 40000	0,193	0,618
40000 – 400000	0,027	0,805

Fonte: INCROPERA et al., 2008.

O número de Prandtl avaliado na temperatura de filme pode ser obtido de acordo com a Equação 3:

$$Pr = \frac{c_{p,\infty} \mu_\infty}{k_\infty} \quad \text{Equação 3}$$

As propriedades físicas dos fluidos, ar e vapor de água, em função da temperatura foram obtidas de Çengel (2009).

3.4. Modelagem Matemática dos Processos

A modelagem matemática foi realizada pelo modelo fenomenológico utilizando a equação da difusão do calor em coordenadas cilíndricas, em regime transiente, obtida a partir do balanço diferencial de energia, conforme Equação 4. Para resolução foram consideradas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Sem geração interna de calor;
- Regime transiente;
- Fluxo unidimensional ao longo do raio;
- Cilindro infinito.

- Propriedades físicas constantes.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad \text{Equação 4}$$

A hipótese de fluxo de calor unidimensional na direção do raio foi adotada somente após a avaliação da variação de temperatura nos pontos determinados.

Para a resolução da Equação 4, na forma de Problema Direto (PD), é necessário o conhecimento das condições iniciais e as condições de contorno que descrevem o problema. A condição inicial está baseada na temperatura do produto no início do processo, conforme Equações 5, 6 e 7. As condições de contorno estão baseadas no centro do produto e na condição de convecção na superfície, conforme Equações 8 e 9:

$$T(r, t) = T(0, 0) = T_i \quad \text{Equação 5}$$

$$T(r, t) = T(R, 0) = T_i \quad \text{Equação 6}$$

$$T(\infty, t) = T(\infty, 0) = T_\infty \quad \text{Equação 7}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad \text{Equação 8}$$

$$-k(T) \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h(T) [T(\infty, t) - T(R, t)] \quad \text{Equação 9}$$

Para as hipóteses citadas acima, existe solução analítica da Equação 4, que é amplamente utilizada na literatura, obtida a partir do Método de Separação de Variáveis, resultando na forma de expansão em Séries de Fourier, onde as raízes devem ser determinadas numericamente. A Equação 10 apresenta a solução para a temperatura adimensional para um cilindro infinito (ÇENGEL, 2009).

$$\theta(r, t) = \frac{T(r) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\lambda_n} \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 \tau} J_0\left(\frac{\lambda_n r}{R}\right) \quad \text{Equação 10}$$

onde as raízes estão relacionadas com os números adimensionais de Biot e Fourier, conforme Equações 11 e 12:

$$Bi = \lambda_n \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0(\lambda_n)} = \frac{hR}{k} \quad \text{Equação 11}$$

$$\tau = Fo = \frac{\alpha t}{R^2} \quad \text{Equação 12}$$

onde a difusividade térmica α é dada pela Equação 13:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad \text{Equação 13}$$

A partir das distribuições de temperaturas experimentais, estas foram comparadas com as distribuições de temperaturas calculadas a partir do Problema Direto (PD) de transferência de calor, onde estimou-se os parâmetros térmicos com a resolução do Problema Inverso (PI). O PD foi obtido da Equação 4, com as condições de contorno apresentadas nas Equações 5 a 9, resolvido pelo método de Separação de Variáveis, o qual contém os parâmetros térmicos, conforme Equação 10. O PI foi resolvido numericamente, onde estimou-se os parâmetros térmicos, minimizando a diferença das distribuições de temperaturas experimentais e calculadas com o PD.

Para resolução numérica do PI e obtenção dos parâmetros ρ , c_p , k , h e λ , utilizou-se regressão não linear, o qual foi implementado no software Matlab Versão R2009a. Para demais análises utilizou-se o software Excel 2010. Para a regressão não linear utilizou-se o Método de Procura em Rede Modificado (PRM), descrito por Silva Neto e Moura Neto (2005), também utilizado por Borges et al. (2008), Parolin e Borges (2008), Parolin (2010) e Zucolloto et al (2015) e adaptado para este estudo conforme:

- *Passo 1:* Estima-se intervalos $I_p = [\beta_{p\min}, \beta_{p\max}]$ de valores de cada parâmetro β_p onde $p=1, 2, 3, \dots, n$ (número de parâmetros) que contém o valor ótimo de β_p (β_{ot}).
- *Passo 2:* Constrói-se uma partição de s pontos $\beta_{pk} = \beta_{p\min} + (k-1)\Delta\beta_p$ com $k=1, 2, 3, \dots, s$ e $\Delta\beta_p = (\beta_{p\max} - \beta_{p\min})/(s-1)$.
- *Passo 3:* Para cada seqüência de valores $(\beta_{1k}, \beta_{2k}, \dots, \beta_{nk})$ para $k=1, 2, 3, \dots, s$ resolve-se o PD usando a solução algébrica ou numérica.
- *Passo 4:* Calcula-se as diferenças d_i entre as soluções estimadas e os dados experimentais usando a seguinte Equação 14:

$$d_i = \sum_{j=1}^m \sum_{t=0}^{tf} (y_{est}(j,t) - y_{exp}(j,t))^2 \quad \text{Equação 14}$$

onde $i=1,2,3,\dots,s^n$, $y_{exp}(j,t)$ são os dados experimentais para cada posição j e tempo t .

- *Passo 5:* Identifica-se o menor valor de d_i (d_{\min}). Esta diferença corresponde ao conjunto de parâmetros β_{ot} para o intervalo I_p .
- *Passo 6:* Refinamento da solução. Define-se novo intervalo $I_p = [\beta_{p\min}, \beta_{p\max}]$, tal que $\beta_{p\min} = \beta_{pot} - \Delta\beta_p$ e $\beta_{p\max} = \beta_{pot} + \Delta\beta_p$.
- *Passo 7:* Repete-se os passos 2 a 6, estimando tantos intervalos I_{pm} , $m = 1,2,\dots,nr$ (número de refinamentos) até que $|d_{\min}^{i+1} - d_{\min}^i| < \varepsilon$, onde ε é o parâmetro do critério de parada.

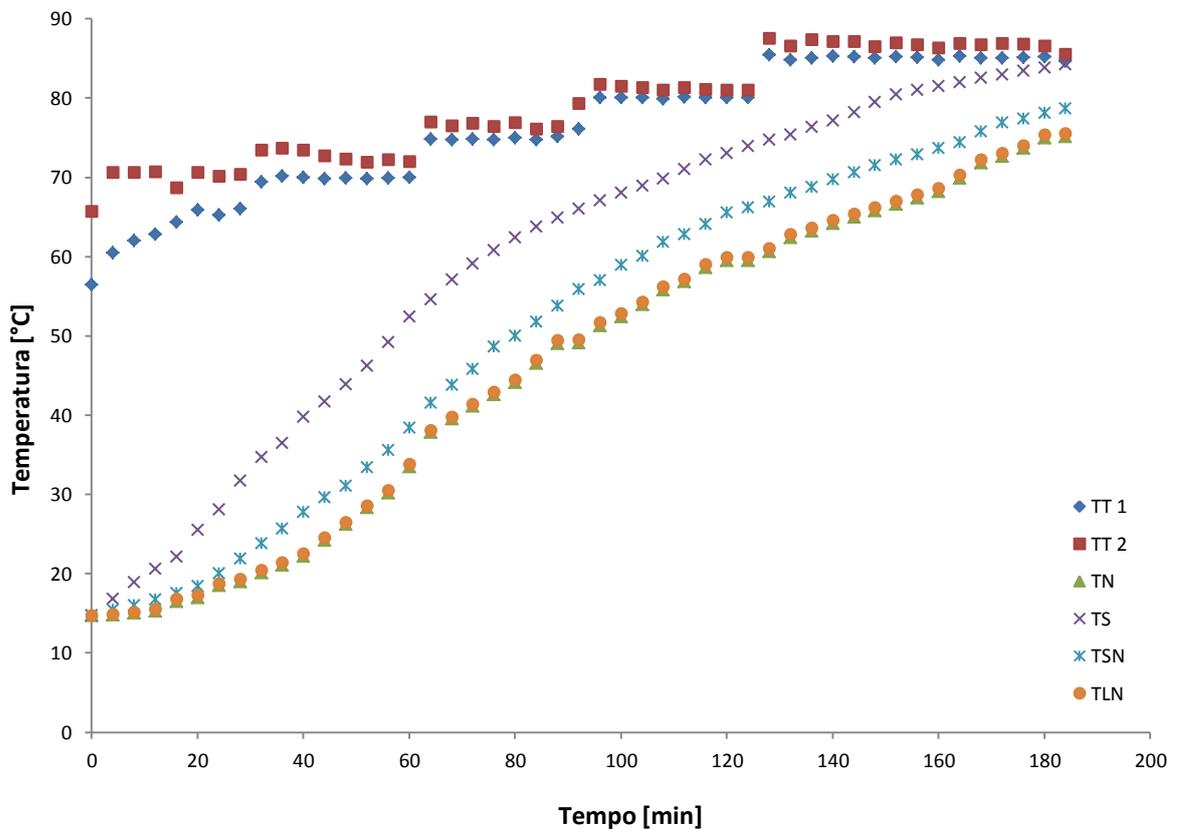
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir estão apresentados os resultados para os dados experimentais dos processos de cozimento e resfriamento de mortadelas em estufas, os modelos obtidos por meio das correlações descritas na literatura para as propriedades termofísicas, o modelo matemático computacional, que descreve os processos, bem como os parâmetros obtidos numericamente.

4.1. Dados Experimentais dos Processos

A Figura 7 mostra os resultados de temperatura obtidos para o processo de cozimento do produto A e a Figura 8 para o produto B.

Figura 7: Resultados Experimentais para o Cozimento do Produto A.



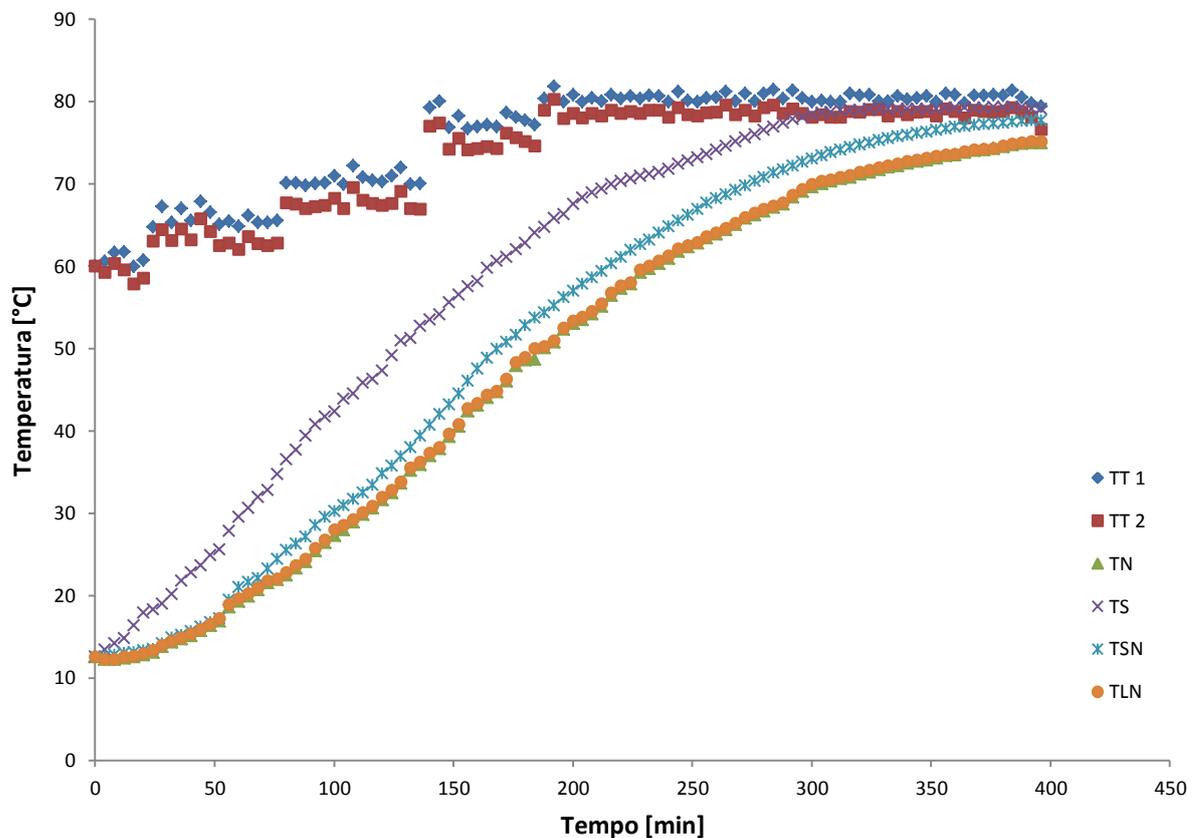
Fonte: Autoria própria.

Observa-se através da Figura 7 que o comportamento da temperatura do produto ao longo do comprimento, representado por TLN, é muito próximo ao comportamento da curva

no centro, representado por TN. Enquanto que o comportamento da temperatura na superfície do produto, representado por TS, e o comportamento da temperatura no ponto entre o centro e a superfície, representado por TSN, são distintos em relação ao comportamento de TN. Isso permite concluir que a modelagem pode ser feita unidimensional na direção do raio, considerando que o produto A seja um cilindro infinito.

Verifica-se na Figura 7 que com o aumento gradual da temperatura do fluido, representado por TT1 e TT2, o tempo e duração do processo de cozimento do produto A encerrou em aproximadamente 190 minutos. Além disso, a temperatura no centro do produto apresentou-se menor que a temperatura superficial durante todo o processo, conforme esperado, uma vez que o fluxo de calor ocorre na direção da superfície para o centro.

Figura 8: Resultados Experimentais para o Cozimento do Produto B.

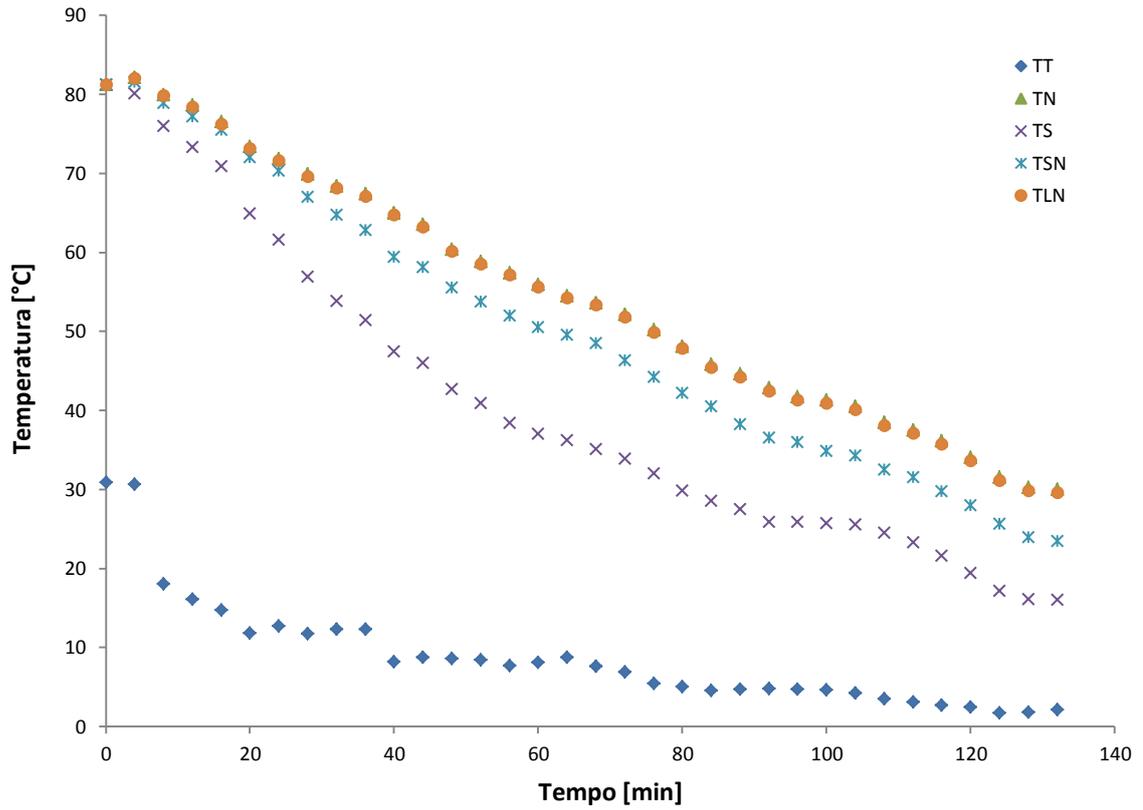


Fonte: Autoria própria.

Visualiza-se na Figura 8 que o comportamento para o produto B é semelhante ao comentado para o produto A. No entanto, a duração do processo de cozimento foi de aproximadamente 400 minutos, consequência da dimensão do produto, que apresenta diâmetro médio 49 mm maior do que o produto A.

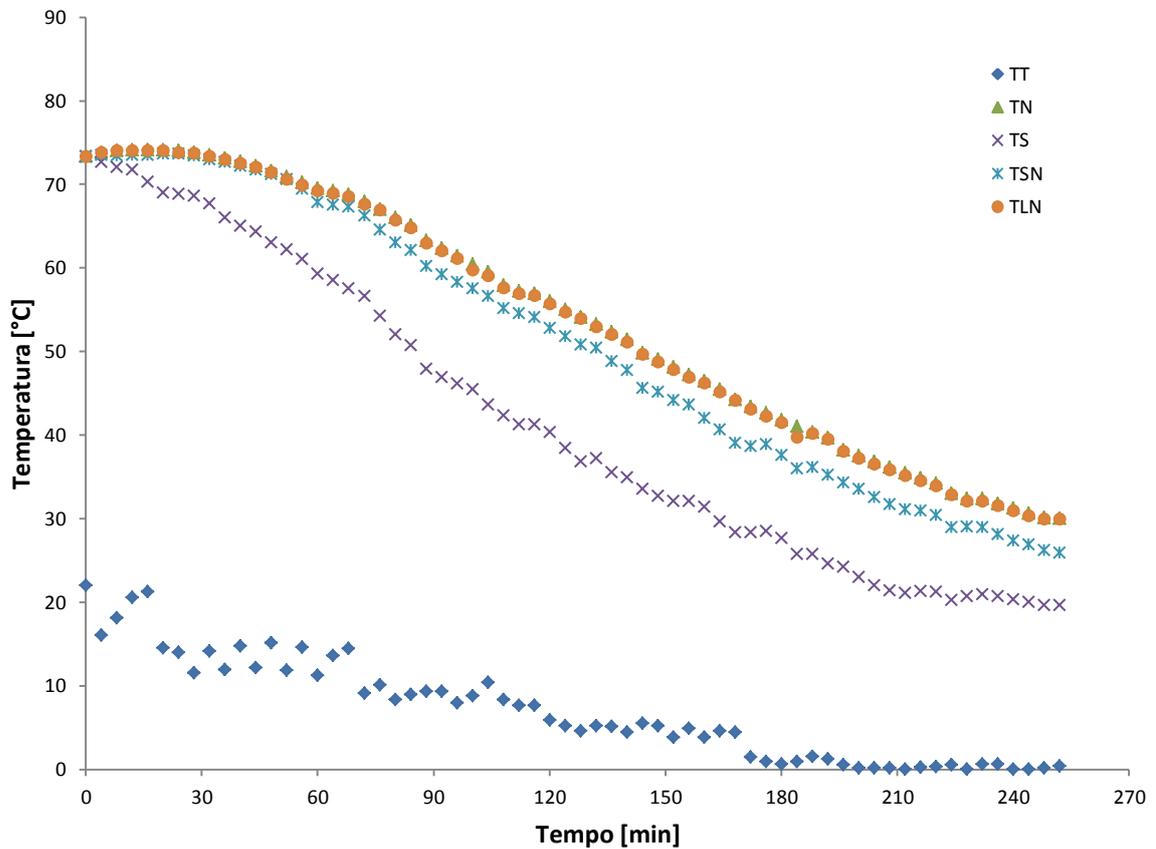
A Figura 9 mostra os resultados obtidos para o processo de resfriamento do produto A e a Figura 10 para o produto B.

Figura 9: Resultados Experimentais para o Resfriamento do Produto A.



Fonte: Autoria própria.

Figura 10: Resultados Experimentais para o Resfriamento do Produto B.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se através da Figura 9, que da mesma forma que no processo de cozimento, o processo de resfriamento também pode ser modelado de forma unidimensional na direção do raio, considerando que o produto A seja um cilindro infinito, uma vez que os pontos de TN e TLN quase se sobrepõem.

Verifica-se na Figura 9 que com a redução gradual da temperatura do fluido, representado por TT, o tempo e duração do processo de resfriamento do produto A encerrou em aproximadamente 135 minutos. Além disso, a temperatura no centro do produto apresentou-se maior que a temperatura superficial durante todo o processo, conforme esperado, uma vez que o fluxo de calor ocorre na direção do centro para a superfície.

Visualiza-se na Figura 10 que o comportamento para o produto B é semelhante ao comentado para o produto A, exceto pela duração do processo de resfriamento, que foi de aproximadamente 250 minutos, semelhante ao que ocorreu no processo de cozimento, em consequência das dimensões do produto B.

4.2. Propriedades Termofísicas do Produto

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para composição centesimal dos produtos A e B.

Tabela 5: Composição Centesimal dos Produtos A e B.

Componente	Composição do Produto A [%]	Composição do Produto B [%]
Proteína	12,55 ± 0,12	13,31 ± 0,13
Lipídeos	18,64 ± 0,19	16,71 ± 0,16
Carboidratos	5,70 ± 0,10	5,60 ± 0,14
Minerais	3,95 ± 0,08	4,48 ± 0,05
Umidade	59,16 ± 0,14	59,90 ± 0,09

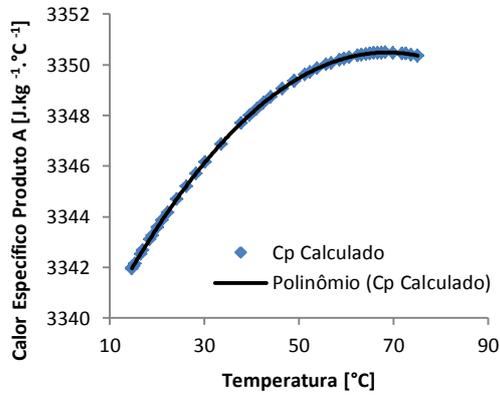
Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Tabela 5 que as principais diferenças na composição dos produtos A e B estão relacionadas com proteína e lipídeos, onde o produto B apresenta uma quantidade maior de proteína e menor de lipídeos que o produto A. Para os demais componentes a composição é semelhante nos dois produtos.

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos para o calor específico em função da temperatura do produto A e a Figura 12 do produto B. A Figura 13 apresenta os resultados obtidos para a massa específica em função da temperatura do produto A e a Figura 14 do produto B. A Figura 15 apresenta os resultados obtidos para a condutividade térmica em função da temperatura do produto A e a Figura 16 do produto B. A Tabela 6 apresenta os

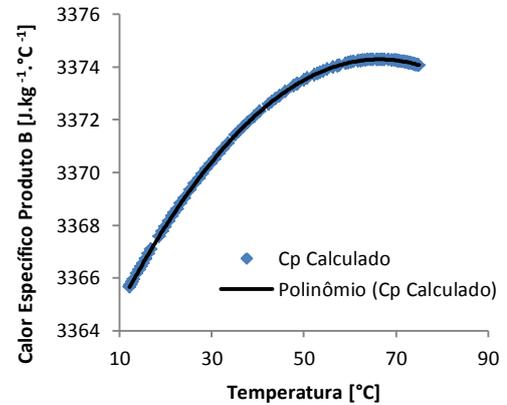
modelos obtidos nas respectivas figuras para as propriedades termofísicas dos produtos A e B em função da faixa de temperatura estudada a partir das Equações apresentadas na Tabela 3.

Figura 11: Calor Específico em função da Temperatura para o Produto A.



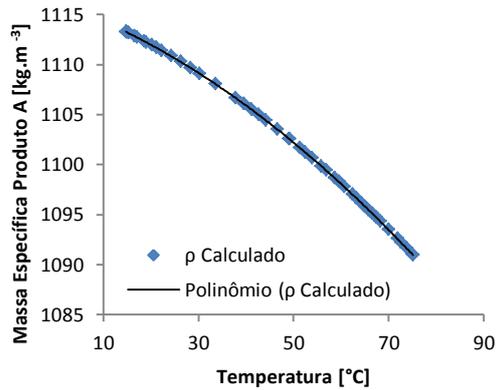
Fonte: Autoria própria.

Figura 12: Calor Específico em função da Temperatura para o Produto B.



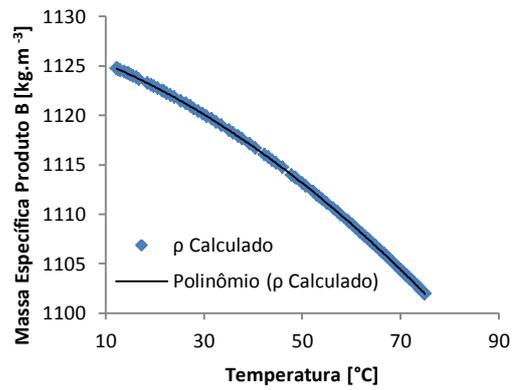
Fonte: Autoria própria.

Figura 13: Massa Específica em função da Temperatura para o Produto A.



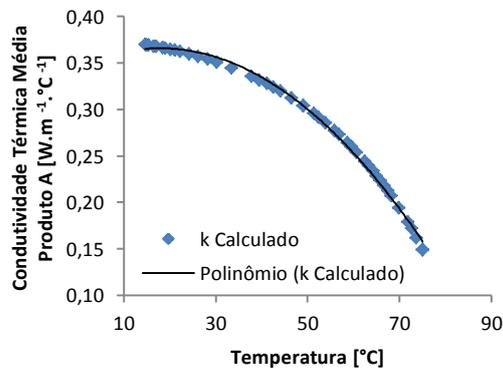
Fonte: Autoria própria.

Figura 14: Massa Específica em função da Temperatura para o Produto B.



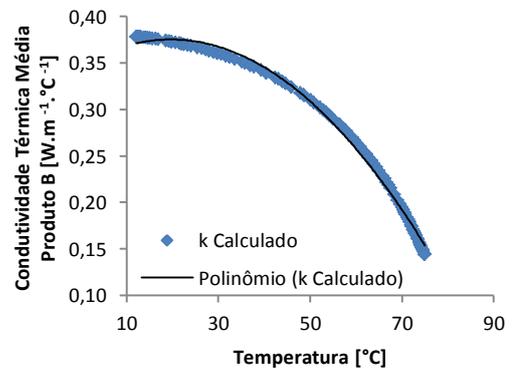
Fonte: Autoria própria.

Figura 15: Condutividade Térmica em função da Temperatura para o Produto A.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16: Condutividade Térmica em função da Temperatura para o Produto B.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 6: Modelo Obtido para as Propriedades dos Produtos usando as Equações da Tabela 3.

Propriedade	Modelo	R ²
c_p [J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹]	$c_{p,A}(T) = -0,0029T^2 + 0,4029T + 3336,7$	1
	$c_{p,B}(T) = -0,0029T^2 + 0,3903T + 3361,3$	1
ρ [kg.m ⁻³]	$\rho_A(T) = -0,0022T^2 - 0,1698T + 1116,3$	1
	$\rho_B(T) = -0,0023T^2 - 0,1668T + 1127,1$	1
k [W.m ⁻¹ .°C ⁻¹]	$k_A(T) = -6 \times 10^{-5}T^2 + 0,0023T + 0,3456$	0,9968
	$k_B(T) = -7 \times 10^{-5}T^2 + 0,0028T + 0,3474$	0,9954

Fonte: Autoria própria.

De acordo com o anexo II da Instrução Normativa nº 4 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento de 31 de março de 2000 (BRASIL, 2000), o padrão de identidade e qualidade de mortadelas, prevê no mínimo 12% de proteínas, no máximo 30% de gorduras, carboidratos totais de 1 a 10%, amido de 1 a 5%, sendo que a somatória de amido e carboidratos não deve ultrapassar a 10% e no máximo 65% de umidade. Desta forma observa-se na Tabela 5 que ambos os produtos estão de acordo com as características físico-químicas estabelecidas pela legislação brasileira. O percentual de carboidratos apresentado na Tabela 5 já é composto pela somatória com o amido. Sais e outros aditivos não foram avaliados por possuírem percentual muito baixo e desta forma não apresentarem influência nas propriedades termofísicas avaliadas neste trabalho.

Observa-se na Figura 11 que os resultados obtidos para o calor específico variaram entre 3341,9617 J.kg⁻¹.°C⁻¹ a 3350,3586 J.kg⁻¹.°C⁻¹, enquanto que para o produto B, conforme Figura 12, variaram entre 3365,7576 J.kg⁻¹.°C⁻¹ a 3374,0730 J.kg⁻¹.°C⁻¹. Esta variação ocorre de forma quadrática com a temperatura, sendo que o aumento da temperatura resultou no aumento do calor específico de ambos os produtos na faixa estudada, de 12°C a 76°C. Esta faixa foi escolhida por abranger tanto as temperaturas dos produtos no cozimento quanto no resfriamento. Observa-se também que a faixa de calor específico do produto B foi levemente maior que a do produto A, o que pode ser consequência da composição dos produtos. Observa-se na Tabela 5 que o produto A possui uma quantidade menor de proteína e maior de gordura do que o produto B. Conforme equações apresentadas na Tabela 3, o calor específico das proteínas é maior que o calor específico das gorduras.

Para a massa específica, observa-se na Figura 13, que para o produto A, a faixa obtida foi de 1090,9627 kg.m⁻³ a 1113,2763 kg.m⁻³, enquanto que para o produto B, conforme Figura 14, a faixa obtida foi de 1101,9486 kg.m⁻³ a 1124,6851 kg.m⁻³. A variação ocorreu de forma quadrática decrescente para ambos os produtos, na faixa de temperatura estudada. O aumento da temperatura resulta na dilatação do produto, com o aumento do volume a massa específica

diminui.

A massa específica do produto A apresentou-se menor do que a do produto B para a mesma faixa de temperatura. Isso pode ser justificado pelo fato do produto A possuir uma quantidade de gordura maior que o produto B. O volume ocupado pela gordura, na forma de toucinho no produto é relativamente alto para uma massa relativamente baixa, o que faz com que a massa específica seja menor quanto maior a quantidade de toucinho.

Observa-se também que a faixa da condutividade térmica do produto A varia entre $0,1486 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ e $0,3697 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, conforme Figura 15, enquanto que para o produto B a variação foi de $0,1437 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ a $0,3784 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, conforme Figura 16. A condutividade térmica para ambos os produtos apresentou redução quadrática na faixa estudada com o aumento da temperatura, sendo que o produto B apresentou valores levemente maiores do que o produto A, conforme observa-se nas concavidade das curvas. Este comportamento pode ser justificado pela fusão dos cubos de toucinho presente em ambos os produtos, sendo que na forma sólida a condução de calor é maior do que na forma fluida devido a maior proximidade das moléculas.

Na Tabela 6 observa-se que os modelos obtidos para as três propriedades apresentaram coeficientes de determinação elevados, o que indica que os ajustes se mostraram adequados em função da temperatura.

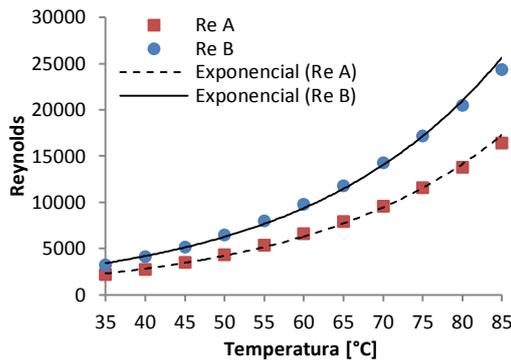
A partir destes resultados, utilizando a Equação 13 obteve-se a difusividade térmica dos produtos A e B para a faixa de temperatura estudada. Para o produto A, a difusividade térmica variou entre $4,0646 \times 10^{-8} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ e $9,9366 \times 10^{-8} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, enquanto para o produto B, a variação obtida foi de $3,8650 \times 10^{-8} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ e $9,9951 \times 10^{-8} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$.

A discussão destes resultados será abordada juntamente com os resultados da modelagem, apresentada no item 4.4.

4.3. Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor

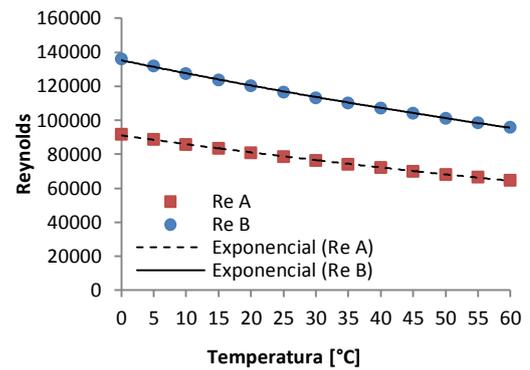
A Figura 17 apresenta os resultados obtidos para o número de Reynolds em função da temperatura no cozimento e a Figura 18 no resfriamento. A Figura 19 apresenta os resultados para o número Prandtl no cozimento e a Figura 20 no resfriamento em função da temperatura. A Figura 21 apresenta os resultados para o coeficiente convectivo de transferência de calor dos produtos A e B em função da temperatura para o processo de cozimento e a Figura 22 para o resfriamento. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para a velocidade do fluido durante o processo de cozimento e resfriamento. A Tabela 8 apresenta os modelos obtidos para os ajustes destas figuras.

Figura 17: Número de Reynolds em função da Temperatura no Cozimento.



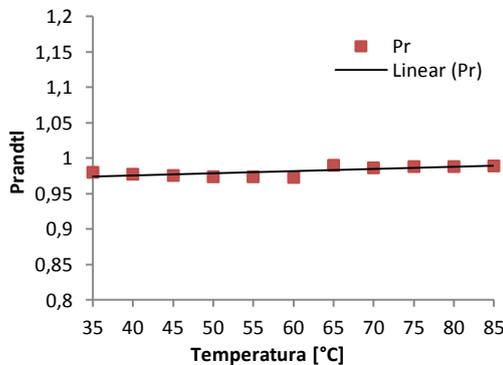
Fonte: Autoria própria.

Figura 18: Número de Reynolds em função da Temperatura no Resfriamento.



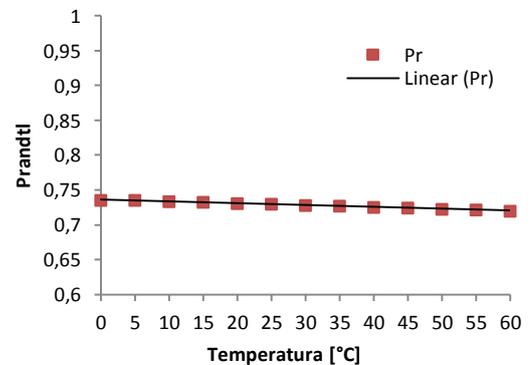
Fonte: Autoria própria.

Figura 19: Número de Prandtl em função da Temperatura no Cozimento.



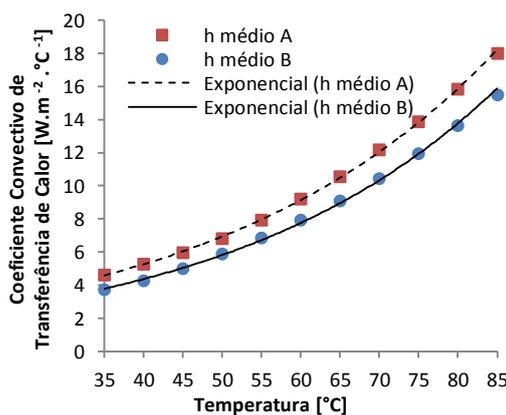
Fonte: Autoria própria.

Figura 20: Número de Prandtl em função da Temperatura no Resfriamento.



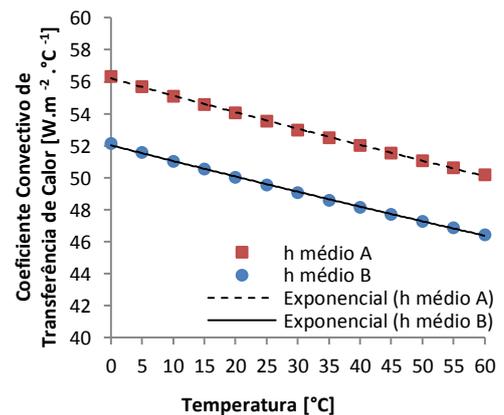
Fonte: Autoria própria.

Figura 21: Coeficiente Convectivo em função da Temperatura no Cozimento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 22: Coeficiente Convectivo em função da Temperatura no Resfriamento.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura 17 e na Figura 18 que os resultados para o número de Reynolds para o produto B foram maiores que para o produto A. Este resultado é consequência da dependência deste número com a geometria do produto, e o produto B possui maior diâmetro que o produto A. A variação ocorreu de forma exponencial crescente para o cozimento e

decrecente para o resfriamento, nas faixas estudadas. Este resultado pode ser explicado pelo comportamento das propriedades dos fluidos em cada caso. Para baixas temperaturas a viscosidade e a massa específica do fluido são maiores que para altas temperaturas.

Tabela 7: Velocidade Experimental do Fluido nos Processos de Cozimento e Resfriamento.

Pontos	Velocidade Cozimento [m.s ⁻¹]	Velocidade Resfriamento [m.s ⁻¹]
Superior	5,72 ± 0,21	13,63 ± 0,32
Centro	5,12 ± 0,17	10,87 ± 0,19
Inferior	5,36 ± 0,15	11,91 ± 0,25
Média	5,40 ± 0,18	12,14 ± 0,25

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8: Modelo Obtido para os Números de Reynolds e para o Coeficiente Convectivo.

Propriedade	Modelo	R ²
<i>Re</i>	$Re_{A,Coz}(T) = 561,02e^{0,0403T}$	0,9970
	$Re_{B,Coz}(T) = 833,2e^{0,0403T}$	0,9970
	$Re_{A,Res}(T) = 91054e^{-0,006T}$	0,9991
	$Re_{B,Res}(T) = 135229e^{-0,006T}$	0,9991
<i>h</i> [W.m ⁻² .°C ⁻¹]	$h_{A,Coz}(t) = 1,7462e^{0,0276T}$	0,9996
	$h_{B,Coz}(T) = 1,3853e^{0,0287T}$	0,9988
	$h_{A,Res}(t) = 56,207e^{-0,002T}$	0,9992
	$h_{B,Res}(t) = 52,035e^{-0,002T}$	0,9992

Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Tabela 7 que as velocidades do vapor de água no processo de cozimento foram menores que as velocidades do ar no processo de resfriamento. O processo de cozimento foi realizado com função de velocidade lenta e o resfriamento com função de velocidade rápida na configuração dos motores de ventilação. Tal cuidado se faz necessário devido às elevadas temperaturas no processo de cozimento e sua importância nas características sensoriais do produto, principalmente no que confere a textura do produto. Este comportamento influenciou no regime de escoamento, conforme observa-se na Figura 17 para o cozimento, o regime foi laminar para ambos os produtos no decorrer de todo o processo, enquanto na Figura 18 para o resfriamento, observa-se que o escoamento foi turbulento ($Re > 5 \times 10^5$). Porém a variação das faixas do uso das constantes *c* e *m* ocorreu para ambos os produtos, dentro de um mesmo regime de escoamento.

A amplitude dos valores de Reynolds no resfriamento apresentou valores maiores que no cozimento. Tal comportamento deve-se principalmente pelas diferenças nas velocidades do

fluido no cozimento e resfriamento. As variações das propriedades do fluido também contribuem com este comportamento. Os valores obtidos para o coeficiente de determinação foram elevados, o que indica que os ajustes se mostraram adequados em função da temperatura.

É possível observar na Figura 19 e na Figura 20 que o número de Prandtl pode ser considerado constante nas faixas estudadas. Este comportamento se deve ao fato de ambos os fluidos serem gasosos. Para o processo de cozimento o valor médio encontrado foi 0,9816 e para o processo de resfriamento, 0,7323.

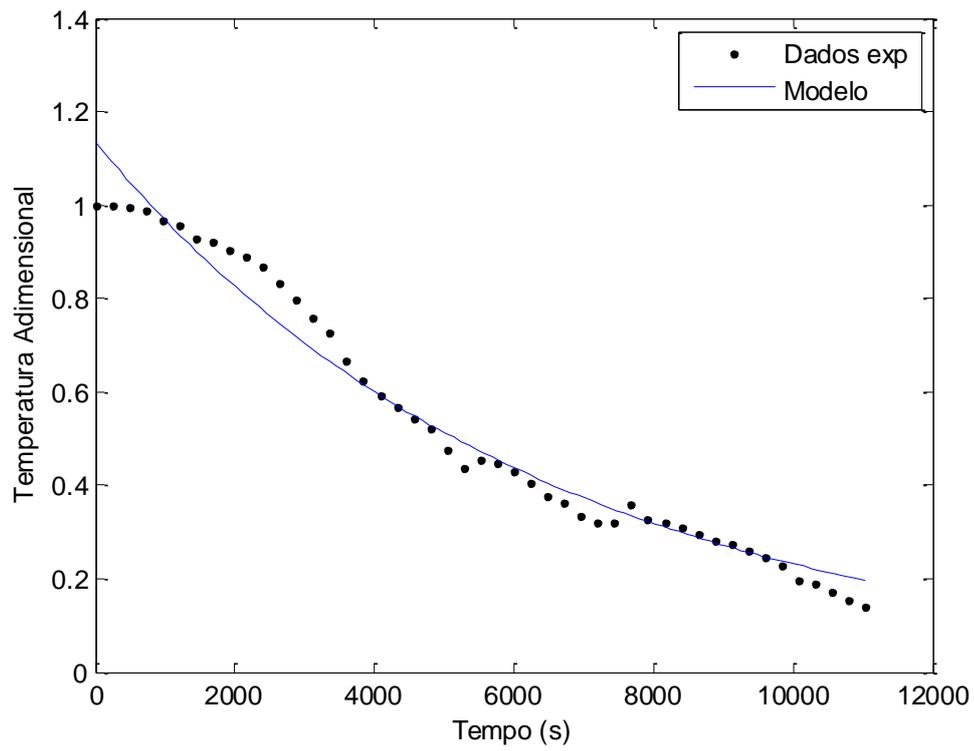
Pela Figura 21 e Figura 22, observa-se que o coeficiente convectivo de transferência de calor para o produto A foi maior que para o produto B, tanto no processo de cozimento quanto no resfriamento. Este comportamento também é consequência do diâmetro do produto A ser menor que do produto B. O comportamento do coeficiente convectivo em função da temperatura para ambos os produtos pode ser representado por uma função exponencial, crescente no cozimento e decrescente no resfriamento, com elevados coeficientes de determinação nas faixas de temperatura estudadas. Para o processo de cozimento a faixa do coeficiente de transferência de calor do produto A varia entre $4,6200 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ e $18,0099 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$, enquanto que para o produto B a variação foi de $3,7404 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ a $15,4844 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$. Já para o processo de resfriamento, a faixa do coeficiente de transferência de calor para o produto A varia entre $50,1760 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ e $56,3233 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$, enquanto que para o produto B a variação foi de $46,4516 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ a $52,1426 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$. Para o processo de resfriamento a faixa de valores foi maior do que no cozimento, conforme já comentado, principalmente devido a maior velocidade do fluido, e com menor influência, devido às variações das propriedades dos fluidos.

A discussão destes resultados será abordada juntamente com os resultados da modelagem, apresentada no item 4.4.

4.4. Modelagem Matemática dos Processos

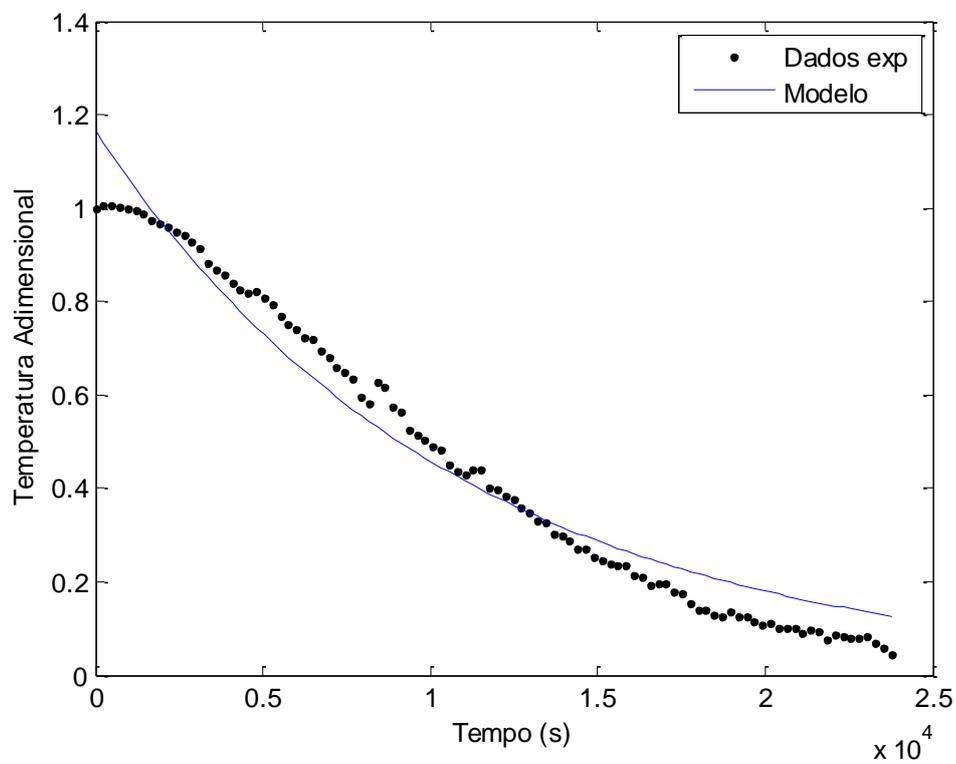
A Figura 23 apresenta os resultados obtidos através da modelagem matemática para a temperatura adimensional no cozimento do produto A e a Figura 24 para o produto B. A Figura 25 apresenta os resultados obtidos para a temperatura adimensional no resfriamento do produto A e a Figura 26 para o produto B. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros através da regressão não linear por meio da modelagem matemática.

Figura 23: Resultados para a Temperatura Adimensional no Cozimento do Produto A.



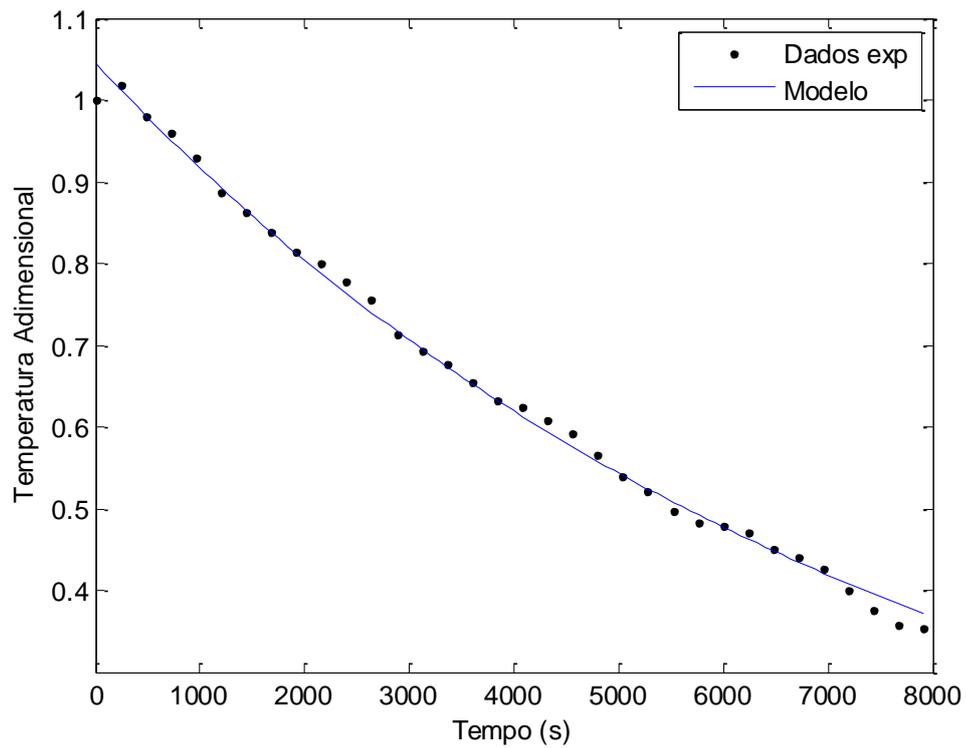
Fonte: Autoria própria.

Figura 24: Resultados para a Temperatura Adimensional no Cozimento do Produto B.



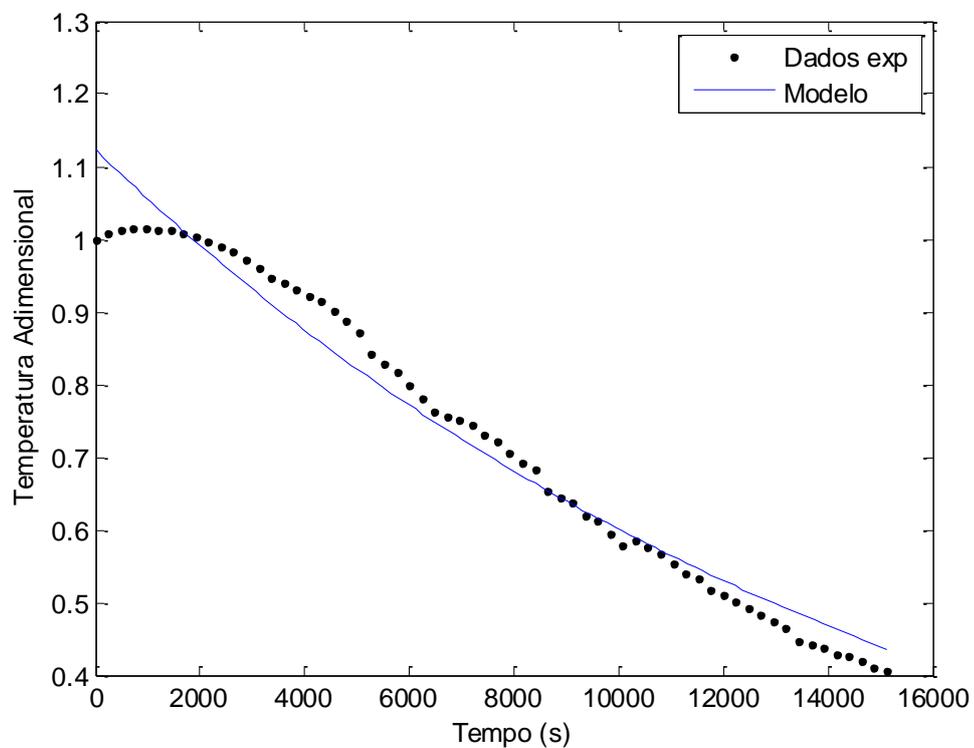
Fonte: Autoria própria.

Figura 25: Resultados para a Temperatura Adimensional no Resfriamento do Produto A.



Fonte: Autoria própria.

Figura 26: Resultados para a Temperatura Adimensional no Resfriamento do Produto B.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 9: Resultados do Ajuste para os Parâmetros Obtidos pela Modelagem Matemática.

Processo	Parâmetro					
	h [W.m ⁻² .°C ⁻¹]	k [W.m ⁻¹ .°C ⁻¹]	ρ [kg.m ⁻³]	c_p [J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹]	λ	R^2
Cozimento Produto A	18,4513	0,3783	1063,5	2028,0	1,5194	0,9733
Cozimento Produto B	16,3014	0,3805	1020,7	1701,1	1,5486	0,9653
Resfriamento Produto A	44,4900	0,3249	1060,8	2780,4	1,7382	0,9961
Resfriamento Produto B	31,3094	0,3028	1019,2	2389,9	1,6823	0,9692

Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Tabela 9, que para todos os ajustes o coeficiente de determinação R^2 , apresenta valores acima de 0,96, o que indica que o modelo estudado é adequado para representar o comportamento experimental dos processos de cozimento e resfriamento dos produtos A e B em estufa. Em relação às propriedades termofísicas dos produtos, observa-se que o calor específico médio, para ambos os produtos, apresenta-se abaixo da faixa de variação esperada apresentada na Figura 11 para o produto A e na Figura 12 para o produto B, tanto para o processo de cozimento quanto de resfriamento. A massa específica média obtida através da modelagem também encontra-se abaixo da faixa esperada mostrada na Figura 13 para o produto A e na Figura 14 para o produto B, porém mais próxima da faixa esperada do que o calor específico. A condutividade térmica média apresentada na Tabela 9 apresenta-se dentro ou muito próximo da faixa de variação esperada, conforme Figura 15 para o produto A e Figura 16 para o produto B, para os dois processos, cozimento e resfriamento.

Em relação ao calor específico obtido pela modelagem, observa-se que para o processo de resfriamento, para ambos os produtos, os valores são maiores que para o processo de cozimento, conforme o comportamento esperado pela Figura 11 e pela Figura 12, que apresentam um aumento no calor específico com o aumento da temperatura. A temperatura média dos produtos no resfriamento (54,8°C para A e 54,0°C para B) é maior que no processo de cozimento (45,6°C para A e 47,1°C para B). Porém, observa-se que para os dois processos, os valores obtidos na modelagem para o produto A foram maiores que para o produto B, enquanto que o comportamento esperado pela Figura 11 e pela Figura 12, é o inverso. Este comportamento pode ser consequência de que o modelo do produto A se ajustou melhor aos dados experimentais do que o do produto B, conforme observam-se nos coeficientes de determinação. Além disso, a faixa esperada é levemente maior para B do que para A.

Em relação à massa específica obtida pela modelagem, observa-se que para o processo de cozimento, para ambos os produtos, os valores são maiores que para o processo de

resfriamento, conforme o comportamento esperado pela Figura 13 pela Figura 14, que apresentam uma redução na massa específica com o aumento da temperatura. Assim como para o calor específico, observa-se que para os dois processos, os valores obtidos na modelagem para o produto A foram maiores que para o produto B, enquanto que o comportamento esperado pela Figura 13 pela Figura 14, é o inverso, o que também pode ser explicado pelo ajuste dos modelos. O fato de a variação da massa específica ter sido menor que a variação do calor específico pode ser justificada pela ordem de grandeza dos resultados obtidos, quanto maior o valor, maior a variação.

Em relação à condutividade térmica obtida pela modelagem, observa-se que para o processo de cozimento, para ambos os produtos, os valores são maiores que para o processo de resfriamento, conforme o comportamento esperado pela Figura 15 e pela Figura 16, que apresentam uma redução na condutividade térmica com o aumento da temperatura. Para os valores de condutividade térmica as faixas de variação são muito próximas para os dois produtos, e como são valores baixos, estão de acordo com o esperado.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 9 e da Equação 13, obteve-se a difusividade térmica para os produtos A e B nos processos de cozimento e resfriamento. Para o processo de cozimento, a difusividade térmica do produto A foi de $1,7540 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e do produto B foi de $2,1914 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Para o processo de resfriamento, a difusividade do produto A foi de $1,1016 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e do produto B foi de $1,2432 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Observa-se através destes resultados que os mesmos encontram-se acima dos resultados encontrados a partir das Equações da Tabela 3, apresentados no item 4.2. Este comportamento é consequência dos valores de calor específico e massa específica terem se encontrado abaixo das faixas esperadas pelas correlações de Choi e Okos (1986) e Murakami e Okos (1989), conforme já discutido.

Silva (2011) obteve valores para a condutividade térmica de linguiça calabresa em torno de $0,42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$. Oliveira et al. (2003) obtiveram dados experimentais para a difusividade térmica do presunto cozido entre $0,998 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $1,458 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e de pernil suíno entre $1,149 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a $1,298 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, ambas apresentando tendência de crescimento linear com o aumento da umidade do produto, na faixa de 3°C a 70°C .

Pereira et al. (2014) , obtiveram experimentalmente as propriedades termofísicas de um *mix* de pele e gordura de frango de composição conhecida. A difusividade térmica variou entre $9,80 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $1,08 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ na faixa de temperatura de 25°C a 75°C . A condutividade térmica variou entre $0,27 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ e $0,39 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ na faixa de temperatura de 5°C a 80°C . A massa específica variou de $930 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a $1050 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ para a faixa de temperatura de 5°C a 70°C . Estes autores observaram que todas as propriedades foram

afetadas pela variação da composição, apresentando valores mais altos com o aumento do conteúdo de umidade do produto.

Siripon et al. (2007) modelaram o processo de cozimento de frango em água a 85°C, 90°C e 95°C. Os resultados mostraram que o calor específico variou entre 3521 J.kg⁻¹.°C⁻¹ e 3654 J.kg⁻¹.°C⁻¹, a condutividade térmica variou entre 0,5093 W.m⁻¹.°C⁻¹ e 0,4930 W.m⁻¹.°C⁻¹, e a massa específica variou entre 1038 kg.m⁻³ e 1026 kg.m⁻³, respectivamente, entre 25°C e 95°C. Estes autores também compararam seus resultados com os obtidos pelas correlações de Choi e Okos (1986).

Carciofi et al. (2002) modelaram o cozimento da mortadela utilizando o método de diferenças finitas explícito e observaram valores de difusividade térmica entre 1x10⁻⁷ m².s⁻¹ e 2x10⁻⁷ m².s⁻¹, entre 20 e 80°C. Enquanto Dincer (1996), modelou a fritura de salsicha em óleo a 180°C e obteve difusividade térmica de 3,846x10⁻⁷ m².s⁻¹.

Rinaldi et al. (2011) simularam o processo de cozimento de mortadela bolonha com temperatura do fluido entre 80°C e 100°C e obtiveram valores para a difusividade térmica entre 1,38x10⁻⁷ m².s⁻¹ a 1,45 x10⁻⁷ m².s⁻¹. Para obtenção desta difusividade, os autores se basearam no modelo obtido por Rinaldi et al. (2010) para o processamento térmico de lombo de porco.

Marcotte et al. (2008) obtiveram valores para a condutividade térmica entre 0,332 W.m⁻¹.°C⁻¹ e 0,482 W.m⁻¹.°C⁻¹ nas temperaturas de 22°C e 79°C para a carne de peru. Já para emulsões cárneas de produtos processados, tais como mortadela bolonhesa, linguiça italiana, presunto e salsicha defumada, estes autores obtiveram massa específica entre 970 kg.m⁻³ a 1070 kg.m⁻³, calor específico de 2850 J.kg⁻¹.°C⁻¹ a 3380 J.kg⁻¹.°C⁻¹, condutividade térmica entre 0,28 W.m⁻¹.°C⁻¹ a 0,48 W.m⁻¹.°C⁻¹, difusividade térmica entre 0,96 x10⁻⁷ m².s⁻¹ a 1,46x10⁻⁷ m².s⁻¹ nas faixas de 20°C a 80°C. Além disso, estes autores observaram uma redução acentuada nos valores da massa específica de produtos cárneos a partir de 60°C e justificaram que tal comportamento pode ter sido ocasionado pela geleificação das proteínas da carne que resultam no aumento do volume da amostra. Em relação à condutividade térmica, estes autores observaram um aumento de *k* com o aumento da temperatura até 60°C, de 60°C a 80°C, os valores apresentaram-se constantes, exceto para a mortadela bolonhesa.

Comparando os resultados obtidos neste trabalho para as propriedades termofísicas através do ajuste do modelo matemático aos dados experimentais com os resultados obtidos por outros autores experimentalmente e por correlações apresentadas na literatura, observa-se que para as propriedades dos produtos, tanto os valores quanto o seu comportamento em função da temperatura, composição e geometria estão condizentes. Se tratando de produtos com diferentes características e composição, as pequenas diferenças encontradas são

aceitáveis. Os desvios encontrados para o produto B em comparação com a literatura foram um pouco maiores, principalmente em relação ao calor específico, podem ser justificados pelo ajuste do modelo ter apresentado coeficiente de determinação um pouco menor do que o produto A.

Em relação ao comportamento da condutividade térmica, o fato de Marcotte et al. (2008) ter encontrado um comportamento crescente com a temperatura enquanto o comportamento obtido neste trabalho foi decrescente, pode ser justificado pelo modelo escolhido para o cálculo da condutividade. No modelo em paralelo, a condutividade tende a aumentar com o aumento da temperatura, enquanto que no modelo em série, a condutividade tende a diminuir com o aumento da temperatura. Como neste trabalho, usou-se a média aritmética dos dois modelos, o modelo resultante acaba apresentando redução, em consequência da junção de dois comportamentos diferentes. Segundo Neckel e Mariani (2010), o modelo em série tende a superestimar o valor da condutividade térmica, enquanto que o modelo em paralelo tende a subestimar, por isso optou-se por utilizar a média aritmética. Mesmo com esta divergência, os valores obtidos estão bem próximos.

Em relação ao coeficiente convectivo de transferência de calor observa-se que os resultados obtidos na Tabela 9 estão muito próximos da faixa de variação esperada pela Figura 21 para o cozimento e abaixo da faixa de variação esperada pela Figura 22 para o resfriamento, para ambos os produtos. Os resultados obtidos por meio dessas figuras levam em consideração o escoamento do fluido em torno de um cilindro, no entanto, nas condições reais estudadas, para o produto A, a composição de um carro é de 224 peças e do produto B é de 110 peças, conforme dados apresentados na Tabela 2 que podem ser visualizados na Figura 2 e na Figura 3, igualmente espaçadas dentro do carro com 1,03 m de largura e profundidade por 1,88 m de altura.

Para o produto A, isso corresponde a 4 cm de distância das peças entre os níveis verticais, sendo que o nível mais baixo, encontra-se 20 cm acima da base do carro, enquanto que em relação ao distanciamento horizontal, o espaçamento entre as peças é de 3,17 cm tanto em largura quanto em profundidade. Para o produto B, isso corresponde a 3 cm de distância entre os níveis verticais, sendo que o nível mais baixo encontra-se a 19 cm acima da base do carro, enquanto que na horizontal, para as camadas com 5 varas, o espaçamento é de 7 cm entre as peças em relação a largura e profundidade, já para as camadas com 6 varas, o distanciamento é de 7 cm em relação a largura e 2,6 cm em relação a profundidade.

Esta conformação pode afetar a formação da camada limite em torno das peças, bem como a perda de carga no escoamento nesta região, podendo ter influencia nos resultados obtidos, pois neste caso, para altas velocidades de escoamento espera-se que o valor do

coeficiente convectivo seja consideravelmente menor do que para um único cilindro, o que explica o comportamento obtido para os processos de resfriamento, cujo regime de escoamento foi turbulento. Para o cozimento, como o regime de escoamento foi laminar, em consequência da baixa velocidade, a perda de carga tende a ser baixa, tendo pouco impacto sobre o coeficiente convectivo, quando comparada com a perda em regime turbulento.

Segundo Incropera et al. (2008), os resultados para o número adimensional de Nusselt, e conseqüentemente para o coeficiente convectivo, em um escoamento externo cruzado sobre um cilindro são fortemente influenciados pela natureza do desenvolvimento da camada limite sobre a superfície. Para regime laminar, Nu_D diminui com o aumento do ângulo até um valor mínimo no qual ocorre a separação (aproximadamente 80°), ou seja, o gradiente de velocidade ao longo da camada é nulo, a partir deste ponto ele torna a aumentar. Já para regime turbulento a separação é retardada, Nu_D diminui com o aumento do ângulo até um valor mínimo semelhante ao regime laminar, a partir deste ponto ele torna a aumentar até um o ponto angular onde ocorre a transição (aproximadamente 140°), a partir deste ponto é que ocorre a separação, e então ele diminuir novamente. Tal comportamento resulta no aumento de Nu_D com o aumento de Re_D devido à redução da espessura da camada limite laminar, associadas à formação de vórtices nestas regiões, o que influencia na força de arrasto. Até o ponto de separação os gradientes de pressão favoráveis diminuem lentamente, e a partir do ponto de separação, os gradientes de pressão adversos passam a ser consideráveis e aumentam lentamente.

Em seu estudo Bugiereck et al. (2014) realizaram a simulação numérica do processo de cozimento de linguiça calabresa para diversos valores de coeficiente convectivo compreendidos entre $0,008 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ e $10 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$. Os resultados mostraram que quanto maior o valor o valor de h , o perfil de temperatura simulado se afastou do real, enquanto que para baixos valores, o modelo se mostrou adequado aos dados experimentais. Tal simulação também permitiu observarem que o aumento gradual da temperatura do fluido teve maior influencia na variação do coeficiente convectivo quando este apresentou valores elevados. Por este motivo utilizaram um aumento gradual do coeficiente convectivo, em paralelo ao aumento da temperatura do fluido, permitindo um melhor ajuste aos dados experimentais.

A metodologia utilizada por Bugiereck et al. (2014) para estimar o valor de h , ajustando os dados encontrados numericamente aos dados obtidos experimentalmente, considerando sua variação com a temperatura, também foi utilizada por outros autores com diferentes produtos e processos, tais como Amendola et al., (2009), Pirozzi e Amendola (2005) e Pinho (2003).

Ryland et al. (2006) obtiveram experimentalmente valores para o coeficiente convectivo de transferência de calor durante o resfriamento de pernil suíno desossado com ar forçado de $5,1 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ e $9,73 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ para velocidade do ar de 1 m.s^{-1} com temperatura do ar média constante de $6,44\text{°C}$, utilizando dois métodos diferentes para a realização da medida.

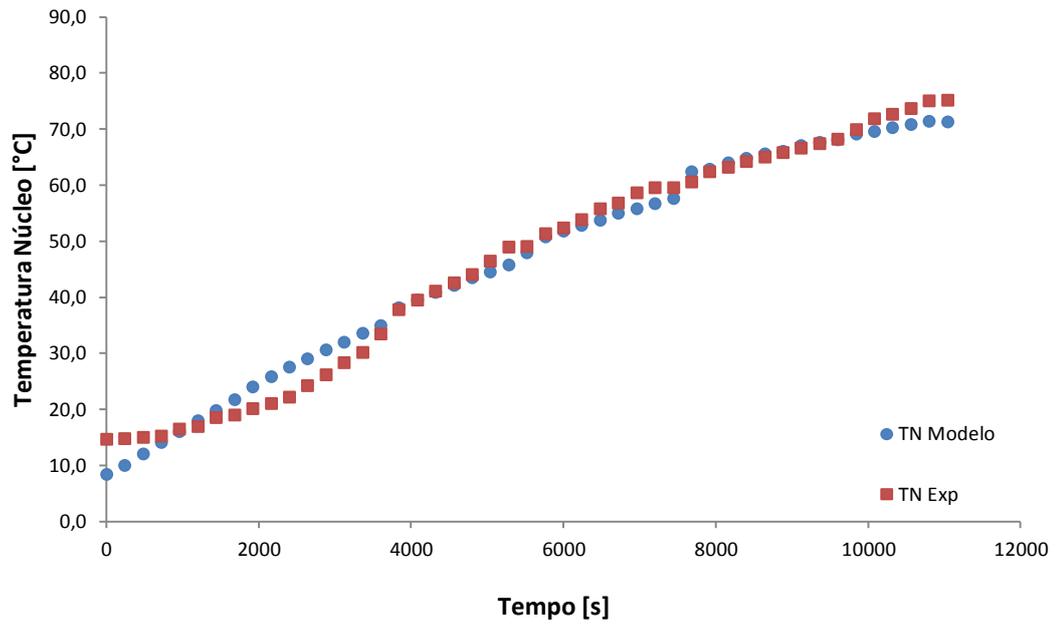
Carson et al. (2006) obtiveram valores para o coeficiente convectivo de transferência de calor variando entre $10 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ e $40 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$, enquanto Verboven et al. (2000) obtiveram valores variando entre $25 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ e $40 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ no aquecimento de produtos alimentícios em temperaturas próximas a 100°C .

Rinaldi et al. (2011) simularam o processo de cozimento de mortadela bolonha e obtiveram valores entre $13 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ e $44 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ para o coeficiente convectivo de transferência de calor em temperaturas constantes do fluido de 80°C e 90°C , sendo que o comportamento foi semelhante, porém com valores levemente maiores para 90°C . Já para 100°C , o coeficiente convectivo teve um aumento mais acentuado, ao longo do processo de cozimento, variando entre $24 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ e $50 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$.

Desta forma, observa-se que para o coeficiente convectivo de transferência de calor, o comportamento obtido nos resultados deste trabalho através do ajuste do modelo matemático aos dados experimentais também está de acordo com a literatura apresentada, para ambos os produtos, nos dois processos de transferência de calor.

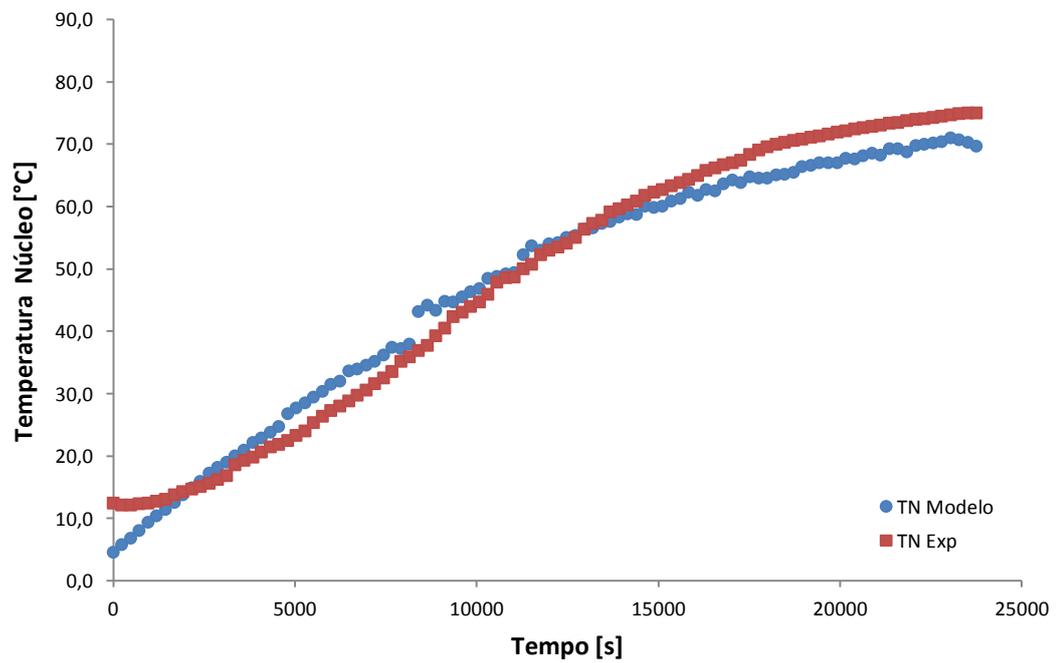
A Figura 27 apresenta os resultados obtidos da modelagem matemática para a temperatura no núcleo em função do tempo para o processo de cozimento do produto A e a Figura 28 do produto B. A Figura 29 apresenta os resultados obtidos da modelagem para a temperatura do núcleo em função do tempo para o resfriamento do produto A e a Figura 30 do produto B, utilizando os parâmetros encontrados no ajuste, conforme apresentado na Tabela 9.

Figura 27: Resultados da Modelagem para a Temperatura no Núcleo no Cozimento do Produto A.



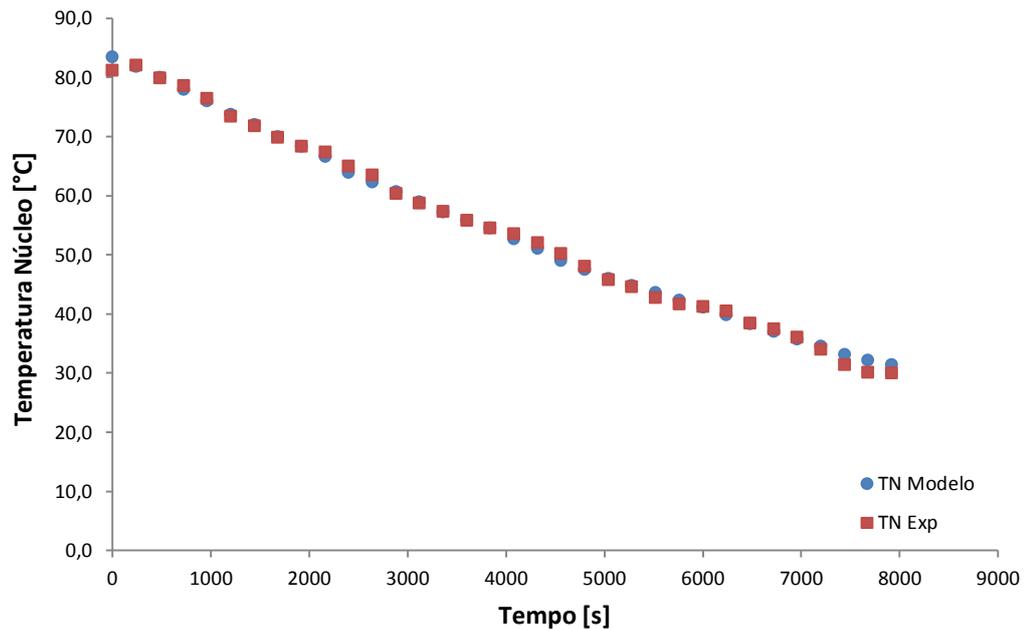
Fonte: Autoria própria.

Figura 28: Resultados da Modelagem para a Temperatura no Núcleo no Cozimento do Produto B.



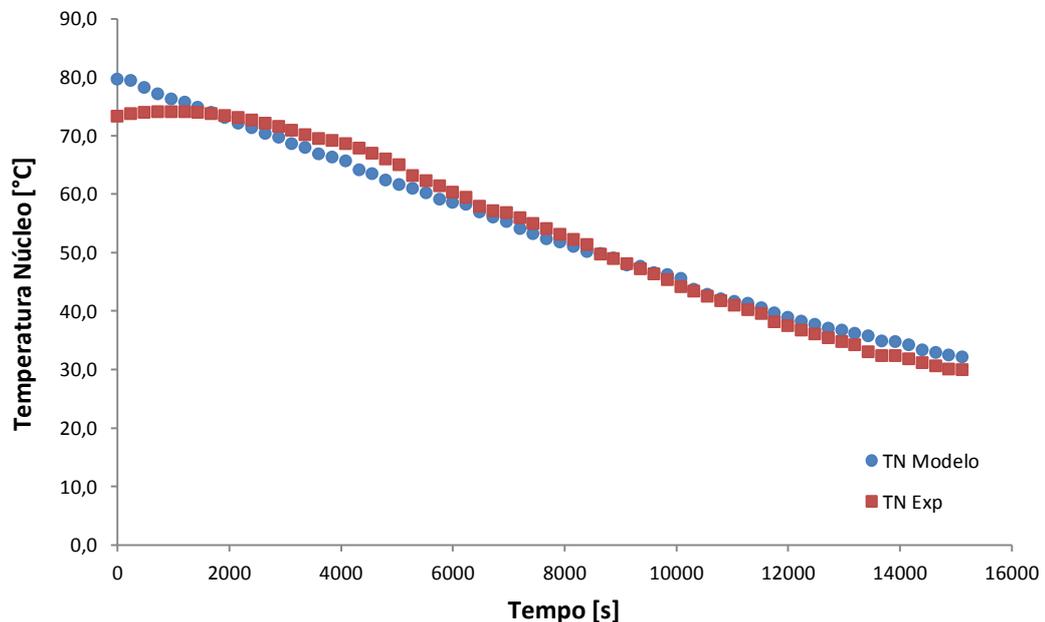
Fonte: Autoria própria.

Figura 29: Resultados da Modelagem para a Temperatura no Núcleo no Resfriamento do Produto A.



Fonte: Autoria própria.

Figura 30: Resultados da Modelagem para a Temperatura no Núcleo no Resfriamento do Produto B.



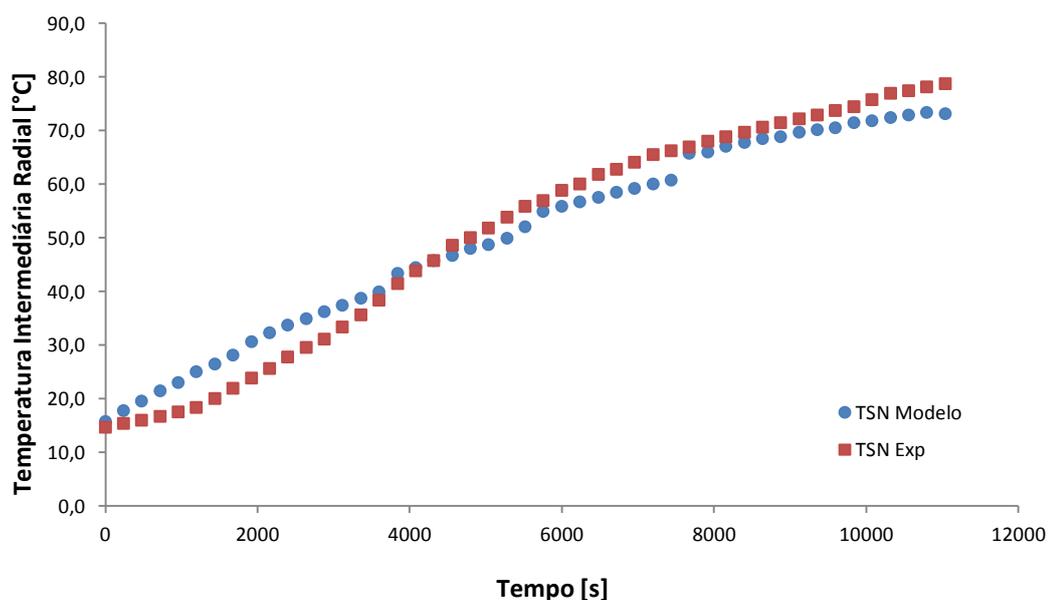
Fonte: Autoria própria.

Observa-se que as temperaturas previstas pela modelagem matemática para a temperatura de núcleo são muito próximas das temperaturas reais obtidas experimentalmente. Nos processos de cozimento, os desvios são levemente maiores, pois à medida que ocorre o cozimento, a textura do produto é alterada da forma de uma massa fluida para sólida, o que

pode acarretar em pequenos movimentos do sensor de temperatura. Para o processo de resfriamento, os desvios são menores, pois o produto já se encontra com sua textura definida. Comparando os produtos, é possível observar que para o produto B, conforme apresentado na Figura 28 para cozimento e na Figura 30 para resfriamento, os desvios foram levemente maiores que para o produto A, conforme Figura 27 para cozimento e Figura 29 para resfriamento, o que pode ser consequência do diâmetro do produto, pois quanto maior o diâmetro, maior pode ser o impacto da variação da textura no posicionamento do sensor de temperatura no centro do produto.

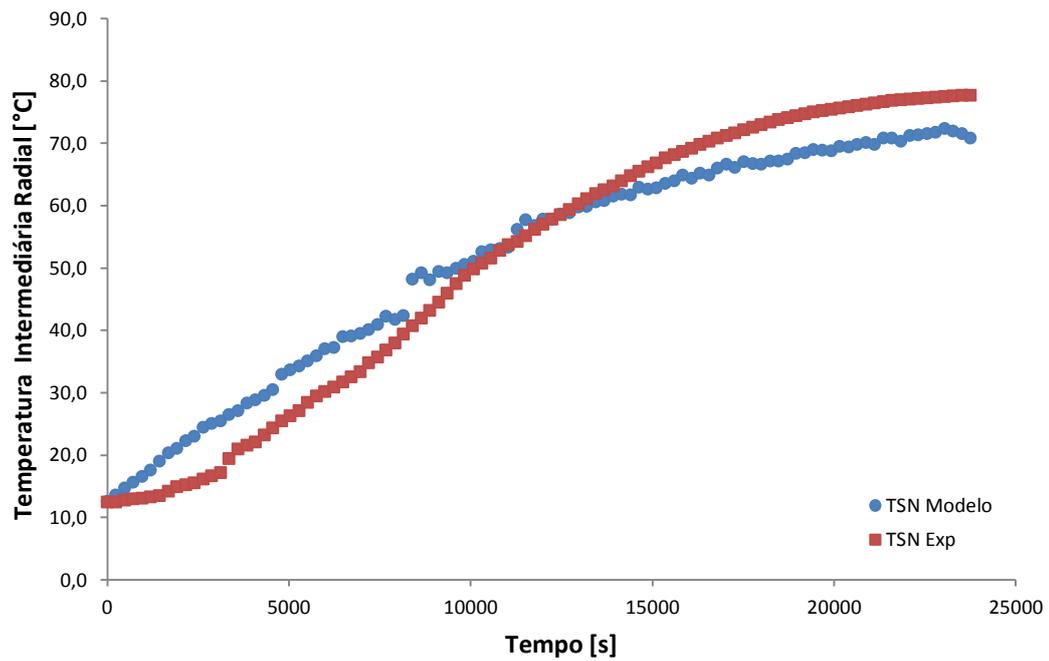
A Figura 31 apresenta os resultados obtidos da modelagem matemática para a temperatura intermediária radial em função do tempo para o processo de cozimento do produto A e a Figura 32 do produto B. A Figura 33 apresenta os resultados obtidos da modelagem para a temperatura intermediária radial em função do tempo para o resfriamento do produto A e a Figura 34 do produto B, utilizando os parâmetros encontrados no ajuste, conforme apresentado na Tabela 9. Já Figura 35 apresenta os resultados obtidos da modelagem matemática para a temperatura superficial em função do tempo para o processo de cozimento do produto A e a Figura 36 do produto B. A Figura 37 apresenta os resultados obtidos da modelagem para a temperatura superficial em função do tempo para o resfriamento do produto A e a Figura 38 do produto B, utilizando os parâmetros encontrados no ajuste, conforme apresentado na Tabela 9.

Figura 31: Resultados da Modelagem para a Temperatura Intermediária Radial no Cozimento do Produto A.



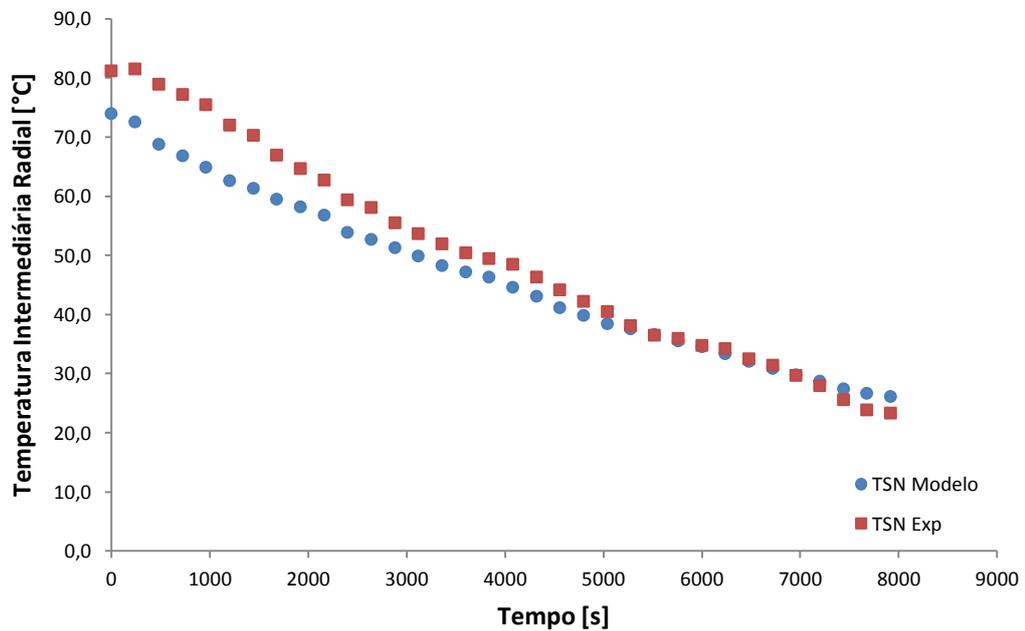
Fonte: Autoria própria.

Figura 32: Resultados da Modelagem para a Temperatura Intermediária Radial no Cozimento do Produto B.



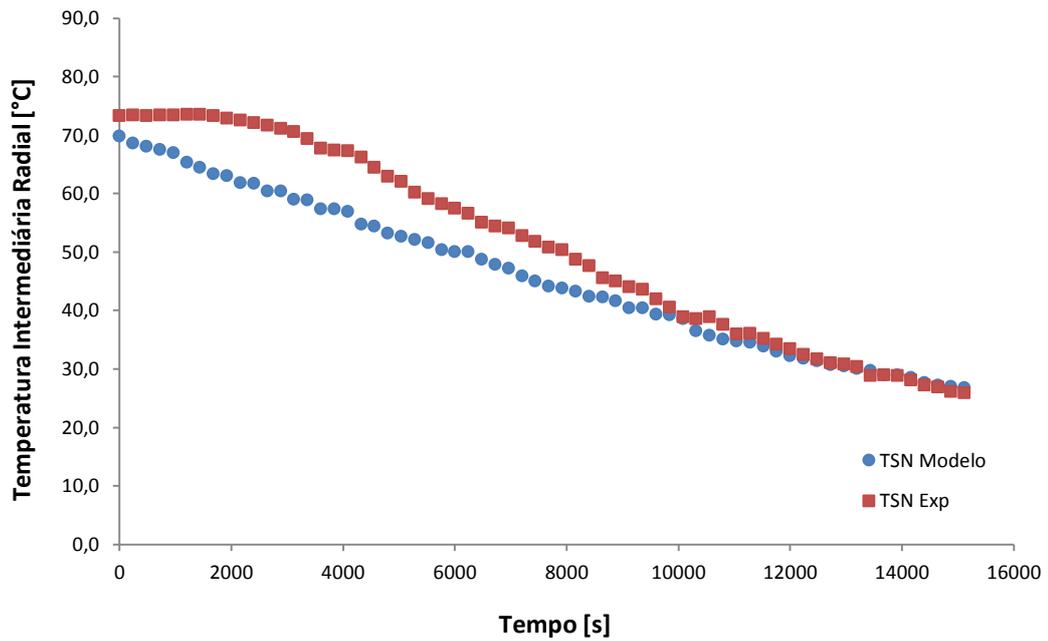
Fonte: Autoria própria.

Figura 33: Resultados da Modelagem para a Temperatura Intermediária Radial no Resfriamento do Produto A.



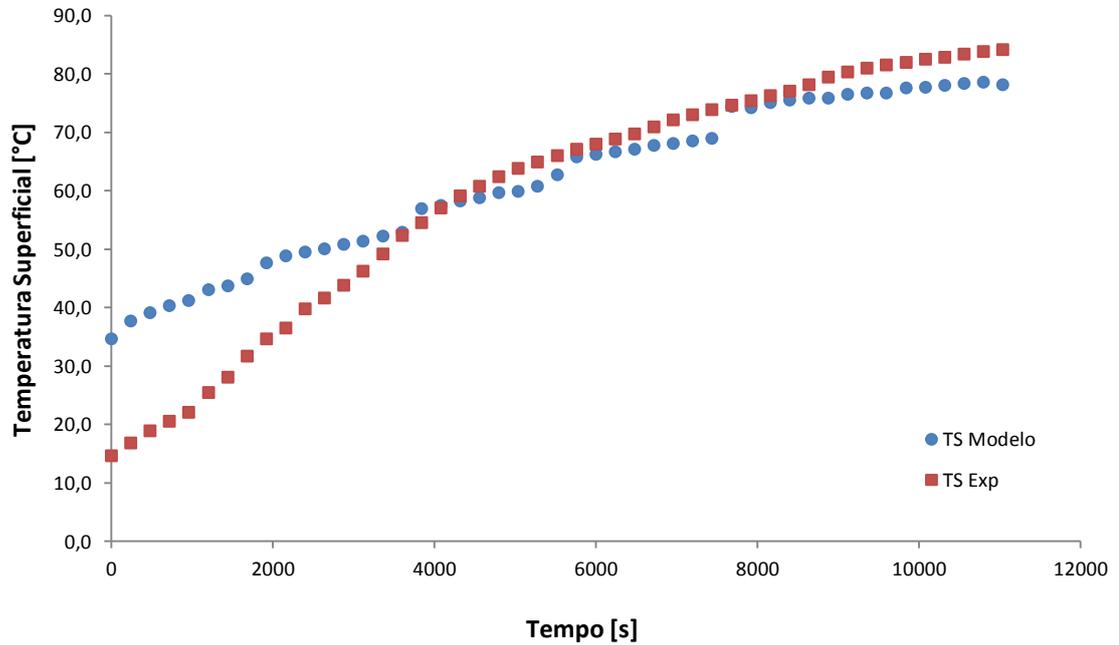
Fonte: Autoria própria.

Figura 34: Resultados da Modelagem para a Temperatura Intermediária Radial no Resfriamento do Produto B.



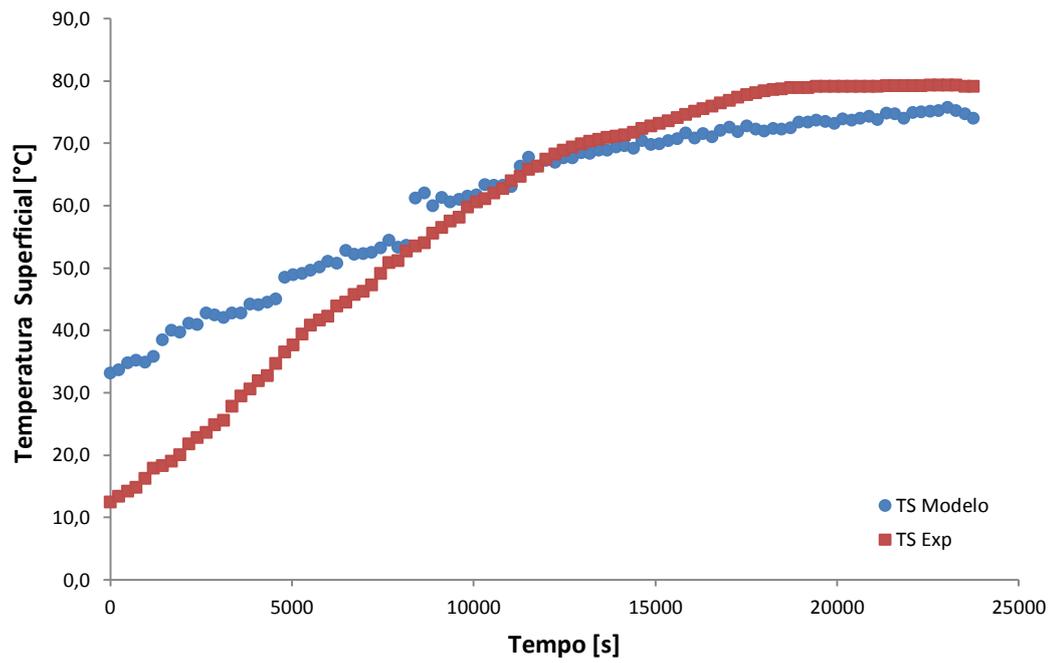
Fonte: Autoria própria.

Figura 35: Resultados da Modelagem para a Temperatura Superficial no Cozimento do Produto A.



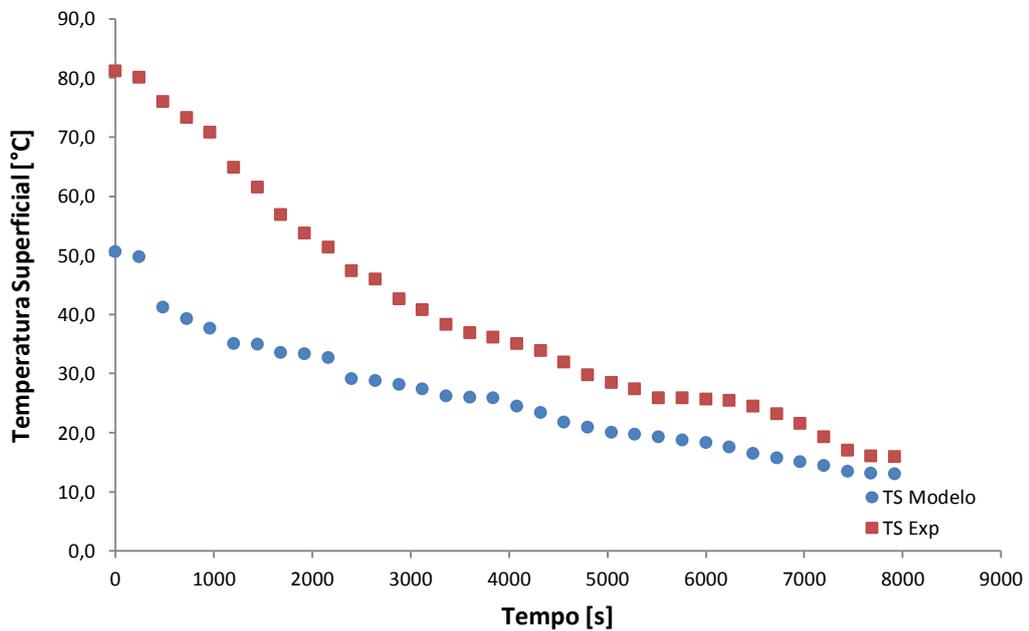
Fonte: Autoria própria.

Figura 36: Resultados da Modelagem para a Temperatura Superficial no Cozimento do Produto B.



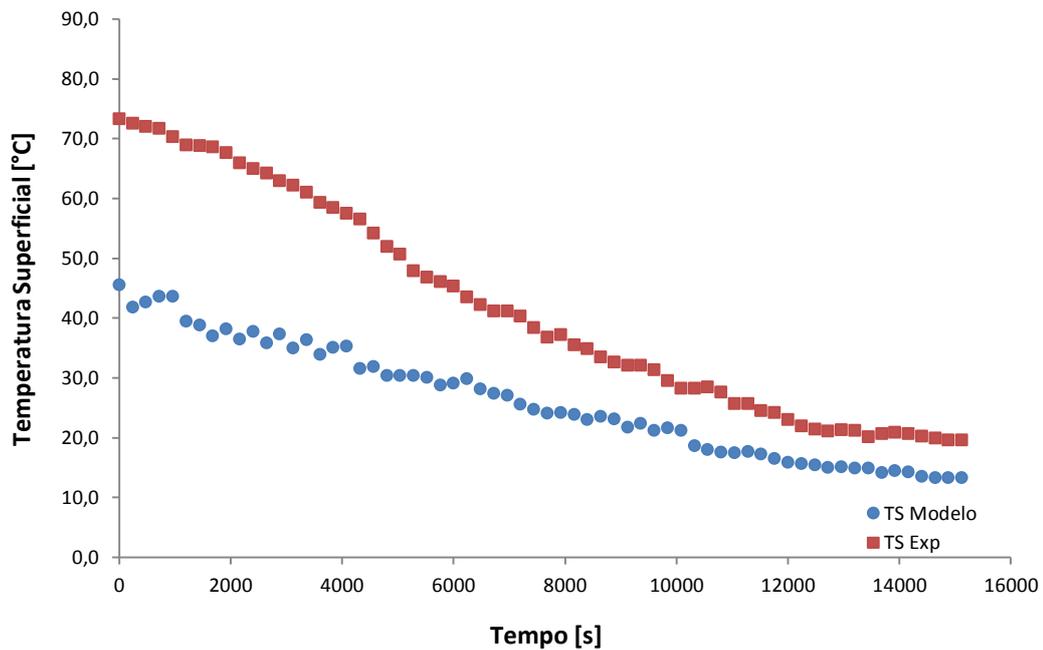
Fonte: Autoria própria.

Figura 37: Resultados da Modelagem para a Temperatura Superficial no Resfriamento do Produto A.



Fonte: Autoria própria.

Figura 38: Resultados da Modelagem para a Temperatura Superficial no Resfriamento do Produto B.



Fonte: Autoria própria.

Para as temperaturas superficial e intermediária radial os comportamentos obtidos através da modelagem são semelhantes aos encontrados para a temperatura do núcleo para os dois processos para ambos os produtos. No entanto os desvios aumentam conforme a temperatura se afasta do núcleo e se aproxima da superfície. Este comportamento pode ser resultado, conforme já comentado, pela dificuldade de manter o sensor de temperatura no mesmo local durante a evolução dos processos, e quanto menor a região do produto em torno do sensor, maior é o seu deslocamento.

A comparação do resultado da modelagem em função da posição com os seus pontos experimentais confirma que o local mais adequado para que seja realizada a medição da temperatura em escala industrial deve ser o núcleo do produto, pois fornecerá resultados seguros de temperatura. Além disso, observa-se que mesmo para as temperaturas superficial e intermediária radial, os desvios foram maiores no início dos processos e foram diminuindo com o decorrer do processo, o que é bom, pois para controle industrial, as temperaturas mais importantes estão da metade do processo em diante, principalmente nos processos de cozimento.

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.

Wang e Sun (2002) modelaram o processo de secagem e cozimento de pernil suíno e

observaram que quanto mais próximo do núcleo do produto, menores foram os desvios das temperaturas obtidas pelo modelo em relação aos dados experimentais. Os autores também observaram que os maiores desvios ocorreram para a temperatura superficial do produto e as temperaturas intermediárias entre núcleo e superfície, apresentaram desvios menores que a temperatura superficial, porém maiores que a temperatura do núcleo.

Dincer (1996), modelou a fritura de salsicha em óleo a 180°C e obteve um desvio máximo de 6,9% para o ajuste do modelo aos dados experimentais para a temperatura adimensionalizada. Enquanto Mittal e Zhang (2000) modelaram o cozimento de salsichas usando redes neurais e obtiveram para a temperatura de núcleo um modelo com bom ajuste aos dados experimentais, com desvio máximo menor que 2°C.

Siripon et al. (2007) modelaram o processo de cozimento de frango em água a 85°C, 90°C e 95°C. A variação máxima entre as temperaturas obtidas pelo modelo e as temperaturas obtidas experimentalmente para a região central foi de 2,8°C. Já Ahmad et al. (2015) modelaram o cozimento de carne cilíndrica por convecção natural utilizando o método de Runge-Kutta e obtiveram resultados que apresentaram desvios de 3,21°C a 8,78°C das temperaturas medidas experimentalmente em relação as temperaturas modeladas, sendo que quanto mais próximo da superfície, maiores foram os desvios.

Rinaldi et al. (2011) simularam o processo de cozimento de mortadela bolonha com temperatura do fluido entre 80°C e 100°C e encontraram um desvio máximo de 3°C entre a temperatura prevista pelo modelo e a temperatura experimental para o núcleo do produto.

Desta forma os modelos obtidos podem ser úteis tanto para a previsão de temperatura no núcleo do produto em função de suas dimensões, quanto para a previsão das propriedades termofísicas do produto e do coeficiente convectivo de transferência de calor. Além disso, é possível através de simulações usando os modelos obtidos, otimizar as condições de operação do equipamento no que diz respeito à temperatura do fluido e ao tempo de processo de forma a obter o produto com as características desejadas, minimizando custos de produção.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados experimentais de tempo e temperatura dos processos de cozimento e resfriamento de mortadelas em estufas foram condizentes com a geometria e característica dos produtos estudados, ou seja, quanto maior a geometria, maior o tempo necessário de processo.

A composição dos produtos influenciou nas propriedades termofísicas, sendo que a quantidade de água e de gordura apresentou maior destaque em relação aos demais componentes, no comportamento das propriedades em função da temperatura para cada processo.

Os parâmetros obtidos numericamente através do modelo matemático apresentaram-se de acordo com as características geométricas e de composição dos produtos e dos processos aos quais foram submetidos.

Os modelos matemáticos para o perfil de temperatura em função do tempo foram validados e se ajustaram adequadamente aos dados experimentais, sendo que quanto mais próximo do núcleo do produto, melhor foi o ajuste encontrado, o que assegura a aplicação dos modelos.

Os modelos matemáticos obtidos neste trabalho podem ser utilizados para previsão de temperatura/tempo, bem como de parâmetros envolvidos nos processos de cozimento e resfriamento das mortadelas estudadas em estufas em diferentes condições, desta forma podem contribuir para a otimização destes processos na indústria de alimentos.

Além disso, a metodologia utilizada neste trabalho pode se estendida para outros produtos semelhantes, considerando as suas características geométricas e de composição, bem como as características do tratamento térmico, ampliando o campo de aplicação.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalho futuros, deixo a sugestão de aplicação dos modelos para a otimização de processos industriais, sem a necessidade de realização de experimentos. Além da obtenção experimental das propriedades termofísicas dos produtos em função da temperatura, já que a literatura apresenta resultados experimentais para diversos produtos cárneos, porém não especificamente para mortadelas.

Outra alternativa é o uso de outros métodos numéricos para o desenvolvimento da modelagem matemática, o que permite comparar a eficiência de métodos diferentes e o seu impacto na obtenção dos resultados.

Também é possível utilizar a metodologia deste trabalho para outros produtos de geometria cilíndrica, desde que leve em consideração as características individuais de cada produto, quanto à sua composição e geometria, e também às condições dos processos aos quais os mesmos são submetidos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, S.; KHAN, M. A.; KAMIL, M.. Mathematical modeling of meat cylinder cooking. **LWT - Food Science and Technology**, v. 60, p. 678-683, 2015.

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

AOAC. **Association of official analytical chemists**. Official Methods of Analysis of AOAC International. V. II., 2000.

AUGUSTO, P. E. D.; SANTANA, F. F.; CRISTIANINI, M.. Utilização de modelagem matemática para avaliação dos efeitos da temperatura de processo e das propriedades térmicas na esterilização de alimentos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.11, n.2, p.159-168, 2008.

AUGUSTO, P. E. D.; PINHEIRO, T. F.; TRIBST, A. A. L.; CRISTIANINI, M.. Evaluation of methodologies for mathematical modeling of packaged conductive foods heat process. **International Journal of Food Engineering**, v.5, n.4, art.6, 2009.

AUGUSTO, P. E. D.; SANTANA, F. F.; CRISTIANINI, M.. Utilização de modelamento matemático de transferência de calor na avaliação de processos de esterilização de carne bovina em conserva (*corned beef*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.12, n.2, p.179-187, 2010.

BAIRI, A.; LARAQI, N.; GARCIA DE MARIA, J.M.. Determination of thermal diffusivity of foods using 1D Fourier cylindrical solution. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 669–675, 2007.

BORGES, P. A. P.; VIONE, M. T.; CERVI, A.. Determinação dos Coeficientes do Modelo de Van Genuchten Empregando o Problema Inverso. **Anais do VIII Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional**, Pelotas, 2008.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa n° 20 de 21/07/1999. Métodos Analíticos Físico-químicos para Controle de Produtos Cárneos e seus Ingredientes Sal e Salmoura. Brasília, 1999.

BRASIL. Ministério da Saúde. ANVISA. Resolução RDC n° 360, de 31 de março de 2000. Aprova os Regulamentos Técnicos de Identidade e Qualidade de Carne Mecanicamente Separada, de Mortadela, de Linguiça e de Salsicha. Brasília, 2000.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento. Instrução Normativa n° 4, de 23 de dezembro de 2003. Aprova os Regulamentos Técnicos Rotulagem Nutricional de alimentos Embalados. Brasília, 2003.

BUGIERECK, A. M.; DALCANTON, F.; CUNHA, T.; VEDOVATTO, E.; MAGRO, J. DAL;

FIORI, M. A.; MELLO, J. M. M.. Simulação Numérica do Processo de Cozimento de Linguiça Calabresa. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ**, Florianópolis, 2014.

CARCIOFI, B.; FAISTEL, J.; ARAGAO, G.; LAURINDO, J.. Determination of thermal diffusivity of mortadella using actual cooking process data. **Journal of Food Engineering**, v. 55, p. 89–94, 2002.

CARSON, J. K.; WILLIX, J.; NORTH, M. F.. Measurements of heat transfer coefficients within convection ovens. **Journal of Food Engineering**, v. 72, p. 293–301, 2006.

CASTILLO, C. J. C (editora).. **Qualidade da Carne**. São Paulo: Livraria Varela, 2006. p. 11, 75-85, 101-127, 156-157.

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.

ÇENGEL, Y. A.. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009. p. 311-333.

CERVI, A. **Determinação dos Parâmetros da Equação Característica de Solos Através de Técnicas de Solução de Problemas Inversos com Base em Dados de Evaporação**. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Ijuí, 2009.

CHOI, Y.; OKOS, M.R.. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In: LeMaguer M., Jelen P. (Eds.). **Food Engineering and Process Applications**. Elsevier Applied Science Publishers: London, 1:93-101, 1986.

COSTA, A.O.S.. **MATLAB: dicas iniciais de utilização**. Ipatinga: Unileste, Laboratório de Modelagem de Processos, 2004, 39p.

COUTINHO, M.R.; OMOTO, E. S.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. M.. Modelagem e Validação da Hidratação de Grãos de Soja. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, 25(3): 603-610, jul.-set. 2005.

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**, Campina Grande, v.13, n.3, p.309-318, 2011.

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.

DINCER, I.. Modelling of Thermal and Moisture Diffusions in Cylindrically Shaped Sausages during Frying. **Journal of Food Engineering**, v. 28, p. 35-43, 1996.

DIRITA, C., DE BONIS, M.V., RUOCCO, G.. Analysis of food cooling by jet impingement, including inherent conduction, **Journal of Food Engineering**, 81:12-20, 2007.

ETFTO - Escola Técnica Federal do Tocantins. **Abate de Suínos**. Disponível em: <http://paraíso.etfto.gov.br/docente/admin/upload/docs_upload/material_d28c8e8772.pdf>.

Acesso em: Mai./2015.

EVANGELISTA, J.. **Tecnologia de Alimentos**. 2 ed. São Paulo: Atheneu, 2005. p 286-289, 324-334, 344, 433-467, 647-648.

FELLOWS, P. J.. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: princípios e práticas**. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. p. 251-259, 399-415.

FERNANDES, F. A. N; RODRIGUES, S; LAW, C. L; MUJUMDAR, A. S.. Drying of Exotic Tropical Fruits: A Comprehensive Review, **Food Bioprocess Technology**, 2010.

FRACASSO, A. R.. **Cinética de hidratação de soja: estudo comparativo entre soja transgênica e convencional**. 2011. 124 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 645p. p. 2-8, 265-268.

JAY, J. M.. **Microbiologia de Alimentos**. 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 2005. p 105-115.

KAYS, S. J.. **Heat, heat transfer and cooling**. In: S. J. Kays (ed.). Postharvest physiology of perishable plant products. Van Nostrand, New York, 457-505, 1991.

KREITH, F.; BOHN, M.. **Princípios de transferência de calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. P. 149-150.

LAURINDO, J. B., CARCIOFI, B.A.M., SILVA, R.R., DANNENHAUER, C.E., HENSE, H.. Evaluation of the effects of water agitation by air injection and water recirculation on the heat transfer coefficients in immersion cooling, **Journal of Food Engineering**, 96:59-65, 2010.

LOBO, R. N.; SILVA, D. L.. **Planejamento e Controle da Produção**. São Paulo: Editora Érica, 2014. 120 p.

MALISKA, C.R.. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. São Paulo: Editora LTC, 1995, 424p.

MARCOTTE, M.; TAHERIAN, A.R.; KARIMI, Y.. Thermophysical properties of processed meat and poultry products. **Journal of Food Engineering**, v. 88, p. 315–322, 2008.

MARIANI, C. V.; SILVA, A.. Análise do coeficiente de transferência de calor no Resfriamento/congelamento do morango. Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering -- ENCIT 2006. **Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering** -- ABCM, Curitiba, Brazil, Dec. 5-8, 2006.

MELLADO, E.C.E.R.. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de Pinus**. 2007. 155f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

MITTAL, G.S.; ZHANG, J.. Prediction of temperature and moisture content of frankfurters during thermal processing using neural network. **Meat Science**, v. 55, p. 13-24, 2000.

MURAKAMI, E.G.; OKOS, M.R.. Measurement and prediction of thermal properties of foods. In: Singh R.P., Medina A.G. (Eds.). **Food Properties and Computer Aided Engineering of Food Processing Systems**. Academic Publishers: New York, 3-48, 1989.

NECKEL, V. J.; MARIANI, V. C.. Modelagem do Congelamento da Beterraba. **Mecânica Computacional**, v. XXIX, p. 5729-5740, Buenos Aires, Argentina, 15-18, Novembro, 2010.

OLIVEIRA, G. S.; LOPES FILHO, J. F.; THOMÉO, J. C.. Difusividade Térmica do Presunto Cozido e seus Constituintes Sólidos Principais. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.6, n.2, p.137-142, jul./dez., 2003.

ORDONEZ, J. A.. **Tecnologia de Alimentos**: componentes dos alimentos e processos. v. 1. Porto Alegre: Artmed, 2005a. p. 155-156, 180.

ORDONEZ, J. A.. **Tecnologia de Alimentos**: alimentos de origem animal. v. 2. Porto Alegre: Artmed, 2005b. p. 173-175, 187-189.

PAIVA, A. F. O.. **Geração Automática de Modelos de Simulação de uma Linha de Produção na Indústria Têxtil**. Dissertação de mestrado. Engenharia industrial, Universidade de Minho. Guimarães. 2005. 239p.

PARDI, M. C.. **Ciência, Higiene e Tecnologia da Carne**. 2 ed. Goiânia: Editora da UFG, 2001. p. 39, 68, 103, 271-272, 547-550.

PAROLIN, R. S.. **Identificação de Espessuras e Materiais em Pavimentos Usando o Problema Inverso**. Dissertação de mestrado. Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ. Ijuí, 2010. 89p.

PAROLIN, R. S.; BORGES, P. A. P.. Determinação da Relação entre Largura de Parede e Difusividade Térmica Visando a Minimização da Entrada de Calor em Edificações. **Anais do VIII Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional/Pelotas**, Pelotas, 2008.

PEREIRA, T. E. J.; STRÖHER, G. R.; NICOLETI, J. F.. Propriedades Termofísicas da Mistura de Pele/Gordura de Frango: Influência da Temperatura e do Conteúdo de Umidade. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ**, Florianópolis, 2014.

PINHO, C.; CRISTIANINI, M.. Three-dimensional mathematical modeling of microbiological destruction of *Bacillus stearothermophilus* in conductive baby food packed in glass container. **International Journal of Food Engineering**, Clayton, v.1, n.2, p.1-8, 2005.

PINHO, C. R. G.. **Modelamento matemático do processo de esterilização de alimentos condutivos em embalagem de vidro**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas-SP, 2003.

PIROZZI, D.C.Z.; AMENDOLA, M.. Modelagem matemática e simulação numérica do resfriamento rápido de morango com ar forçado. **Revista Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v. 25, p. 222-230, 2005.

PORNCHALOEMPONG, P.; BALABAN, M. O.; TEIXEIRA, A. A.; CHAU, K. V.. Numerical simulation of conduction heating in conically shaped bodies. **Journal of Food Process Engineering**, Oxford, v.25, p.539- 555, 2003a.

RESENDE, O; FERREIRA, L. U; ALMEIDA, D. P.. Modelagem Matemática para Descrição da Cinética de Secagem do Feijão *Adzuki*. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.12, n.2, p.171-178, 2010.

RINALDI, M.; CHIAVARO, E.; MASSINI, R.. Apparent thermal diffusivity estimation for the heat transfer modelling of pork loin under air / steam cooking treatments. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, p. 1909–1917, 2010.

RINALDI, M.; CHIAVARO, E.; GOZZI, E.; MASSINI, R.. Simulation and experimental validation of simultaneous heat and mass transfer for cooking process of Mortadella Bologna PGI. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 46, p. 586-593, 2011.

RYLAND, K.; WANG, L.; AMÉZQUITA, A.; WELLER, C. L. Estimation of Heat Transfer Coefficients of Cooked Boneless Ham. **Rurals: Review of Undergraduate Research in Agricultural and Life Sciences**, v. 1, Iss. 1, Art. 1, 2006.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, Vera L. R.. **Cálculo Numérico: Aspectos teóricos e computacionais**. 2 ed. São Paulo: Makron Books, 1996. p. 321, 357-358.

SILVA JR., E. A.. **APPCC na Qualidade e Segurança Microbiológica de Alimentos: análises de perigos e pontos críticos à qualidade e segurança microbiológica de alimentos**. São Paulo: Livraria Varela, 1997. p. 1-7,23.

SILVA, M.. **Otimização de um processo de cozimento de linguiça**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2011.

SILVA, M. O.. **Modelagem e análise do processo de cozimento de linguiça tipo calabresa**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) Universidade Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2015.

SILVA NETO, A. J.; MOURA NETO, F. D.. **Problemas Inversos: Conceitos Fundamentais e Aplicações**. UERJ. Rio de Janeiro, 2005.

SINGH, B. P. N.; KULSHRESTHA, S. P.. Kinetics of water sorption by soybean and pigeonpea grains. **Journal of Food Science**, v. 52, n. 6, p. 1538-1544, 1987.

SIRIPON K.; TANSAKUL, A; MITTAL, G. S.. Heat transfer modeling of chicken cooking in hot water. **Food Research International**, v. 40, p. 923–930, 2007.

SU, J.; SILVA NETO, A. J.. Two-dimensional inverse heat conduction problem of source strength estimation in cylindrical rods. **Applied Mathematical Modelling**. v. 25, p. 861-872, 2001.

TERRA, N. N.. **Apontamentos sobre Tecnologia de Carnes**. São Leopoldo: Unisinos, 1998. p. 26-36, 53-59, 126-129, 175-176, 197-200.

TRUJILLO, F.J.; WIANGKAEW, C.; PHAM, Q.T.. Drying modelling and water diffusivity in beef meat. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 74–85, 2007.

U.S. Department of Agriculture, 1999. Performance standards for the production of certain meat and poultry products. Final rule. Federal Register 64, 732–749.

VERBOVEN, P.; SCHEERLINCK, N.; DE BAERDEMAEKER, J.; NICOLAÏ, B.M.. Computational fluid dynamics modelling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven. **Journal of Food Engineering**, v. 43, p. 61–73, 2000.

WANG, L.; SUN, D.W.. Modelling three-dimensional transient heat transfer of roasted meat during air blast cooling by the finite element method. **Journal of Food Engineering**, v. 51, p. 319–328, Mar, 2002.

ZUCOLOTTO, B.; PLA CID, C. C.; ISOPPO, E. A.; PASA, A. A.; DUQUE, J. G. S.; D. FOLLY, W. S.. Reliable evaluation of magnetic properties of nanoparticle systems. **Journal of Applied Physics**, v. 118, 113903, 2015.