

**URI - CAMPUS ERECHIM
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

MILENA DE OLIVEIRA SILVA

**MODELAGEM E ANÁLISE DO PROCESSO DE COZIMENTO DE LINGUIÇA TIPO
CALABRESA**

**ERECHIM, RS
2015**

MILENA DE OLIVEIRA SILVA

**MODELAGEM E ANÁLISE DO PROCESSO DE COZIMENTO DE LINGUIÇA TIPO
CALABRESA**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da URI – Campus de Erechim, como requisito à obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Alimentos, Área de Concentração: Engenharia de Alimentos, da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, Campus de Erechim.

**ERECHIM, RS
2015**

MODELAGEM E ANÁLISE DO PROCESSO DE COZIMENTO DE LINGUIÇA TIPO CALABRESA

Milena de Oliveira Silva

Tese de Doutorado submetida à Comissão Julgadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos como requisitos necessário à obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Alimentos, Área de Concentração: Engenharia de Alimentos.

Comissão Julgadora:

Prof. Mônica B. Alvarado Soares, D. SC
Orientador

Prof. Alexandre B. de Jesus Soares, D. SC
Orientador

Prof. Juliana Steffens, D. SC

Prof. Marcelo Luis Mignoni, D. SC

Prof. Weber da Silva Robazza, D. SC

Prof. Eduardo Huber, D. SC

AGRADECIMENTOS

Com receio de deixar de lado ou priorizar alguém que de alguma forma tenha me ajudado ao longo de minha carreira acadêmica, agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para que eu pudesse apresentar esse trabalho.

Muito obrigada!

“Quando os ventos da mudança sopram, umas pessoas levantam barreiras, outras constroem moinhos.”

Érico Veríssimo

Resumo da Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos como requisito necessário à obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Alimentos.

MODELAGEM E ANÁLISE DO PROCESSO DE COZIMENTO DE LINGUIÇA TIPO CALABRESA

Milena de Oliveira Silva

Fevereiro/2015

Orientadores: Mônica Alvarado Soares

Alexandre B. J. Soares

Muitas estratégias são utilizadas pelas indústrias de alimentos a fim de garantir a vida útil dos produtos durante toda a cadeia de produção. A temperatura é um fator importante neste processo e muitas vezes de difícil controle. Neste contexto, o uso de métodos numéricos é enaltecido quando dificuldades associadas ao tratamento analítico inviabilizam a solução do problema. O presente trabalho tem o objetivo de desenvolver um modelo matemático capaz de simular o perfil de temperatura durante o cozimento de uma linguiça tipo calabresa. Para avaliar a etapa de cozimento foi realizada a observação e verificação do controle do processo baseado na perda de peso do produto no cozimento também denominada quebra de cozimento. Um modelo matemático simplificado foi elaborado para a simulação do processo, permitindo-o avaliar de acordo com a influência de algumas variáveis como tempo, temperatura, umidade, velocidade do ar entre outras. O traçado da curva obtida com os resultados do modelo aproximou-se frente aos dados experimentais com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,99$ o que reproduz o comportamento do processo estudado. De posse desses resultados, foi utilizado o modelo para otimizar o processo, focando os esforços na redução do tempo de cozimento, o qual atingiu uma redução de 14% no tempo total. Adicionalmente, foram realizadas análises físico químicas e sensoriais da linguiça tipo calabresa a fim de verificar o impacto das alterações realizadas nas características de qualidade

do produto final, as quais não apresentaram alterações comprovando assim que o modelo proposto é capaz de reproduzir o comportamento do processo de cozimento.

Palavras-chave: modelagem matemática, cozimento, processos.

Abstract of Thesis presented to Food Engineering Program as requirements fulfillment for the Degree of Doctorate in Food Engineering.

MODELING AND ANALYSIS OF A CALABRESA TYPE SAUSAGE COOKING PROCESS

Milena de Oliveira Silva

February/2015

Mentors: Mónica Alvarado Soares

Alexandre B. J. Soares

There are many strategies adopted by food industries to ensure the shelf life of the products during the entire production chain, where the temperature is an extremely relevant factor in this aspect and often difficult to control. For this, the use of numerical methods is enhanced when difficulties associated with the analytic treatment turn the solution unfeasible as well as in cases where obtaining experimental data becomes compromised due to technological impossibility or high costs. The present study is related to mathematical modeling and simulation of a cooking process and aims the development of a mathematical model able to simulate and diagnose temperature profile during the cooking of a calabresa sausage and optimize the process without impacting the sensorial characteristics. To evaluate the cooking step, it was performed the observation and verification based on the loss weight control of the product in the cooking process, also called cooking break. A simplified mathematical model was developed to simulate the process, enabling the evaluation of the study under the influence of some variables such as time, temperature, moisture, air speed and others. The course of the curve obtained with the model results came up front to the experimental data with a determination coefficient of $R^2 = 0.99$ which reproduces the behavior of the studied process. With these results, we used the model to optimize the process, focusing on efforts to reduce the cooking time, which achieved a 14% reduction in the total time. Additionally, chemical and sensorial analysis of the calabresa sausage were carried

out to verify the impact of changes on the quality characteristics of the finished good, which showed no changes thus proving that the proposed model is able to reproduce the cooking process.

Keywords: Mathematical model, cooking, process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma de produção de linguiça calabresa.....	24
Figura 2. Comportamento das curvas de secagem/tempo durante um experimento a propriedades constantes.	42
Figura 3. Representação geral de uma isoterma de adsorção.	47
Figura 4. Diagrama esquemático das estufas de cozimento.	54
Figura 5. Diagrama esquemático das medidas de velocidade do ar dentro das estufas.....	59
Figura 6. Diagrama esquemático das medidas de temperatura na parte superior, inferior e centro do produto nas estufas de cozimento.	60
Figura 7. Comparativo da quebra de cozimento entre as estufas.	70
Figura 8. Análise de variância da quebra de cozimento entre as estufas para 95% de confiança.	71
Figura 9. Avaliação da capacidade da quebra de cozimento da estufa 7.....	72
Figura 10. Avaliação da capacidade da quebra de cozimento da estufa 8.....	73
Figura 11. Avaliação da capacidade da quebra de cozimento da estufa 9.....	74
Figura 12. Avaliação da capacidade da quebra de cozimento da estufa 10.....	74
Figura 13. Avaliação da capacidade da quebra de cozimento da estufa 11.....	75
Figura 14. Perfil de temperatura no interior da estufa ao longo do cozimento da linguiça calabresa.....	76
Figura 15. Análise de variância da temperatura entre os níveis no interior da estufa para 95% de confiança.	77
Figura 16. Diagrama esquemático das medidas de velocidade do ar na etapa lenta.	79
Figura 17. Resultados da temperatura da linguiça calabresa experimentais versus simulados (a).....	83
Figura 18. Resultados da temperatura da linguiça calabresa experimentais versus simulados (b).....	85
Figura 19. Resultados da umidade da linguiça calabresa experimentais versus simulados.	86
Figura 20. Relação da temperatura versus umidade.....	87
Figura 21. Resultados da temperatura da linguiça calabresa experimentais versus simulados - Novo Programa	88

Figura 22. Novo perfil de temperatura no interior da estufa ao longo do cozimento da linguiça calabresa.....	89
Figura 23. Análise de variância da temperatura entre os níveis no interior da estufa para 95% de confiança - Novo Programa.....	90
Figura 24. Avaliação da capacidade da quebra de cozimento - Novo Programa	91
Figura 25. Imagem térmica da linguiça tipo calabresa na saída da estufa (a).....	92
Figura 26. Imagem térmica da linguiça tipo calabresa na saída da estufa (b).....	93
Figura 27. Imagem térmica da linguiça tipo calabresa na saída da estufa (c).....	93
Figura 28. Comparativo das análises de umidade do produto	95
Figura 29. Comparativo das análises de gordura do produto.....	95
Figura 30. Comparativo das análises de proteína do produto	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química da linguiça calabresa	69
Tabela 2. Medidas de velocidade do ar e da fumaça no interior da estufa	78
Tabela 3. Medidas de velocidade do ar na etapa lenta no interior da estufa.....	79
Tabela 4. Propriedades termofísicas da linguiça calabresa.	80
Tabela 5. Medidas de umidade relativa no interior da estufa.	81
Tabela 6. Variáveis utilizadas na simulação do modelo.	84
Tabela 7. Comparativo da composição química da linguiça calabresa	94
Tabela 8. Atributos avaliados na análise sensorial para a linguiça tipo calabresa	97
Tabela 9. Resultados da análise sensorial para a linguiça tipo calabresa.....	98

NOMENCLATURA

A, B	Constantes de ajuste	
CEP	Controle Estatístico de Processo	
CLP	Controlador Lógico Programável	
CPL	Índice de capacidade do processo pela dispersão	
CPU	Índice de capacidade do processo pelo desvio padrão	
Cpk	Índice de capacidade pela centralização do processo	
CCpk	Índice de capacidade potencial	
Cp	Índice de capacidade do processo	
D_{ef}	Difusividade efetiva	m ² /s
E	Empuxo	g
E	Função exponencial integral	
f	Força de campo	N
G	Fluxo mássico do ar	kg/hm ²
h_c	Coefficiente convectivo de transferência de calor	W/m ² °C
i	Índice de direção espacial	
k	Condutividade térmica	W/m°C
k_G	Coefficiente de transferência de massa	m/s
LSL	Limite de especificação inferior	
MIMO	Multiple Input, Multiple Output	
$P_{\text{água}}$	peso de líquido deslocado	g
p	Pressão	Pa
p_{sat}	Pressão de saturação de vapor de água	Pa
p_v	Pressão de vapor da água	Pa
q	Quantidade de calor fornecido	W/m
r	Raio	m
SISO	Singlo Input, Single Output	
t	Tempo	s
T	Temperatura	°C
T_0	Temperatura inicial	°C
t_0	Tempo inicial	Min
USL	Limite de especificação superior	
u	Componente de velocidade	m/s
UR	Umidade relativa	%
v	Componente de velocidade em (y)	m/s
v_{ar}	Velocidade do ar	m/s
X_e	Umidade de equilíbrio	Kg água/kg sólido seco
X_i	Teor de umidade inicial	Kg água/kg sólido seco
X	Conteúdo médio de umidade	Kg água/kg sólido seco
X	Coordenada cartesiana x	
Y	Coordenada cartesiana y	

Y_{∞}	Umidade de equilíbrio na camada limite	kg água/m ³
Y_s	Umidade na superfície do sólido	kg água/m ³
Z	Coordenada cartesiana z	
w	Componente de velocidade em (z)	m/s
ρ	Densidade	kg/m ³
∇^2	Laplaciano	
α	Difusividade térmica	m/s

SUMÁRIO

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO	17
1.1 TEMA E JUSTIFICATIVAS.....	18
1.2 OBJETIVO.....	20
1.2.1 Objetivos Específicos	20
CAPITULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 PROCESSAMENTO TECNOLÓGICO DA CARNE.....	22
2.1.1 Produção de Linguiça Tipo Calabresa.....	24
2.1.1.1 Moagem das carnes	24
2.1.1.2 Mistura.....	25
2.1.1.3 Embutimento	26
2.1.1.4 Cozimento e defumação.....	26
2.2 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO	27
2.3 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS	29
2.4 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	29
2.4.1 Modelos Matemáticos.....	30
2.4.2 Aplicações da Simulação	31
2.4.3 Classificação dos Modelos Matemáticos.....	32
2.4.4 Obtenção de Modelos Matemáticos	35
2.4.5 Comparação de Modelos Teóricos e Empíricos.....	37
2.4.6 Forma Teórica de Obtenção de Modelos Matemáticos.....	39
2.5 SECAGEM	41
2.5.1 Cinética de Secagem	43
2.5.2 Umidade de Equilíbrio	45
CAPITULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1 PRODUTO – LINGUIÇA TIPO CALABRESA.....	49
3.1.1 Análises Físico-Químicas	49
3.1.1.1 Análise de umidade	49
3.1.1.2 Análise de gordura	50
3.1.1.3 Análise de proteína.....	50
3.1.1.4 Análise de cinzas.....	51
3.1.1.5 Análise de carboidratos	51
3.1.2 Análises Sensoriais	51

3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE ELABORAÇÃO DA LINGUIÇA TIPO CALABRESA.....	52
3.2.1 Determinação do Teor de Gordura.....	54
3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROCESSO DE COZIMENTO DE LINGUIÇA TIPO CALABRESA.....	55
3.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA LINGUIÇA COZIDA.....	56
3.5 DETERMINAÇÕES DA VELOCIDADE DO AR E DA FUMAÇA DENTRO DA ESTUFA DE COZIMENTO	59
3.6 AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DA ESTUFA E PRODUTO ..	60
3.7 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	61
3.7.1 Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor	62
3.7.2 Difusão de Umidade no Sólido	63
3.7.3 Equações do Modelo.....	65
3.7.3.1 Conservação da massa.....	65
3.7.3.2 Conservação da quantidade de movimento	66
3.8 OTIMIZAÇÃO	67
CAPITULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LINGUIÇA TIPO CALABRESA.....	69
4.2 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DO PROCESSO	69
4.2.1 Avaliação da Capacidade do Processo	72
4.3 PERFIL DE TEMPERATURA.....	75
4.4 VELOCIDADE DO AR E DA FUMAÇA DENTRO DA ESTUFA DE COZIMENTO	77
4.5 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS	80
4.6 COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	80
4.7 UMIDADE RELATIVA.....	81
4.8 MODELO MATEMÁTICO	81
4.9 EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA.....	83
4.10 TEOR DE UMIDADE	85
4.11 COMPORTAMENTO TEMPERATURA X UMIDADE	86
4.12 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO.....	87
4.12.1 Distribuição da Temperatura no Produto	91
4.12.2 Análises de Qualidade do Produto	94

4.12.3 Impactos Financeiros	98
CAPITULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100
5.1 CONCLUSÕES	100
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO

Adquirir novas tecnologias para incrementar os processos e tornar uma empresa mais competitiva tem um elevado custo. A competitividade está associada à melhoria da qualidade, mediante melhor controle dos processos produtivos, de forma a reduzir desperdícios e utilizar a plena capacidade dos recursos. Portanto, é de fundamental importância a adoção de formas inovadoras para o controle de qualidade (LOBO; SILVA, 2014).

O processamento térmico ainda é o método mais utilizado para garantir a segurança microbiológica de produtos cárneos, mesmo considerando que novas tecnologias não térmicas estejam encontrando nichos específicos na aplicação da indústria de alimentos. Os benefícios associados ao tratamento térmico, como o cozimento, vão além da redução da contaminação microbiológica inicial e da extensão da vida útil do produto, incluindo também o desenvolvimento de características sensoriais desejáveis relacionadas com sabor, cor e textura. Tais benefícios, aliados à crescente demanda do consumidor por produtos de conveniência que necessitam de uma quantidade mínima de preparação, têm impulsionado o desenvolvimento de uma gama variada de produtos com alto valor agregado, que utilizam cortes de carne cozidos em sua composição (DESMOND *et al*, 2000).

Na pesquisa, desenvolvimento e inovação de processos, o uso de informações quantitativas permite a comparação com normas ou padrões estabelecidos. Neste sentido, a importância de dados experimentais está plenamente justificada (SOUZA, 2004). Uma série de técnicas foram desenvolvidas nas últimas décadas com o objetivo de assegurar a qualidade de processos e produtos industriais, proporcionando seu controle efetivo. Uma dessas técnicas é o Controle Estatístico de Processo (CEP) a qual pode ser descrito como uma ferramenta de monitoramento rápido da qualidade que possibilita a detecção de causas especiais, anômalas ao processo, que possam interferir na qualidade final do produto (HENING *et al*, 2014).

Há muitas situações em que a obtenção de dados se torna comprometida por questões de segurança, por impossibilidade tecnológica ou ainda por questões financeiras. Isso tende a comprometer tanto a reprodução de dados experimentais

(ou de operação) bem como a previsão de parâmetros dentro de limites aceitáveis de exatidão (SOUZA, 2004).

A modelagem e a simulação podem desempenhar um papel estratégico frente às limitações dos métodos experimentais e analíticos. Atualmente, a disponibilidade de computadores de alto desempenho aliada ao uso de métodos numéricos eficientes e robustos, permitem soluções numéricas evitando-se introduzir simplificações ou restrições que afastam o problema da realidade. Desse modo, tem sido possível simular problemas levando-se em consideração influências ignoradas em soluções analíticas (RABI, 2011).

1.1 TEMA E JUSTIFICATIVAS

Compreender um complexo processo de fabricação de várias etapas, que requer um produto final que atinja padrões de qualidade em múltiplas características, já seria uma razão suficiente para a realização dessa pesquisa. Além deste, outros aspectos se mostram igualmente relevantes como:

- Possibilidade do uso de dados históricos de modo a propiciar adequações da produção e/ou otimização dos mesmos, sem custo adicional de pesquisa ou procedimento experimental;
- Possibilidade de se encontrar um conjunto de parâmetros de processo que atenda à maior quantidade possível de características necessárias como finalidade principal dos métodos de otimização. A otimização baseada em parâmetros de processo e características especificadas é uma opção bastante apropriada e precisa se tornar mais acessível;
- Desenvolvimento de um procedimento de auxílio na tomada de decisão ligada à produção com características correlacionadas visando atingir resultados melhores tanto no quesito qualidade quanto produtividade os quais são de grande apelo por parte dos gestores de processo.

O processo de secagem industrial é normalmente realizado com o carregamento dos produtos a serem cozidos e/ou defumados em câmaras com circulação de ar forçado. Fornos de convecção forçada de ar são frequentemente utilizados e o princípio de funcionamento desses fornos baseia-se na circulação de

ar quente no interior do forno e transferência de calor convectivo do ar à superfície dos alimentos (STIGTER *et al*, 2001).

Nestas instalações, a termofluidodinâmica (comportamento dinâmico dos fluidos e dos fenômenos associados) dos fluxos de admissão do ar pode ser devidamente definida e controlada através de unidades de refrigeração e aquecimento. A termofluidodinâmica de um forno tem um impacto significativo sobre a qualidade dos alimentos a serem cozidos, e previsões confiáveis são importantes para projetar e avaliar o desempenho de um equipamento (MISTRY *et al*, 2006).

Para conseguir um melhor projeto, os mecanismos de transferência de calor no interior dos fornos devem ser bem compreendidos. Devido à complexidade da dinâmica dos fluxos envolvidos, uma abordagem de modelagem pode ser adequada para orientar e reduzir experimentos. Na verdade, um modelo validado permite estudos paramétricos do fenômeno sem custos operacionais e em curtos períodos de tempo. Deve-se salientar que fabricantes de câmaras de secagem são geralmente pequenas e médias empresas. Estas empresas por razões comerciais têm desenvolvido estes equipamentos com base na “prática de campo”. Em outras palavras, a engenharia de concepção de câmaras modernas, bem como a definição de “ótimo” das condições do processo operacional, são fundamentadas na experiência prática acumulada pelas indústrias fornecedoras desses produtos (cozidos, secos e defumados) ao longo dos anos (MIRADE; KONDJYAN; DAUDIN, 2002).

Controlar o fluxo de ar durante a secagem artificial é de extrema importância, uma vez que o mesmo é determinante para a eficiência do processo e obtenção de produtos de forma homogênea. Por outro lado, a secagem artificial tem vários inconvenientes associados. O custo do equipamento, energia consumida (térmica e elétrica) e principalmente a dificuldade na secagem uniforme do produto associada às heterogeneidades no interior do secador contribuem para essa situação (PIAIA, 2009).

De acordo com Mathioulakis, Karathanos e Belessiotis (1998), a falta de conhecimento do comportamento da secagem no interior do alimento pode ser pelo menos uma das causas do elevado custo de uma planta. Daudin, Kondjoyan e Sirami (1992) relatam que o baixo controle das condições de secagem é a principal razão para a diminuição da qualidade na fabricação de embutidos secos. A baixa qualidade ocorre quando a superfície do produto permanece muito úmida,

favorecendo o crescimento de micro-organismos, como resultado de uma taxa de evaporação de água na superfície inferior à taxa de migração de água a partir das regiões internas. A textura do produto e sabor também são afetadas quando uma crosta seca é formada devido a uma taxa de evaporação da água da superfície superior à taxa de migração de água no interior do produto.

A maior parte das pesquisas na literatura sobre secagem de embutidos secos e fermentados relata transferências relacionadas à parte interna dos produtos ou com cinética de secagem em função das propriedades do ar (SIMAL *et al*, 2003). No que se refere ao funcionamento global dos modernos secadores de carnes (câmaras), poucos trabalhos experimentais ou numéricos podem ser encontrados (MIRADE; DAUDIN, 2000).

Segundo Rozenfeld (1999), o aumento da concorrência, as rápidas mudanças tecnológicas, a diminuição do ciclo de vida dos produtos e a maior exigência por parte dos consumidores orientam as empresas para que tenham agilidade, produtividade e alta qualidade, que dependem, necessariamente, da eficiência e eficácia da empresa no processo de produção do produto.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi elaborar um modelo matemático para a etapa de cozimento de linguiça tipo calabresa a fim de otimizar o processo nesta etapa que é de extrema importância para a indústria frigorífica.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Obter dados experimentais do processo de cozimento de linguiça tipo calabresa;
- Otimizar o processo de cozimento de linguiça tipo calabresa;
- Desenvolver um modelo matemático para o processo de cozimento de linguiças;
- Ajustar o modelo a um conjunto de dados experimentais;
- Determinar os parâmetros do processo de cozimento;
- Validar o modelo matemático;

- Aplicar a utilização do modelo para um estudo de otimização do processo;
- Validação da otimização em relação a qualidade do produto.

Esta tese é constituída de cinco capítulos, os quais podem ser resumidos a seguir:

O capítulo 1 descreve o problema geral abordado no trabalho, sua importância, contextualização e sua estrutura geral a serem desenvolvidos.

No capítulo 2 são abordados os diversos conceitos que fundamentam a teoria dentre os quais está a caracterização do produto, processo, conceitos sobre controle de processo e modelagem matemática.

O capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados no processo produtivo e equações utilizadas para elaboração do modelo.

O capítulo 4 apresenta as discussões e os resultados do modelo matemático em relação aos dados experimentais.

O capítulo 5 contempla as considerações finais.

CAPITULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSAMENTO TECNOLÓGICO DA CARNE

Agregar valor é a expressão de ordem para a agroindústria da carne. Em um mercado cada vez mais competitivo e com o aumento da exigência dos consumidores por qualidade, o melhoramento contínuo dos produtos torna-se imperativo para a sobrevivência das empresas no setor. A carne é uma importante fonte mercadológica, que precisa estar em constante melhoria e acompanhando às evoluções da sociedade (OLIVO, 2007). A produção de embutidos apresenta-se como uma das soluções para atender à demanda por qualidade. Segundo Roça (2000), embutidos são produtos constituídos a base de carne picada e condimentada com forma geralmente simétrica. São embutidos sob pressão em um recipiente ou envoltório de origem orgânica ou inorgânica, aprovado para este fim.

Esse tipo de produto apareceu no Brasil graças às receitas tradicionais trazidas com a imigração de famílias europeias, alemãs e italianas as quais foram incorporadas aos hábitos nacionais. No novo país, devido às condições climáticas e ao paladar nacional, os alimentos trazidos com as colônias de imigrantes sofreram algumas adaptações. Na época, os artesãos foram, aos poucos, transformando sua arte em pequenas fábricas, enquanto os donos de açougues começaram a ousar no processamento industrial de carnes (VEIGA, 2011).

Entre os vários produtos cárneos industrializados existentes no mercado, a linguiça está entre um dos produtos mais apreciados pelo consumidor. A linguiça pode apresentar-se de diversas formas, conforme tecnologia de fabricação e matérias-primas utilizadas, que dispensa a preparação de emulsões e equipamentos mais sofisticados. Desde a sua introdução, muitas foram as modificações sofridas, da produção artesanal às pequenas fábricas e, então, à escala industrial acompanhando o crescimento da indústria, as mudanças na economia e a integração de mercados. Mais tarde vieram para o Brasil os grandes frigoríficos multinacionais aumentando o volume de carne fresca processada. Com a modernização e diversificação da produção nos frigoríficos, houve um aumento no volume de carne embutida, transformando-se em importante fonte de proteína animal (ODA *et al*, 2003).

Segundo Brasil (2000), linguiça é um produto obtido de carne de animais, adicionada ou não de tecidos adiposos, ingredientes, embutido em envoltório natural ou artificial, e submetida ou não ao processo de estufagem ou cozimento, com ou sem defumação.

O processamento da carne tem por objetivo aumentar a sua vida útil, desenvolver diferentes sabores e utilizar partes do animal de difícil comercialização no seu estado fresco. O processamento dos embutidos é caracterizado por uma série de operações que objetivam a transformação da matéria-prima em um produto, dentro das especificações legais, atraente e legalmente nutritivo (TERRA, 2000). Os diferentes processos aplicados à carne requerem conhecimento de sua composição química e das propriedades físicas e funcionais das substâncias que as compõem (PEREDA *et al*, 2005).

2.1.1 Produção de Linguiça Tipo Calabresa

Na Figura 1 é apresentado um fluxograma do processo de fabricação da linguiça tipo calabresa.

Figura 1. Fluxograma de produção de linguiça tipo calabresa



Fonte: A autora

2.1.1.1 Moagem das carnes

A moagem e a homogeneização da carne, durante o processamento, favorecem a incorporação de oxigênio à carne, além de romperem a estrutura do tecido, fazendo com que o átomo de Fe^{2+} da molécula de mioglobina entre em contato com as moléculas de ácido graxo insaturado, atuando assim como agente iniciador e catalisador da reação de oxidação lipídica (FIGUEIRÓ, 2013).

Segundo Gonçalves (2002), a moagem consiste na subdivisão da matéria-prima em partículas, proporcionando melhor homogeneização do produto final e maior exposição das proteínas. No caso de embutidos de massa grossa (linguiça e salame), durante a operação, temperaturas relativamente baixas auxiliam na

obtenção de partículas, com forma geométrica mais definida e evita o esmagamento da gordura. Já, embutidos de massa fina necessitam de maior grau de subdivisão de partículas para melhorar a extração de proteínas solúveis em sal (miofibrilares) e a formação do completo encapsulamento das partículas de gordura (“emulsão cárnea”).

2.1.1.2 Mistura

A etapa de mistura tem como principal objetivo a homogeneização da carne moída e/ou triturada, bem como os demais ingredientes da composição do produto em um equipamento denominado misturadeira, onde permanece por tempo suficiente para que ocorra a completa mistura e incorporação de todos os ingredientes (aditivos e conservantes) da formulação (ROÇA, 2000).

Na indústria geralmente são utilizados misturadores os quais possuem braços helicoidais que, além de possuir uma boa capacidade de homogeneização, tem pouco atrito o que faz com que a matéria-prima não sofra aquecimento durante esta fase. A utilização de misturadores a vácuo aumenta a extração da proteína e evita a formação de bolhas de ar, que durante o cozimento, podem ser preenchidas de gordura, diminuindo a possibilidade de oxidação do produto (RODRIGUES, 1978).

A realização da correção do teor de gordura na formulação das linguiças cozidas é de extrema importância para a qualidade do produto, visto que esta tem como finalidade conferir aparência, textura, sabor e as propriedades físico-químicas características. Esta correção também é de suma importância quando se trata de custo de formulações, por ser uma matéria-prima de menor valor agregado para a elaboração do produto (SHIMOKOMAKI; RUBISON; TERRA, 2006).

Da mesma forma, um teor baixo de gordura levará a uma maior utilização de carne magra na formulação, sendo o custo da carne bem maior do que o da gordura, logo causará um incremento no custo marginal do produto (SHIMOKOMAKI; RUBISON; TERRA, 2006).

Parâmetros como idade, alimentação, sexo e raça do animal, levam a uma grande variação da composição de um mesmo corte cárneo, o que acarretará uma elevada oscilação do teor de gordura da formulação. Esta oscilação levará ao não

atendimento do padrão de gordura especificado, comprometendo assim a qualidade do produto (ORDÓNEZ, 2005).

2.1.1.3 Embutimento

Trata-se da extrusão da carne moída e misturada aos aditivos em tripas naturais ou artificiais próprias ao consumo humano. Um fator importante é a retirada do ar que está presente internamente na massa preparada, para evitar bolhas de ar no produto e a oxidação durante o armazenamento e comercialização (RODRIGUES, 1978).

2.1.1.4 Cozimento e defumação

O cozimento é um processo que além de tornar o alimento mais palatável, promove a sua preservação através da destruição de enzimas e de micro-organismos (SILVA, 2000).

No processo de cozimento uma grande quantidade de fluidos é expelida do tecido da carne, devido à mudança de temperatura durante o aquecimento induzindo ao encolhimento da estrutura da carne. Essa quantidade de fluidos que é expelida do produto é denominada de quebra de cozimento, ou seja, a diferença de peso do produto antes de iniciar o processo de cozimento e o produto após seu cozimento (HULLBERG; LUNDSTROM, 2004).

Segundo Arima e Lemos (2002) a defumação é um processo de aplicação no alimento de fumaça produzida pela combustão incompleta de algumas madeiras, com a finalidade de conferir aroma, sabor e cor característicos e prolongar a vida útil. Normalmente fazem parte do processo a secagem inicial, a deposição da fumaça e a secagem adicional e/ou cozimento do produto. A quantidade e a velocidade da deposição da fumaça dependem do substrato de defumação, condições da estufa e dos tipos de fumaça. Em carnes, o contato com o calor e a fumaça provoca a perda da água, a superfície fica ressecada e a coloração estabilizada. A perda de água e a ação dos constituintes da fumaça conferem ao alimento barreiras físicas e químicas eficientes contra a penetração e a atividade de microorganismos. Essa capa protetora pode ser devida à desidratação que se processa na superfície do produto, principalmente na defumação a quente, à

coagulação proteica que ocorre durante a defumação e ao depósito das substâncias antimicrobianas que existem na fumaça, que se condensam e encontram-se depositadas na superfície do produto.

2.2 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO

O controle estatístico de processos (CEP) surgiu com SHEWART (1980) durante o estudo da aleatoriedade de processos industriais, que identificou quando a origem da variabilidade dos processos era aleatória ou por causas especiais. Para isso, utilizou os gráficos de controle que permitem um maior conhecimento do processo para, além de controlá-lo, melhorar a sua capacidade.

Neste sentido, o controle estatístico de processos é definido, de forma resumida, como uma ferramenta de resolução de problemas na obtenção de estabilidade e na melhoria da capacidade de processos através da redução da variabilidade (FLORAC; CARLETON, 1999). Outros autores (WHEELER, 2000; WHEELER; CHAMBERS, 1992) complementam que o controle estatístico de processos possibilita a detecção de padrões de variação no processo de produção e a garantia que os padrões de qualidade estabelecidos para os produtos sejam alcançados.

Desta forma, o foco da estatística clássica na conformidade ou não-conformidade do produto, realizada pelas inspeções, passou a ser no controle da qualidade através do conhecimento do processo (WHEELER; CHAMBERS, 1992). Neste contexto, segundo SHEWART (1980), tudo é variável, nada é perfeitamente estável, e os processos variam devido às causas comuns, naturais e as causas especiais ou atribuíveis. Quanto maior o controle do conhecimento destas causas, maior é o controle da variabilidade, já que as ações sobre as causas comuns tornam possível a melhoria contínua dos processos e as ações sobre as causas especiais mantêm o processo sob controle.

As causas de variação podem ser exemplificadas pelo desgaste de ferramentas, matérias-primas fora das especificações, métodos de trabalho incorretos, gerenciamento inadequados e erros de operação. As causas comuns provocam desvios dentro de um limite aceitável para o comportamento do processo (MONTGOMERY, 2004). De forma contrária, as causas especiais, que são eventos

que não fazem parte da execução normal do processo, ultrapassam estes limites, caracterizando assim a instabilidade do processo (FLORAC; CARLETON, 1999).

Um processo sob controle estatístico é estável quando todas as variações no seu comportamento são atribuídas a causas comuns e o desvio está dentro de limites estabelecidos (FLORAC; CARLETON, 1999).

Após a estabilização do processo a sua capacidade deve ser observada, já que é possível que um processo sob controle não seja capaz de atingir os objetivos de um cliente ou de um projeto (FLORAC; CARLETON, 1999; MONTGOMERY, 2004). Neste caso, dependendo da análise da causa desta incapacidade, ações de melhoria ou até mesmo mudança dos objetivos de desempenho devem ser realizadas.

A capacidade, portanto, é a variabilidade do processo, depois que este foi aperfeiçoado e está sob controle estatístico, ou seja, ela só pode ser obtida quando não existirem causas especiais associadas e somente causas comuns contribuem para esta variabilidade (MONTGOMERY, 2004).

Para que seja possível conhecer o que um processo é capaz de fazer, a utilização dos gráficos de controle é fundamental, já que os limites de um processo estável estão associados aos limites dos gráficos de controle. Existem diferentes tipos de gráficos de controle que podem ser aplicados conforme o tipo de dados, de variáveis ou de atributos, para melhor diferenciar os “ruídos” (causas comuns) dos sinais de variação (causas atribuíveis) do comportamento dos processos (FLORAC; CARLETON, 1999).

Os gráficos de controle, portanto, contribuem para a análise do comportamento dos processos e a identificação das causas de instabilidade ao longo da sua execução. Esta análise é fundamentada pelos limites de controle associados a estes gráficos e a trajetória formada pela sequência dos pontos no gráfico (MONTGOMERY, 2004).

O CEP é operacionalizado através dos gráficos de controle, os quais são utilizados para acompanhar o desempenho de um processo a partir da definição de uma faixa de controle aceitável. O gráfico de controle é usado para analisar tendências e padrões que acontecem ao longo do tempo. Sua finalidade principal é monitorar um processo, verificando se ele está sob controle estatístico indicando sua faixa de variação. Existem dois tipos de gráficos de controle: para variáveis e para atributos. Os gráficos de controle para atributos se referem às características de

qualidade que classificam itens em conformes e não conformes, enquanto que os gráficos de controle para variáveis baseiam-se na medida das características de qualidade em uma escala contínua (HENING *et al*, 2014).

2.3 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

O aumento da demanda dos produtos alimentícios no país tem como exigência a modernização e adequação tecnológica para melhor qualidade das indústrias alimentícias. Estas exigências requerem maiores informações científicas sobre o processamento dos alimentos, como as propriedades termofísicas, necessárias para os cálculos dos processos (MOURA; FRANÇA; LEAL, 2003).

O conhecimento das propriedades termofísicas é essencial para o projeto eficiente e econômico de operações de processamento de alimentos envolvendo transferência de calor (MOURA; FRANÇA; LEAL, 2003). Os cálculos nos projetos de equipamentos aquecedores, resfriadores, evaporadores, separadores e embaladores dos produtos são realizados a partir dos valores das propriedades termofísicas (ARAÚJO; QUEIROZ; FIGUEIREDO, 2004).

O conhecimento das propriedades termofísicas é essencial para o projeto eficiente e econômico de operações de processamento de alimentos envolvendo transferência de calor. Falhas em equipamentos ou no projeto de processos podem ser atribuídas à falta dessas informações quando da seleção inadequada de valores de propriedades termofísicas usadas na análise inicial dos sistemas em estudo (INCROPERA; DEWITT 2003).

Desta forma, para as matérias-primas destinadas à industrialização, que estão sujeitas aos processos de aquecimento e resfriamento é interessante que se determinem suas propriedades termofísicas (ARAÚJO; QUEIROZ; FIGUEIREDO, 2004).

2.4 MODELAGEM MATEMÁTICA

Segundo Ferreira, 2000, modelagem é a operação de modelar; e modelar, por sua vez, significa fazer ou representar por meio de modelo. Dentre os vários significados atribuídos à palavra “modelo”, os que parecem mais próximos de um

contexto matemático estão relacionados à informática, à física e à economia. Por exemplo, em um contexto de informática, modelo seria a representação simplificada e abstrata de fenômeno ou situação concreta, e que serve de referência para a observação, estudo ou análise. Também, segundo Ferreira (2000), um modelo econômico é a representação simplificada de relações entre variáveis econômicas, em geral sob a forma de um sistema de equações, e que, com o uso de técnicas econométricas, pode fornecer simulações ou previsões.

A modelagem matemática é uma ferramenta importante para a engenharia, pois pode contribuir solucionando problemas inerentes aos processos, uma vez que estabelece relação entre as variáveis do processo possibilitando a predição e a interpretação de sistemas, controle de estratégias de desenvolvimento, simulação de comportamento do sistema com diferentes condições operacionais, entre outras (GARCIA, 2009).

Os modelos matemáticos são importantes no projeto de vários equipamentos e também permite a mudança de tecnologia de escala laboratorial para escala industrial. A validação do modelo é feita geralmente através da utilização de dados experimentais (GARCIA, 2009).

A modelagem matemática caracteriza-se essencialmente por utilizar expressões matemáticas teóricas, empíricas e semi-empíricas para a análise dos fenômenos envolvidos em um processo. Dependendo do nível de conhecimento inicial do sistema, o problema de modelagem pode ser abordado de maneiras diferentes. A terminologia modelagem caixa-branca é utilizada quando o sistema é modelado totalmente a partir de leis físico-químicas (modelagem fenomenológica). Os modelos fenomenológicos são, em tese, potencialmente úteis para a adequação da investigação do comportamento de sistemas reais nas mais variadas condições de operação (AGUIRRE, 2007).

2.4.1 Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos são uma representação dos aspectos essenciais de um sistema, que apresentam conhecimento desse sistema em uma forma utilizável (EYKHOFF, 1974). Um modelo consiste em equações, cuja solução, dado um conjunto de dados de entrada é representativa da resposta do processo (DENN,

1986). Um modelo nada mais é do que uma abstração matemática de um processo real (SEBORG; EDGAR; MELLICHAMP, 2004).

A equação ou conjunto de equações que compõe o modelo é uma aproximação do processo real. Dessa forma, o modelo não pode incorporar todas as características tanto macroscópicas como microscópicas do processo real. Deve-se normalmente buscar um compromisso entre o custo de se ter o modelo, isto é, o tempo e o esforço requeridos para obtê-lo e verificá-lo, e o nível de detalhes no mesmo, bem como os benefícios esperados de sua aplicação. O propósito do modelo determina, em última análise, sua precisão. Um processo pode ser físico, químico, biológico, social, econômico, etc. (GARCIA, 2009).

2.4.2 Aplicações da Simulação

Segundo Miyage (2006), a maior disponibilidade de ferramentas de simulação, a crescente capacidade computacional e os avanços nas metodologias de simulação fizeram da simulação uma das técnicas mais usadas e aceitas em tarefas de análise e desenvolvimento de sistemas. É utilizada desde o projeto até a operação de plantas incluindo estudos de viabilidade econômica de processos. Considera-se que a simulação pode ser usada principalmente para as seguintes finalidades:

- Estudar as interações internas de um sistema complexo, ou de um subsistema dentro de um sistema complexo.
- Realizar alterações nas informações, na organização e no ambiente do sistema para observar seus efeitos.
- Experimentar novos projetos ou novos procedimentos antes de implementá-los, e assim estar preparado para o que puder acontecer.
- Identificar as variáveis mais importantes de um sistema e como elas interagem através do estudo dos sinais de entrada e das saídas resultantes.
- Adquirir maior conhecimento sobre o modelo de simulação e sobre o processo de desenvolvimento do modelo para melhorias do sistema.

- Projeto de equipamentos, processos e plantas e seus respectivos sistemas de controle.
- Pré-operação e operação de plantas.
- Sistemas de controle de processos.
- Otimização das condições operacionais de plantas.

2.4.3 Classificação dos Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos são classificados de acordo com o tipo de equação que é usado em sua formulação, conforme descrito por Garcia, 2009:

- Estático x dinâmico

- Estático (ou estacionário): processo cujo valor das variáveis permanece constante no tempo (se as entradas permanecem as mesmas, as saídas ficam inalteradas). Este tipo de modelo não possui “memória”, daí o efeito de uma variável de entrada ser apenas instantâneo. O modelo consiste em um é um sistema de equações algébricas.

- Dinâmico (ou transiente, ou transitório): as variáveis variam no tempo, que é a variável independente. A solução completa consiste dos regimes permanente e transitório. O efeito de um sinal de entrada irá influenciar o comportamento do sistema nos instantes subsequentes. O modelo é um sistema de equações diferenciais ou de diferenças.

- Linear x não linear

Um modelo é linear se a(s) saída (s) depende (m) linearmente da (s) entrada (s) e possíveis perturbações, caso contrário ele não é linear. Equações (e, portanto modelos) são lineares se variáveis dependentes ou suas derivadas aparecem apenas no 1º grau.

- SISO x MISO x MIMO

Modelos SISO (*single input, single output*) se referem a processos onde uma descrição é feita da influência de uma entrada sobre uma saída. Quando mais variáveis estão envolvidas, resulta um modelo multivariável (*MIMO - multiple input, multiple output*).

- Paramétricos x não paramétricos

Um modelo paramétrico utiliza em sua estrutura um conjunto de parâmetros. Neste caso, deve-se designar primeiro uma família de funções com uma determinada estrutura e determinar a ordem dessas funções e o valor de seus parâmetros. Exemplos típicos de modelos paramétricos são funções de transferência (em tempo contínuo ou em tempo discreto) e estados (em tempo contínuo, representados por equações diferenciais, ou em tempo discreto, representados por equações de diferenças).

Uma forma de representar o comportamento dinâmico de um processo é por modelos obtidos através da resposta do processo ao impulso ou ao degrau. Pode-se também obter modelos através da resposta em frequência do processo. Neste caso, os modelos obtidos correspondem a um gráfico ou uma tabela. Este tipo de modelo é denominado não paramétrico.

- Invariantes no tempo x variantes no tempo

Nos modelos invariantes no tempo seus parâmetros não variam ao longo do tempo, o oposto ocorrendo no caso de modelos variantes no tempo. Modelos invariantes no tempo são os mais comuns. Um exemplo de um processo industrial variante no tempo é o caso de um trocador de calor do tipo casco tubo em que ocorre incrustação de material nas paredes do tubo. Neste caso, o coeficiente de transferência térmica entre o casco e os tubos sofre uma variação ao longo do tempo, alterando as características funcionais do trocador de calor.

- No domínio do tempo x no domínio da frequência

Exemplos típicos de modelos no domínio do tempo são equações diferenciais e de diferenças, ao passo que o diagrama de Bode ou de Nyquist e a densidade espectral são exemplos de modelos de domínio de frequência.

- Em tempo contínuo x em tempo discreto

Modelos em tempo discreto descrevem a relação entre as entradas e as saídas em pontos de tempo discreto. Assume-se que esses pontos sejam equidistantes e o tempo entre os dois pontos consecutivos seja usado como unidade de tempo, de forma que o tempo assuma valores. Normalmente os modelos em tempo discreto são descritos por equações de diferença, ao passo que os modelos em tempo contínuo são descritos por equações diferenciais.

- Amplitude contínua x amplitude discreta

No caso de um modelo com amplitude contínua, a magnitude da variável pode assumir qualquer valor dentro de um intervalo. No caso de um modelo com amplitude discreta, a magnitude da variável assume apenas valores distintos no intervalo.

- A parâmetros concentrados x a parâmetros distribuídos

Nos modelos a parâmetros concentrados as variações espaciais são desprezadas, propriedades e estados do sistema são considerados homogêneos em todo o volume de controle. Eles são descritos por um número finito de equações diferenciais ou de diferença ordinárias.

Nos modelos a parâmetros distribuídos variações espaciais são consideradas no comportamento das variáveis. Eles são descritos por um número infinito de equações ordinárias ou por equações diferenciais parciais.

Todo sistema real é distribuído. Se as variações espaciais são pequenas, pode-se aproximar o comportamento do sistema por um modelo a parâmetros

concentrados. Para incluir características temporais e espaciais, devem-se utilizar equações diferenciais parciais ou uma série de estágios com modelos a parâmetros concentrados.

No caso de modelos a parâmetros concentrados, assume-se que as variáveis de interesse sofram alterações como função de apenas uma variável independente (tempo, posição, etc.) dentro do volume de controle. Assim, caso se queira, por exemplo, modelar a temperatura dentro de uma sala, pode-se supor que essa variável seja homogênea em toda a sala e que apenas varie com o tempo. Por outro lado, caso se deseje considerar que a temperatura da sala não seja homogênea e que pode haver, por exemplo, uma variação da temperatura em função do tempo e da cota da sala, tem-se agora um modelo a parâmetros distribuídos. Esta mesma situação distribuída poderia ser também obtida caso se considerasse que a sala fosse dividida em um número infinito de camadas horizontais e que em cada uma delas a temperatura fosse homogênea. Neste caso, o modelo do sistema corresponderia a um sistema com um número infinito de equações diferenciais ordinárias.

- Determinísticos x estocásticos

Em um modelo determinístico a saída pode ser calculada de forma exata tão logo se conheça o sinal de entrada e as condições iniciais. Em contraste, um modelo estocástico contém termos aleatórios que tornam impossível um cálculo exato da saída. Os termos aleatórios do modelo podem ser encarados como uma descrição das permutações. Normalmente, o modelo determinístico engloba apenas o processo, enquanto o estocástico considera também as perturbações e ruídos.

2.4.4 Obtenção de Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos podem ser obtidos através de formas teóricas, empíricas ou heurísticas, por analogia ou pela combinação delas. Pode-se ainda combinar os métodos teóricos e empíricos, aplicando-se técnicas de identificação para estimar os parâmetros desconhecidos de modelos gerados teoricamente.

2.4.4.1 Modelos Teóricos

Este tipo de modelo é desenvolvido aplicando-se os princípios básicos da física e/ou química. Neste caso, divide-se o sistema em subsistemas, cujas propriedades sejam bem compreendidas de experiências anteriores. Isso basicamente significa que se empregam “leis da natureza” (relações do sistema que correspondem a leis básicas da física, como as de Newton, e equações de balanço) e outras relações bem definidas que são baseadas em trabalhos experimentais (relações constitutivas). Esses subsistemas são então agregados matematicamente e um modelo do sistema completo é obtido. Essa opção é conhecida como modelagem fenomenológica (ALMEIDA; SILVA; VERTUAN, 2011).

Ao se desenvolver um modelo teórico há necessidade de se conhecer certos parâmetros de processo, os quais usualmente devem ser avaliados a partir de experimentos feitos no processo ou então obtidos de dados operacionais do mesmo. Na modelagem fenomenológica modela-se normalmente o processo propriamente dito. No entanto, é mais difícil se obter os modelos das perturbações, que são igualmente importantes. Esses modelos frequentemente precisam ser obtidos a partir de experimentos. Como modelos para perturbações raramente podem ser determinados a partir de princípios básicos, significa que frequentemente a única forma de obter modelos para as perturbações é experimentalmente (ALMEIDA; SILVA; VERTUAN, 2011).

2.4.4.2 Modelos empíricos ou heurístico

São baseados na observação direta dos dados operacionais do processo obtidos através de experimentação (relações de causa e efeito correlacionando dados de entrada e saída do processo). Neste caso, sinais de entrada e de saída do sistema são registrados e submetidos a uma análise para se inferir um modelo. Esta opção é intitulada identificação de sistemas. Na construção de modelos empíricos, os modelos são determinados efetuando-se pequenas alterações nas variáveis de entrada em torno de uma condição nominal de operação. A resposta dinâmica resultante é usada para determinar o modelo. Esse procedimento gera modelos experimentais do processo válidos em alguma região em torno das condições

experimentais em que os dados de entrada e saída do processo foram medidos (SODRÉ, 2007).

2.4.4.3 Modelos por Analogia

São baseados em equações que descrevem um sistema análogo, com as variáveis identificadas por analogia em base individual. Esta analogia é que permite o emprego de computadores analógicos (elétricos) para simular sistemas de outras áreas da Engenharia (mecânicos, térmicos, hidráulicos, etc.) (GARCIA, 2009).

2.4.5 Comparação de Modelos Teóricos e Empíricos

Os modelos empíricos obtidos através da identificação de sistemas possuem as seguintes propriedades, em contraste com modelos teóricos baseados em modelagem fenomenológica (GARCIA, 2009):

- Eles possuem uma faixa de validade mais limitada (são válidos para um determinado ponto de operação, um determinado tipo de entrada, um determinado processo, etc.), ao passo que modelos fenomenológicos normalmente tem uma faixa de validade mais ampla. Caso o processo seja não-linear, os modelos obtidos empregando-se técnicas de identificação de sistemas são válidos em uma faixa estreita, próxima ao ponto no qual foram obtidos. Assim, os modelos teóricos frequentemente podem ser extrapolados sobre uma faixa maior de condições operacionais, além de permitirem inferir o valor de variáveis de processo não medidas ou incomensuráveis.
- Eles fornecem informações apenas sobre as variáveis de saída que foram utilizadas em sua construção. Se outras variáveis de interesse do sistema forem necessárias, é preciso medi-las e reconstruir o modelo empírico ou então usar um modelo teórico, que forneça as informações acerca de todas as variáveis de estado do sistema.
- Eles fornecem pouca visão física do processo, visto que, na maioria dos casos, os parâmetros do modelo não possuem significado físico direto. Os parâmetros são usados apenas como ferramentas para dar uma boa descrição do comportamento global do sistema.

- Eles são relativamente fáceis de construir, sendo normalmente mais difícil gerar modelos fenomenológicos. O desenvolvimento de modelos teóricos rigorosos pode não ser prático para processos complexos, se o modelo requer um grande número de equações diferenciais com um número significativo de parâmetros conhecidos (por exemplo, propriedades físicas e químicas). Ao se gerar modelos de processos a partir de princípios fundamentais, pode-se chegar a modelos extremamente complexos. Portanto, modelar processos de forma mais realista requer um grande esforço para formular as equações, determinar todos os valores dos parâmetros e resolver as equações, usualmente através de métodos numéricos. Esse esforço é justificado quando previsões muito precisas das respostas dinâmicas válidas em uma larga faixa de operação do processo são necessárias.

Em muitos casos, os processos são tão complexos que não é possível se obter modelos razoáveis usando apenas uma abordagem física ou química, empregando princípios básicos. Nesses casos, técnicas de identificação de sistemas podem ser usadas para obter modelos empíricos do tipo “caixa preta” diretamente a partir de dados experimentais. É frequente acontecer que um modelo baseado em princípios físicos contenha um certo número de parâmetros desconhecidos, mesmo que a estrutura tenha sido derivada de leis da física e da química. Métodos de identificação podem ser aplicados para estimar os parâmetros desconhecidos, constituindo um modelo tipo “caixa branca” (GARCIA, 2009).

Os modelos desenvolvidos usando-se a identificação de sistema fornecem relações dinâmicas entre variáveis selecionadas de entrada e saída. Assim, os modelos empíricos obtidos através da identificação, embora úteis para as necessidades específicas de controle de processos, não fornecem informações suficientes para satisfazer todos os requisitos de projeto e análise dos processos e não podem substituir modelos fenomenológicos para todas as aplicações (GARCIA, 2009).

Vale a pena ressaltar uma distinção muito importante entre ambas as formas de se obter modelos: no caso da modelagem fenomenológica, o desenvolvimento do modelo está condicionado ao conhecimento que o pesquisador tem acerca dos fenômenos (físicos, químicos, biológicos, etc.) que ocorrem no processo, devendo conhecer seus princípios básicos. Dessa forma, não é obrigatória a existência de uma planta de referência para se coletar dados experimentais. Por outro lado, quando se trabalhar com identificação de sistemas, como os modelos são gerados a

partir de dados coletados experimentalmente, é imprescindível a existência de uma planta real para a coleta dos mesmos (GARCIA, 2009).

Dessa forma, caso se vá modelar um processo que já exista, podem-se aplicar ambas as técnicas. Caso se pretenda modelar um processo que ainda esteja sendo projetado ou implementado a única opção é empregar a modelagem fenomenológica (GARCIA, 2009).

2.4.6 Forma Teórica de Obtenção de Modelos Matemáticos

2.4.6.1 Modelagem física

De acordo com Trivelato (2003), um modelo físico representa um sistema físico imaginário que se assemelha ao sistema real em suas características mais marcantes, mas que é mais simples (uma idealização) e, portanto, é mais propício ao estudo. A habilidade para simplificar, a ponto de não se invalidar o modelo, é o ponto crucial em sua elaboração. Os seguintes tipos de aproximação são passíveis de utilização na maioria dos problemas

- Desprezar pequenos efeitos;
- Assumir que o ambiente em torno do sistema não seja afetado por ele (ambiente independente);
- Substituir características distribuídas por concentradas;
- Assumir relações lineares de causa e efeito entre variáveis físicas;
- Assumir que os parâmetros físicos não variem com o tempo;
- Desprezar incertezas e ruídos.

2.4.6.2 Equações de movimento

Um ponto importante a ser considerado na geração das equações de um modelo é a relação das variáveis físicas que descrevam o estado instantâneo de um sistema. Outro ponto essencial ao se derivar as equações de um modelo é escrever as relações de equilíbrio para descrever o balanço das forças, de vazões, de energia do sistema, ou então escrever relações de compatibilidade do sistema para descrever como os movimentos dos elementos do sistema estão inter-relacionados

devido ao modo como eles estão interconectados. As relações de equilíbrio ou de compatibilidade são relações entre elementos ou relações do sistema (GARCIA, 2009).

O último ponto relevante é a aplicação das leis físicas que regem o movimento dos elementos do sistema: relações mecânicas entre força e movimento, relações elétricas entre corrente e tensão, etc. Essas relações são chamadas relações físicas constitutivas, pois se referem apenas aos elementos individuais ou constitutivos do sistema. Finalmente, quando a seleção de variáveis, as relações do sistema (equilíbrio ou compatibilidade) e as leis físicas (relações constitutivas) foram consideradas individualmente, as relações resultantes são combinadas algebricamente em um conjunto compacto de equações de movimento, as quais em última análise, correspondem ao modelo desejado (GARCIA, 2009).

Um modelo de regressão seja linear ou não linear consiste de uma parte determinística e uma parte estocástica. A parte determinística representa a relação entre a variável resposta e as variáveis explanatórias, e a parte estocástica representa o quanto a resposta esperada se desvia da resposta observada ou a real. Resta obter os parâmetros estimados por meio de dados experimentais que devem ser ajustados para minimizar a diferença entre a resposta observada e a prevista pelo modelo (McMEEKIN *et al*, 1993).

2.4.6.3 Modelo probabilístico

É um modelo direcionado para o conhecimento das condições em que um determinado evento possa ocorrer, descrevendo a probabilidade em que estas condições possam ser definidas (fronteiras, combinações, temperatura, atividade de água, pH, etc.) (BASSANEZI, 2002).

2.4.6.4 Modelos cinéticos

Correspondem à modelagem da extensão e velocidade de crescimento ou de destruição de micro- organismos de interesse (NAKASHIMA; ANDRÉ; FRANCO, 2000).

Estes modelos poderiam ser do tipo empírico (descrevem um conjunto de dados através de relação matemática conveniente), ou determinístico (fornecem interpretação dos parâmetros em termos de fenômenos e processos conhecidos) (McMEEKIN *et al*, 1993).

2.5 SECAGEM

A secagem de sólidos é uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas nos mais diversos processos usados em indústrias. É também uma das operações mais complexas e menos entendida, devido à dificuldade e deficiência da descrição matemática dos fenômenos envolvidos de transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento, baseado em extensiva observação experimental e experiência operacional (MENON; MUJUMDAR, 1987).

A operação é utilizada para facilitar o carregamento, descarregamento e transporte pneumático. Ela é utilizada também para reduzir os custos de transporte de matérias primas, aumentar o valor de uma *commodity*, para aumentar a vida de prateleira do produto ou para simplesmente cumprir especificações no que diz respeito a uma matéria-prima ou a um produto (LINDEMANN; SCHMIDT, 2010).

A qualidade do produto seco, a quantidade de energia gasta e o tempo utilizado neste processo são parâmetros primordiais para a rentabilidade do item submetido a esta operação (PACHECO, 2010).

A secagem é a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, água) de um produto sólido. A quantidade de água presente no sólido é chamada de umidade (PARK *et al*, 2007). A secagem é feita mediante a passagem de uma corrente de ar atmosférico aquecido pelo corpo úmido a temperatura e umidade fixas, por uma combinação de transferências de calor (para evaporar o líquido) e massa (para remover a umidade dentro do corpo), de forma a reduzir a quantidade de água presente no corpo (FOUST, 2008).

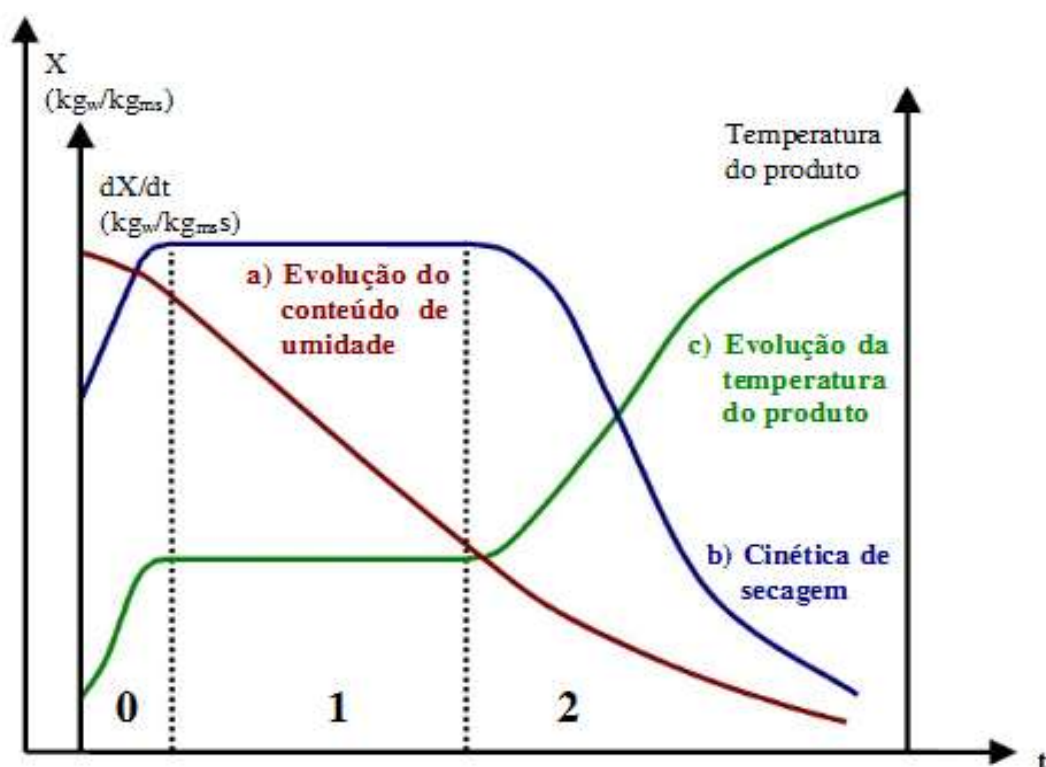
Observa-se que fenômenos ocorrem simultaneamente, transferência de energia (calor) do ambiente para evaporar a umidade superficial. Esta transferência depende de condições externas de temperatura, umidade do ar, fluxo e direção de ar, área de exposição do sólido (forma geométrica) e pressão. A transferência de massa (umidade) ocorre do interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo. O movimento interno da umidade no

material sólido é função da natureza física do sólido, sua temperatura e conteúdo de umidade. Esse processo manifesta-se sob um comportamento típico, que pode ser observado na curva de secagem. Cada sólido possui uma curva característica (PARK *et al*, 2007).

A evolução das transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da secagem faz com que esta operação seja delineada em sub-curvas, denominadas respectivamente de curva de evolução do teor de água do produto (X), curva de sua temperatura (T) e curva da velocidade de secagem (dX/dt), também chamada de taxa de secagem, ao longo do tempo, para um experimento utilizando ar com propriedades constantes (PARK *et al*, 2007).

A Figura 2 demonstra o comportamento das curvas de secagem e tempo durante um experimento a propriedades constantes.

Figura 2. Comportamento das curvas de secagem/tempo durante um experimento a propriedades constantes.



Fonte: Park *et al*, 2007

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem (conteúdo de umidade do produto, $X = X_{BS}$, onde BS significa base seca, em relação à evolução do tempo de secagem (t), isto é, a curva obtida pesando o

produto durante a operação em uma determinada condição de secagem (PARK *et al*, 2007).

A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto (variação do conteúdo de umidade do produto por tempo, dX/dt em relação à evolução do tempo t) (PARK *et al*, 2007).

A curva de velocidade de secagem resulta da derivação da curva de secagem em relação à quantidade de umidade, e pode ser dividida em período de taxa constante de secagem e período de taxa decrescente de secagem.

- Período de taxa constante de secagem: é o representado pelo segmento “1” (Figura 2). No período de taxa constante, a superfície do material é mantida num nível de umidade tal que a secagem ocorre como se fosse água pura evaporando. Se o material for poroso, a maioria da água evaporada no período de taxa constante é proveniente do interior do sólido. Este período só continua desde que a água seja provida à superfície tão rápido quanto é evaporada (PARK *et al*, 2007).

- Período de Taxa Decrescente de Secagem: Este período compreende o segmento “2” (Figura 2). Quando a quantidade de água na superfície do produto começa a diminuir há o abaixamento progressivo da pressão parcial de vapor da água na superfície e, conseqüentemente, a velocidade de secagem também diminui, até que, ao final desse período, o produto está em equilíbrio com o ar (igualdade de pressões parciais de vapor) e a velocidade de secagem torna-se nula (PARK *et al*, 2007).

A curva (c) na Figura 2 representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto, T , em relação à evolução do tempo, t), isto é, é a curva obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem (PARK *et al*, 2007).

2.5.1 Cinética de Secagem

A investigação da secagem e o cálculo das dimensões do equipamento de secagem devem levar em conta vários problemas nas áreas de mecânica dos fluidos, da química, das superfícies e da estrutura dos sólidos, além dos problemas de velocidade de transferência de energia (FOUST, 2008).

Em muitos casos, o projeto perfeitamente cotado do secador é impossível de se obter, pois estes fenômenos físico-químicos são muito complicados e imperfeitamente compreendidos (FOUST, 2008). Portanto, a escolha de um método de secagem deve ser baseada inteiramente no processo, na matéria-prima, produtos intermediários, especificações e características do produto final, os quais devem estar claramente definidos (DIAZ, 2009).

A cinética de secagem deve ser completamente descrita usando propriedades do meio de secagem e do material, tais como as propriedades de transporte (condutividade térmica, difusividade, coeficiente de transferência de calor, entre outros). A simulação de modelos para descrever a cinética de secagem pode ser usada para projetar novos modelos ou para o controle e implementação de sistemas já existentes (KARATHANOS; BELESSIOTIS, 1999).

Para os casos onde é proposto que o movimento da umidade num sólido ocorre por difusão em fase líquida, a 2ª Lei de Fick pode ser aplicada para prever a velocidade do movimento da umidade conforme demonstrado na Equação 1.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \nabla^2 X \quad (1)$$

onde:

t – tempo (s)

D_{ef} – coeficiente de difusão efetivo do líquido (m²/s);

∇^2 – laplaciano

X – umidade média do sólido no instante t , em base seca (kg água/kg sólido seco);

Na secagem, é importante conhecer o comportamento da difusão das moléculas. Os valores dos coeficientes de difusão efetivo (D_{ef}), permitem um estudo quantitativo das características de secagem em relação às variáveis experimentais controladas tais como temperatura (CAVALCANTE, 2003).

As simplificações assumidas para a resolução da Equação 1 para muitos casos não condizem com a realidade, pois os sólidos não têm uma estrutura celular homogênea, a transferência não é unidirecional, a difusão pode ocorrer sob vários

mecanismos simultâneos (na fase gasosa, e/ou na líquida, em poros de vários tamanhos), as temperaturas dos materiais aumentam durante o processo e ocorre o encolhimento com a evaporação da água. A teoria de LUIKOV (1968) estabelece o fenômeno da difusão térmica de umidade e constata que o gradiente de temperatura estabelecido é também um fator que promove a transferência de umidade do material (MUJUMDAR, 1995).

Os pesquisadores Barrozo, Sartori e Freire (1998) ressaltam a importância do conhecimento das equações de secagem para o sucesso de projetos de secadores.

De acordo com Piaia (2009), verifica-se que as equações de secagem puramente empíricas são boas opções para a predição do processo de secagem, dentro das condições operacionais para as quais foram estabelecidas. Para modelar o funcionamento de secadores, os fatores significativos que são considerados nos modelos podem ser classificados em:

- Propriedades físicas dos sólidos: tamanho, forma, densidade e teor de umidade da partícula;
- Condições de operação: fluxo e temperatura de alimentação, temperatura, velocidade e umidade.

2.5.2 Umidade de Equilíbrio

Define-se umidade de equilíbrio como sendo o teor de umidade de um material depois de exposto a um ambiente em condições de temperatura e umidade relativas (UR) controladas, após um determinado intervalo de tempo (PIAIA, 2009).

A isoterma de sorção de umidade de um material é a representação gráfica do seu teor de umidade de equilíbrio como uma função da umidade relativa do ambiente no qual a amostra foi inserida (ou da atividade de água), a uma determinada temperatura. As isotermas podem ser de adsorção ou de dessorção, conforme a determinação do teor de umidade final do produto tenha sido medida ao longo de um processo de umidificação ou de secagem, respectivamente (TEIXEIRA NETO, 1987).

A umidade relativa do ambiente consiste na relação entre a pressão parcial de vapor do produto e a de saturação, no equilíbrio. Ela consiste na atividade de água (a_w) conforme mostra a Equação 2:

$$a_w = \frac{p_v}{p_{sat}} = UR \quad (2)$$

onde:

p_v – Pressão de vapor da água (Pa);

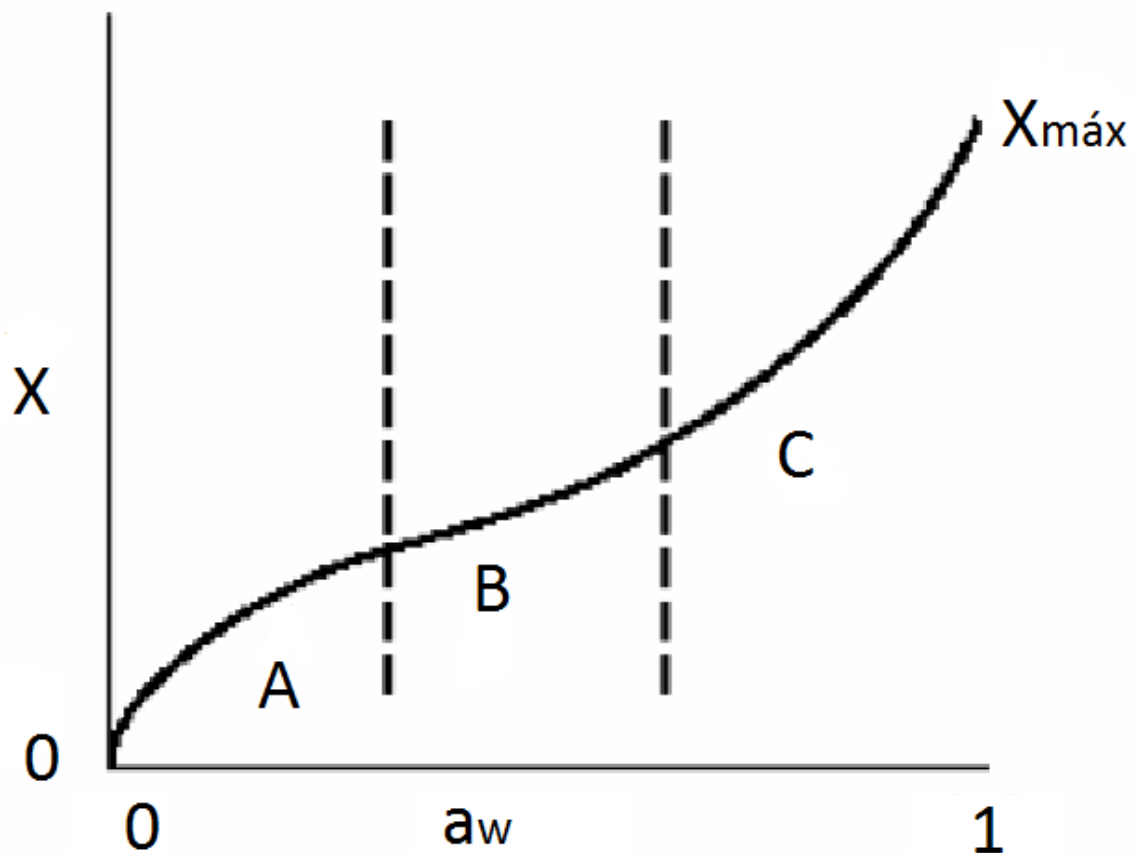
p_{sat} – Pressão de saturação de vapor de água (Pa);

UR – Umidade relativa do ambiente.

O conhecimento das isotermas de sorção é muito importante na concentração, desidratação e secagem de materiais diversos, na previsão de estabilidade química, enzimática e microbiológica, na seleção de material de embalagem, bem como na determinação da qualidade e tempo de vida de prateleira dos alimentos (CAVALCANTE, 2003).

A Figura 3 apresenta a curva típica característica das isotermas de adsorção de muitos produtos desidratados.

Figura 3. Representação geral de uma isoterma de adsorção.



Fonte: Mujumdar, 2006.

Uma isoterma de adsorção pode apresentar três regiões dependendo da condição da água presente, de acordo com Fortes e Okos (1980).

Na região A, a água está altamente ligada a sítios individuais e não está disponível para reações. Nesta região, na curva côncava para o eixo de a_w , está contida a umidade associada à adsorção da primeira camada de vapor de água na superfície do material adsorvente (monocamada). A energia de ligação depende da superfície do material, de sua estrutura e de seus constituintes químicos, além das propriedades físicas e químicas da água. Situa-se numa faixa de atividade de água entre 0 e 0,35.

Já na região B, a água encontra-se mais fracamente ligada. Representa a adsorção nas camadas adicionais acima da monocamada e compreende uma faixa de 0,35 e 0,60 de atividade de água. A energia envolvida é predominantemente a de condensação.

Finalmente, na Região C, a água está presente em grandes capilares. Representa a região de condensação capilar, onde a umidade condensa nos poros do material, seguida pela dissolução de componentes solúveis presentes.

As isotermas de sorção são representadas em forma de gráficos a partir dos dados experimentais e podem ser ajustadas por vários modelos empíricos ou teóricos. Modelos matemáticos nem sempre simples têm sido utilizados para descrever as isotermas de sorção de um grande número de produtos naturais (MOLINA-FILHO *et al*, 2006).

Para o ajuste matemático dos dados experimentais das isotermas é necessário utilizar modelos e fazer a correspondência entre o teor de umidade do produto analisado, fornecendo informações importantes sobre o fenômeno de dessorção, como a água absorvida na monocamada molecular ou o calor de dessorção, para as camadas subsequentes (ORDONEZ, 2005).

Neste capítulo foi apresentada uma breve revisão de literatura sobre o processamento tecnológico da carne detalhando o processo de fabricação da linguiça tipo calabresa e suas propriedades termofísicas, abordou-se também a importância do controle estatístico para a melhoria de um processo.

Também foi apresentada uma breve revisão sobre modelagem matemática e a operação de secagem, conceitos estes utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.

CAPITULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia consistiu em utilizar o processo de cozimento de linguiça tipo calabresa a fim de se obter parâmetros e consequentemente desenvolver o modelo matemático. Na primeira etapa do trabalho, desenvolveu-se um estudo referente ao cozimento da linguiça tipo calabresa nas estufas. Foram avaliados parâmetros como velocidade do ar, velocidade da fumaça, perfil de temperatura no interior das estufas de cozimento. Além disso, foram determinadas as principais propriedades termofísicas do produto como condutividade, resistividade e difusividade térmica.

A etapa posterior consistiu na construção do modelo matemático e avaliar a capacidade do modelo de prever o comportamento do produto no interior da câmara de cozimento e, consequentemente validar o modelo desenvolvido.

3.1 PRODUTO – LINGUIÇA TIPO CALABRESA

Foi utilizado um produto cárneo embutido (linguiça tipo calabresa) *in natura*, com geometria cilíndrica de comprimento de 23 cm a 26 cm e diâmetro de 40 mm a 44 mm obtido em um frigorífico do oeste.

3.1.1 Análises Físico-Químicas

As análises de umidade, gordura, proteína, cinzas e carboidratos foram realizadas em triplicata.

3.1.1.1 Análise de umidade

As cápsulas (cadinhos) para acondicionar as amostras foram pesadas e colocadas em estufa a 105 °C durante 1 hora. Após isso, as cápsulas foram dessecadas e pesou-se 2 gramas de amostra. As cápsulas com as amostras foram levadas a estufa, mantida a temperatura de 105 °C, por cerca de 3 horas. Após, foram esfriadas em dessecador e pesadas. Foi repetida a operação de pesagem de hora em hora, até obtenção de peso constante. O resultado do teor de umidade foi obtido por gravimetria. As pesagens das amostras foram feitas rapidamente assim

como a secagem foi conduzida de forma que não ocorressem danos à amostra (AOAC, 2000).

3.1.1.2 Análise de gordura

As amostras foram pesadas e secas em estufa a 105 °C por 2 horas, reduzindo ao máximo a água da amostra. Cada amostra seca e fragmentada foi transferida para os cartuchos de extração com auxílio de um bastão de vidro e uma porção de algodão desengordurado. Os balões foram deixados por 1 hora em estufa a 105 °C, esfriados em dessecador e pesados. As amostras foram submetidas ao método Soxhlet, que consiste na solubilização de compostos apolares através do volume de um solvente orgânico sobre uma bateria de extração. A extração com solvente foi feita por um período de 6 horas. A evaporação do solvente foi feita em banho-maria a 65 °C e os balões com os resíduos foram acondicionados em estufa a 105 °C por 1 hora. Após isso os mesmos foram esfriados em dessecador e pesados. A operação foi repetida até que fosse obtido peso constante. Em seguida foram efetuados os cálculos para determinação de gordura (BRASIL, 1981).

3.1.1.3 Análise de proteína

A amostra sofre uma digestão oxidativa com oxigênio a aproximadamente 900-1200 °C. O gás é arrastado com auxílio de hélio e purificado (incluindo a remoção da água). Os óxidos de nitrogênio formados são reduzidos a nitrogênio elementar pelo contato com metal quente (tungstênio ou cobre), o qual é determinado quantitativamente por detector de condutividade térmica. O conteúdo de nitrogênio é multiplicado pelos fatores de conversão específicos para proteína em produtos cárneos. O procedimento seguiu uma ordem onde primeiramente foram pesados de 150 mg a 300 mg de amostra em folha de estanho. As amostras foram pesadas e levadas para pré secagem em estufa a 105 °C por 30 minutos para retirar o excesso de umidade. A folha de estanho foi fechada adequadamente retirando-se o ar da embalagem. Em seguida a amostra foi introduzida no equipamento. Os dados de identificação e massa foram alimentados no sistema. Os parâmetros de operação do equipamento de combustão como temperatura do forno, fluxo de

oxigênio e valores de calibração entre outros foram ajustados. Estabilizou-se a temperatura do forno. Foi obtida a curva de calibração, determinando-se no mínimo 3 pontos. Realizou-se a leitura do teor de nitrogênio diretamente no equipamento (AOAC, 2007).

3.1.1.4 Análise de cinzas

Resíduo por incineração ou cinzas é o nome dado ao resíduo obtido por aquecimento de um produto em temperatura próxima a 550 – 570 °C. Nem sempre este resíduo representa toda a substância inorgânica presente na amostra, pois alguns sais podem sofrer redução ou volatilização nesse aquecimento. Geralmente, as cinzas são obtidas por ignição de quantidade conhecida da amostra. Algumas amostras contendo sais de metais alcalinos que retêm proporções variáveis de dióxido de carbono nas condições da incineração são tratadas, inicialmente, com solução diluída de ácido sulfúrico e, após secagem do excesso do reagente, aquecidas e pesadas. O resíduo é, então, denominado “cinzas sulfatizadas”. Muitas vezes é vantajoso combinar a determinação direta de umidade e a determinação de cinzas, incinerando o resíduo obtido na determinação de umidade. A determinação de cinzas insolúveis em ácido, geralmente ácido clorídrico a 10% (v/v), fornece uma avaliação da sílica existente na amostra (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2005).

3.1.1.5 Análise de carboidratos

O cálculo para carboidratos utilizado para a análise foi de diferença de 100%, subtraído dos percentuais de umidade, proteína, gordura e cinzas (BRASIL, 2000).

3.1.2 Análises Sensoriais

Segundo Dutcoski (2011), buscando a qualidade de seus produtos a indústria alimentícia vem aplicando testes de diferença, que podem ser classificados em testes de diferença e testes de similaridade que indicam se existe ou não diferença entre as amostras.

Em um teste de diferença, a tarefa é encontrar a resposta se existe diferença sensorial significativa entre duas amostras. Este é um cenário com que a indústria se depara em diversas situações – por exemplo, quando um produto é reformulado com um novo ingrediente ou fornecedor, ou houve uma alteração no processo industrial e o fabricante quer se assegurar de que o produto mantenha o mesmo padrão sensorial original (DUTCOSKI, 2011).

A análise sensorial realizada através de testes discriminativos permite identificar diferenças significativas entre amostras ou entre uma amostra e um padrão. O teste discriminativo de Comparação Pareada tem por finalidade determinar a diferença ou preferência entre dois produtos, com relação a um atributo ou critério pré-definido. Este teste é uma das formas mais simples, fáceis e seguras para determinação de diferenças e similaridades (TEIXEIRA; MAINERT; BARBETA, 1987).

Os julgadores realizaram as avaliações das amostras baseadas em atributos gerais e específicos. Dentre os atributos gerais avaliou-se o sabor, textura, aparência interna, aparência externa antes do preparo e odor antes do preparo.

Para cada atributo geral definido, foram correlacionados alguns atributos detalhados, denominados como atributos específicos, conforme abaixo:

- Sabor: Defumado, gosto salgado
- Textura: Maciez na mastigação, suculência e textura de carne
- Aparência interna: Integridade da fatia no corte
- Aparência externa antes do preparo: Cor acastanhada
- Odor antes do preparo: Defumado

3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE ELABORAÇÃO DA LINGUIÇA TIPO CALABRESA

A produção das linguças tipo calabresas é realizada em um ambiente controlado com temperatura entre 10°C e 12°C. O processo inicia com o recebimento e inspeção das matérias-primas as quais são inspecionadas com o intuito de remover defeitos aparentes. Após a inspeção as mesmas são pesadas de acordo com a formulação do produto e direcionadas para moedores, cuja função é

garantir a granulometria desejada para cada matéria-prima antes de ser enviada para a próxima etapa do processo.

Após a moagem das matérias-primas é realizada a mistura sob vácuo para evitar incorporação de ar na massa e variação de densidade da mesma em um equipamento denominado misturadeira com rotação e sentido das pás previamente reguladas. Neste equipamento é realizada a adição dos insumos a fração cárnea a fim de garantir que os condimentos e insumos estejam dissolvidos e homogeneizados.

O teor de gordura presente na carne está diretamente ligado à densidade da massa, ou seja, quanto maior a porcentagem de gordura, menor será a densidade da massa. É realizada a verificação do teor de gordura da massa através do método de densidade a fim de se garantir um produto com teor de gordura padronizado antes de ser encaminhado para as demais etapas do processo.

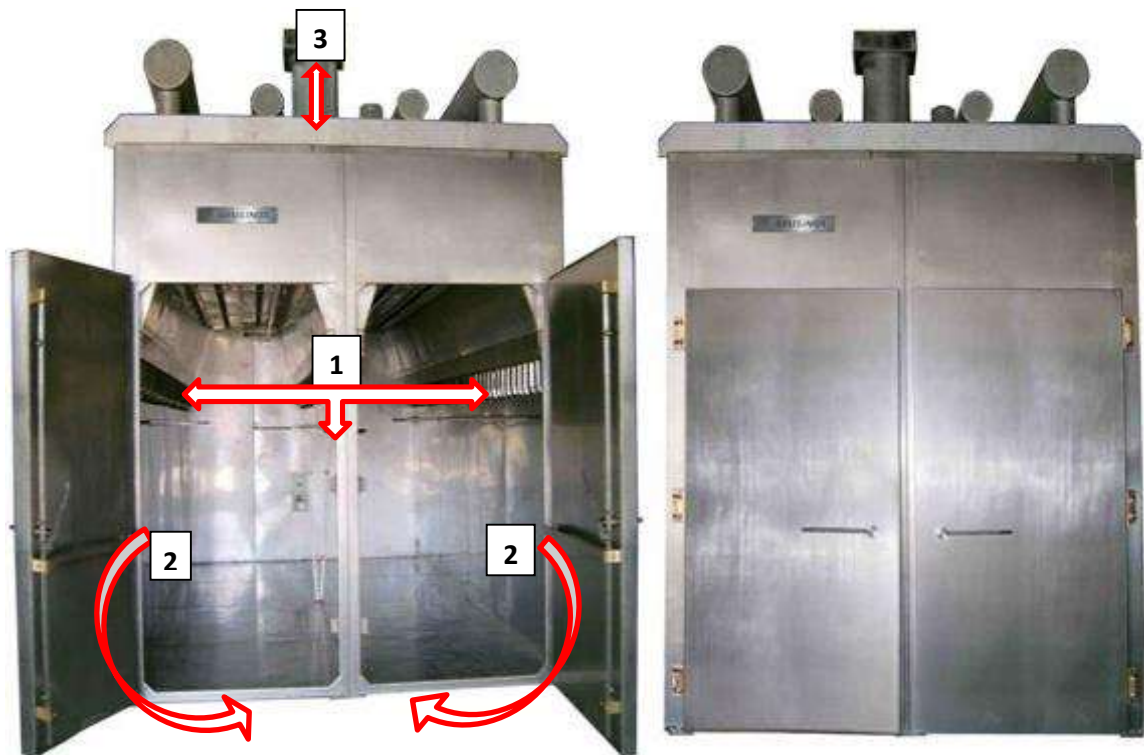
A massa assim denominada, é direcionada para o setor de embutimento que tem a finalidade de colocar a massa em seu envoltório para posterior cozimento em equipamentos denominados embutideiras, que trabalham sob vácuo para evitar incorporação de ar na massa e variação de densidade da mesma. Como o processo de dosagem é realizado através de volume e não de peso, a precisão do equipamento é determinada pela variação de densidade da massa sendo o nível de vácuo conferido a cada hora.

O produto, ao ser recebido na etapa de cozimento, é pesado e direcionado para as estufas, local em que será realizado o processo de cozimento. Após ser cozido, o produto é então novamente pesado a fim de ser calculada a quebra de cozimento, que é a diferença do peso de entrada e saída do produto, o qual, entre outras funções, garante a segurança microbiológica do mesmo.

O processo de cozimento compreende cinco estufas as quais operam com os mesmos parâmetros de tempo e temperatura com a função de garantir as características sensoriais, físico químicas e microbiológicas do produto.

A Figura 4 apresenta as estufas de cozimento utilizadas neste estudo.

Figura 4. Diagrama esquemático das estufas de cozimento.



Fonte: Brusinox, 2014.

onde:

- 1 – Dutos de entrada de ar e fumaça
- 2 – Fluxo de circulação do ar e fumaça no interior da estufa
- 3 – Sistema de exaustão

3.2.1 Determinação do Teor de Gordura

A densidade relativa é característica de cada corpo sólido e depende basicamente de dois fatores, dos elementos químicos que constituem o corpo sólido e da maneira como estes elementos estão arranjados dentro da estrutura cristalina.

A densidade absoluta é definida como a quantidade de massa em uma unidade de volume sendo expressa, segundo o sistema internacional de unidades, em Kg/m^3 , e mais comumente usada em g/cm^3 . A densidade absoluta é uma propriedade específica, isto é, cada substância pura tem uma densidade própria,

que a identifica e a diferencia das outras substâncias. A densidade relativa de um material é a relação entre a sua densidade absoluta e a densidade absoluta de uma substância estabelecida como padrão. No cálculo da densidade relativa de sólidos e líquidos, o padrão usualmente estabelecido é a densidade absoluta da água, que é igual a 1,00 g/cm³ a 4,0 °C.

Segundo o Princípio de Arquimedes, um fluido em equilíbrio age sobre um corpo sólido nele imerso (parcial ou totalmente) com uma força vertical orientada de baixo para cima, denominada empuxo, aplicada no centro de gravidade do volume de fluido deslocado, cuja intensidade é igual a do peso do volume de fluido deslocado. A densidade de um corpo sólido pode ser definida como a relação entre a massa do corpo sólido e a massa de um volume igual de líquido conforme demonstrado na Equação 3.

$$E = P_{\text{água}} \quad (3)$$

onde $P_{\text{água}}$ é o peso de líquido deslocado.

Com a densidade da massa calculada e da gordura química determinada em laboratório, desenvolveu-se a curva de calibração a fim de se obter a equação da reta, a qual foi empregada no controlador lógico programável (CLP). Essa equação foi obtida através do gráfico de dispersão XY, onde no eixo X foram plotados os valores de densidade (g/cm³) e, no eixo Y, o percentual de gordura química. As amostras preparadas para construção da curva foram formuladas variando o teor de gordura em aproximadamente 1% entre as amostras.

Através da análise estatística de variância dos resultados obtidos entre as análises de gordura teórica e as análises físico-químicas foi possível avaliar os dados obtidos, a fim de se verificar a precisão da equação utilizada.

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROCESSO DE COZIMENTO DE LINGUIÇA TIPO CALABRESA

O controle estatístico de processo é uma das mais poderosas metodologias desenvolvidas visando auxiliar no controle eficaz da qualidade. Através de cartas ou gráficos de controle, podem-se detectar desvios de parâmetros representativos do

processo, reduzindo a quantidade de produtos fora de especificações e consequentemente os custos de produção. A análise de gráficos de controle permite que se determine se um dado processo é estável, ou seja, se não há presença de causas especiais de variação atuando sobre o mesmo. Para um processo ser considerado estatisticamente estável, os pontos nos gráficos de controle devem distribuir-se aleatoriamente em torno da linha média sem que haja tendências crescentes ou decrescentes, ciclos ou pontos fora de controle (RAMOS, 2000).

Um processo estável ou sob controle estatístico apresenta previsibilidade. Depois da estabilização de um processo, a análise sobre a capacidade do mesmo proporcionará as diretrizes para a tomada de decisão como a mudança ou não do sistema produtivo (SANTOS; BATISTA, 2005).

Verificada a estabilidade do processo, pode-se quantificar sua capacidade empregando índices de capacidade (BOTHE, 1997). Basicamente, o estudo da capacidade visa verificar se o processo consegue atender às especificações, ou não (RAMOS, 2003). Montgomery (2004) cita as principais utilizações da análise de capacidade, isto é, prever até que ponto o processo manterá as tolerâncias, auxiliará os elaboradores e planejadores do produto na seleção ou modificação de um processo, especificará exigências de desempenho para um equipamento novo, planejar a sequência de processos de produção quando há um efeito interativo de processo sobre as tolerâncias e reduzirá a variabilidade em um processo de fabricação.

A verificação da capacidade do processo em atender com segurança as especificações são demonstradas pelos índices de capacidades. O Minitab é um poderoso sistema computacional que fornece uma gama de opções para análise estatística de dados além de se caracterizar pela simplicidade de uso e pela exatidão com que as técnicas estatísticas foram implementadas.

3.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA LINGUIÇA COZIDA

As propriedades (condutividade térmica, resistividade e difusividade térmica) foram avaliadas em diferentes posições na linguiça ao longo do processo de cozimento de acordo com o estudo realizado por Silva (2011).

Para a determinação dessas propriedades, Silva (2011) utilizou um analisador de propriedades térmicas (Decagon Inc., modelo KD2) cuja teoria de operação é baseada no cálculo dos valores de condutividade, resistividade e difusividade térmica através do acompanhamento da dissipação de calor de uma fonte de calor a uma determinada linha de tensão conhecida.

O princípio de funcionamento baseia-se na metodologia de fio quente, em que os valores de k (condutividade térmica) e α (difusividade térmica) são obtidos através da solução da Equação de condução de calor em coordenadas cilíndricas em um meio homogêneo, (Equação 4) (FONTANA *et al*, 2001):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + r^{-1} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4)$$

onde T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), t é o tempo (s), α é a difusividade térmica (m^2s^{-1}) e r é a distância radial (m).

Quando uma fonte de calor de natureza elétrica é introduzida no meio cujas propriedades desejam-se mensurar, a elevação da temperatura em relação à temperatura inicial T_0 , a uma distância r da sonda, é dada por:

$$T(t) - T_0 = \frac{q}{4\pi k} E_i \left(-\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \quad (5)$$

onde q é a quantidade de calor fornecido por unidade de tempo e por unidade de comprimento (W/m), k é a condutibilidade térmica do meio ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$) e E_i é a função exponencial integral. Para elevados valores de t , a seguinte aproximação pode ser considerada:

$$T(t) - T_0 = \frac{q}{4\pi k} \left[\ln(t) - \gamma - \ln \left(\frac{r^2}{4\alpha} \right) \right] \quad (6)$$

Onde γ é a constante de Euler (0,5772).

Como mostra a Equação (6), $\Delta T = T - T_0$ varia linearmente com $\ln(t)$, segundo uma inclinação:

$$m = \frac{q}{4\pi k} \quad (7)$$

Por conseguinte, a condutividade térmica do meio pode ser calculada com uso do valor de m obtido pela regressão de ΔT em relação a $\ln(t)$. A difusividade térmica também pode ser determinada a partir da Equação 6. Uma vez que $\Delta T = 0$ quando $t = t_0$:

$$\ln(t_0) = \gamma + \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha}\right) \quad (8)$$

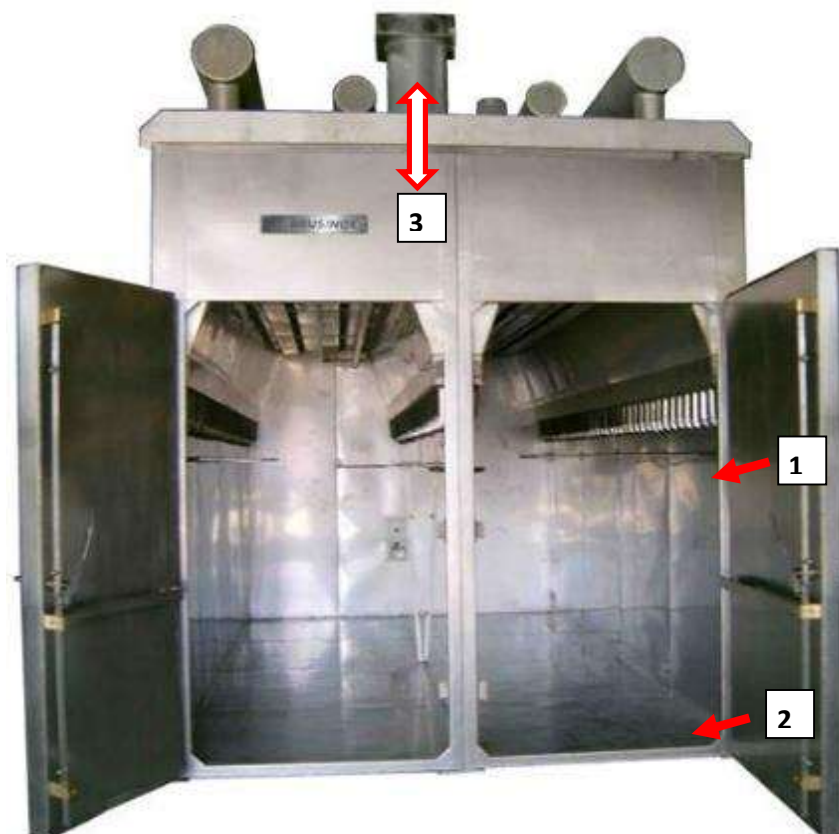
Desse modo, conhecendo-se t_0 (pela intersecção da curva de regressão com o eixo das abscissas) e um r finito, a difusividade térmica para valores elevado de t , pode ser calculada através da Equação (8). O modelo apresentado nas Equações (4) e (5) assume que o meio é isotrópico e homogêneo, que a temperatura inicial T_0 é uniforme e a fonte de calor possui extensão infinita; além disso, desconsidera-se a condutividade e a difusividade térmica da própria sonda e dos sensores de temperatura utilizados. Embora essas considerações a rigor não sejam verdadeiras, o método apresentado propicia medidas suficientemente precisas para as propriedades térmicas (MARCOTTE, 2005).

3.5 DETERMINAÇÕES DA VELOCIDADE DO AR E DA FUMAÇA DENTRO DA ESTUFA DE COZIMENTO

O programa de cozimento contempla algumas etapas em duas velocidades diferentes do ar, denominadas de velocidade rápida e lenta. Foram realizadas as medições da velocidade do ar nas duas velocidades e em dois pontos das estufas de cozimento. Em cada ponto foram avaliadas as velocidades do ar na parte superior e na parte inferior das estufas os quais estão representados como sendo os pontos 1 e 2 respectivamente na Figura 5, avaliação similar a realizada também no estudo de Silva (2011).

A velocidade da fumaça foi medida na tubulação de entrada antes de ser direcionada para os dutos de distribuição do interior da câmara, representado pelo ponto 3 na Figura 5. Todas as medições de velocidade foram realizadas com o auxílio de um Anemômetro digital portátil, modelo AR 816, display de cristal líquido de 3 ½ dígitos.

Figura 5. Diagrama esquemático das medidas de velocidade do ar dentro das estufas.



Fonte: Brusinox, 2014.

3.6 AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DA ESTUFA E PRODUTO

Após a implantação da metodologia do trabalho de Silva (2011) foram realizadas novas medições da temperatura ao longo do processo de cozimento. Foram avaliados três pontos ao longo do cozimento sendo dois pontos no interior da estufa (parte superior e inferior) e a medição no interior do produto.

Os pontos em que foram realizadas as coletas estão indicados na Figura 6 como 1, 2 e 3, respectivamente. Em cada um dos pontos, foi acompanhado o comportamento da temperatura durante o período de cozimento. O monitoramento foi realizado com o auxílio de registradores de temperatura da ibutton® os quais foram previamente programados para realizar a leitura a cada minuto.

Figura 6. Diagrama esquemático das medidas de temperatura na parte superior, inferior e centro do produto nas estufas de cozimento.



Fonte: Brusinox, 2014.

3.7 MODELAGEM MATEMÁTICA

Modelagem matemática é o termo dado ao grupo de técnicas matemáticas, utilizadas para obter, visualizar e interpretar soluções para as equações de conservação de grandezas físicas de interesse de um dado escoamento. A origem dessas equações de conservação é a teoria dos fenômenos de transporte. No campo da fluidodinâmica todos esses fenômenos são governados pela equação de Navier - Stokes. Quando aplicada a um fluido contínuo, estas leis referem-se à taxa de mudança de certa propriedade do fluido devido às forças externas e englobam:

- Lei da Conservação da massa (continuidade) – em regime estacionário, a quantidade de massa que escoar para um determinado elemento de fluido é exatamente a mesma que deixa esse elemento (NORTON; SUN, 2006).
- Conservação da quantidade de movimento (segunda lei de Newton) – a força resultante no elemento de fluido é igual à sua massa multiplicada pela aceleração do elemento (NORTON; SUN, 2006).
- Lei da conservação da energia (primeira lei da termodinâmica) – em todo sistema quimicamente isolado em que há troca de trabalho e calor com o meio externo e em que, durante essa transformação, realiza-se um ciclo (o estado inicial do sistema é igual a seu estado final), as quantidades de calor (Q) e trabalho (W) trocadas são iguais (NORTON; SUN, 2006).

Ao aplicar a equação da continuidade (conservação de massa) sobre o elemento infinitesimal fixo no espaço, é possível determinar através das fronteiras do volume de controle a Equação 9:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (9)$$

onde:

i – índice de coordenadas cartesianas

t – tempo (s)

u – componente da velocidade (m/s)

x – coordenada cartesiana (m)

ρ – densidade (kg/m³)

3.7.1 Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor

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 (INCROPERA, 2008).

A determinação do coeficiente de transferência de calor é decisiva para a análise da distribuição da temperatura em um corpo que está exposto a convecção. Os efeitos convectivos provocados pelas correntes de ar afetam diretamente a velocidade do processo de secagem, por isto merecem atenção e estudo (FERNANDES; COSTA; THOMAS, 2006).

O coeficiente convectivo de transferência de calor é um dado fundamental para o controle de variáveis durante a produção de um produto. Através dele é possível definir variáveis como tempo e temperatura e então otimizar qualquer processo (SINGH, HELDMAN, 2009).

Para estimar o coeficiente convectivo de transferência de calor (h_c), utilizou-se uma correlação clássica da literatura, descrita por Geankoplis (1983) indicada para o escoamento de ar perpendicular à superfície do material, a qual é expressa pela Equação:

$$h_c = 1,17(G)^{0,37} \quad (10)$$

onde:

G é o fluxo mássico do ar (kg/h m²), sendo igual a ($\rho \cdot v_{ar}$). A densidade do ar é expressa como ρ_{ar} (kg/m³) e a velocidade do ar como v_{ar} (m/s).

3.7.2 Difusão de Umidade no Sólido

A equação para a difusão da água livre por difusão de líquido é modelada através da lei de Fick. Neste caso, a umidade torna-se:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \nabla^2 X \quad (11)$$

onde:

D_{ef} – coeficiente de difusão efetivo do líquido (m²/s);

X – umidade média do sólido no instante t , em base seca (kg água/ kg sólido seco);

t – tempo (s)

∇^2 – Laplaciano

O coeficiente de difusão é uma difusividade efetiva, que engloba os efeitos de todos os fenômenos que podem intervir sobre a migração da água e o seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais. Pode-se entender a difusividade como a facilidade com que a água é removida do material. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem (temperatura e velocidade do ar), ela não é intrínseca ao material, e convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva (LEWIS, 1921).

Na condição inicial para resolver a Equação 11 utilizou-se o teor de umidade (kg_{água}/kg_{sólido seco}) no tempo igual a zero (início do processo, Equação 12).

$$X = X_i \quad (12)$$

A resistência externa a transferência de massa não é desprezível principalmente para baixas velocidades de ar de secagem. Neste caso, a concentração na superfície do sólido será determinada considerando o coeficiente de transferência de massa entre o sólido e o fluido. Assim, considerando a importância da resistência externa, a apropriada condição de contorno para resolver

o modelo de difusão de umidade pode ser escrita pela Equação 13 (SIMAL *et al*, 2003):

$$-D_{ef}\rho_s\nabla X|_s = k_G(Y_s - Y_\infty) \quad (13)$$

sendo, X_i o teor de umidade inicial (kg água/kg sólido seco), ρ_s a densidade aparente do sólido (kg/m³), k_G coeficiente de transferência de massa(m/s), Y_s o teor de umidade do ar na superfície do sólido (kg água/m³) e Y_∞ a umidade na corrente de ar (kg água/m³).

O conteúdo de umidade de ar junto à superfície do material é inicialmente expresso em termos de umidade relativa, tomada a partir da isoterma de dessorção de umidade. Foi adotada a isoterma de Oswin, pois a função inversa pode ser facilmente obtida a partir da umidade do material na superfície conforme demonstrado na Equação 14 (HU; SUN, 2000).

$$X_e = A \left(\frac{UR}{1-UR} \right)^B \quad (14)$$

onde:

X_e é a umidade de equilíbrio (kg água/kg sólido seco); UR é a umidade relativa do meio em valores decimais; A e B são parâmetros de ajuste. A umidade relativa, UR do ar é definida como:

$$UR = \frac{p_v}{p_{sat}} \quad (15)$$

onde p_v é a pressão de vapor da água e p_{sat} é a pressão de saturação de vapor de água.

A Equação 16 apresenta a relação da umidade de equilíbrio em função da temperatura para modelos de secagem de linguiças calabresas (modelo de Oswin ajustado) (PIAIA, 2009).

$$X_e = A(T) \cdot \left(\frac{UR}{1-UR} \right)^{B(T)} \quad (16)$$

onde:

$$A = -14,5460 + 0,0944.T - 0,0001.T^2 \quad (17)$$

$$B = 33,1018 - 0,2019.T - 0,0003.T^2 \quad (18)$$

3.7.3 Equações do Modelo

Uma análise de qualquer problema em mecânica dos fluidos, necessariamente se inicia, quer diretamente ou indiretamente com a definição das leis básicas que governam o movimento do fluido.

Para modelar as equações na estufa de convecção forçada restringiu-se a atenção ao escoamento tridimensional em regime estacionário e isotérmico de um fluido incompressível com propriedades constantes nas direções x, y e z de um sistema de coordenadas cartesianas e apresentaram-se as equações diferenciais que são usadas para prever os campos de velocidade e concentração no interior do fluido. Essas equações podem ser deduzidas aplicando-se a segunda lei de Newton do movimento e a conservação de massa em um volume de controle diferencial no fluido.

3.7.3.1 Conservação da massa

Uma lei de conservação pertinente ao escoamento de um fluido viscoso é que a matéria não pode ser nem criada e nem destruída. Para o escoamento em regime estacionário, essa lei requer que a taxa líquida na qual a massa entra no volume de controle (entrada-saída) tem que ser zero. A aplicação dessa lei em um volume de controle diferencial no escoamento fornece a equação 19 (NORTON; SUN, 2006):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

Onde u , v e w são os componentes nas direções x, y e z da velocidade mássica média.

A Equação 19 é uma expressão geral da exigência de conservação da massa global e deve ser satisfeita em todos os pontos no fluido. A equação se aplica a um fluido de uma única espécie, assim como as misturas nas quais podem estar ocorrendo difusões de espécies e reações químicas, desde que o fluido possa ser aproximado como incompressível, isto é, com a massa específica constante.

3.7.3.2 Conservação da quantidade de movimento

A segunda lei fundamental pertinente ao escoamento de um fluido viscoso é a segunda lei de Newton do movimento. Para um volume de controle diferencial no fluido sob condições de regime estacionário, essa exigência determina que a soma de todas as forças atuando no volume de controle deve ser igual à taxa líquida na qual o momento deixa o volume de controle (saída-entrada) (THORPE, 2008).

Dois tipos de força podem atuar no fluido: forças de campo, que são proporcionais ao volume, e forças de superfície, que são proporcionais à área. Os campos gravitacional, centrífugo, magnético e/ou elétrico podem contribuir para a força de corpo total, e os componentes x, y e z dessa força são designados por unidade de volume como f_x , f_y e f_z , respectivamente. As forças de superfície são devidas à pressão estática no fluido, assim como as tensões viscosas. A aplicação da segunda lei de Newton do movimento (nas direções x, y e z) em um volume de controle diferencial no fluido, levando em conta as forças de corpo e de superfície, fornece (MIRANDA, 2007):

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (20)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (21)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (22)$$

onde p é a pressão (Pa) e μ é a viscosidade de fluido (kg/ms).

As três parcelas no lado esquerdo de cada equação representam a taxa líquida de escoamento de momento saindo do volume de controle. As parcelas no lado direito, em ordem, levam em conta a força de pressão líquida, as forças viscosas líquidas e a força de campo. Essas equações devem ser satisfeitas em cada ponto no fluido e podem ser resolvidas para determinar o campo de velocidades (MIRANDA, 2007).

3.8 OTIMIZAÇÃO

Pelo cenário atual em que vivemos, onde as empresas têm o desafio de lidar com a alta competitividade e com exigências cada vez maiores dos consumidores, a otimização faz-se necessária a fim de melhorar processos para uma produção cada vez maior e melhor versus um menor custo e um menor tempo. Consiste na elaboração de um planejamento estratégico e adequado para uma gestão eficiente, visando obter um retorno dentro dos padrões de excelência buscando tornar ótimo os rendimentos nos mais diversos campos de atividades (RABI, 2011).

A otimização do processo foi realizada baseado na redução do tempo de cozimento a fim de tornar essa etapa mais eficiente. Para isso, será utilizado o modelo matemático elaborado.

De posse da equação do modelo matemático, foram realizadas simulações com aumentos proporcionais de temperatura em cada uma das etapas do programa de cozimento com o intuito de reduzir o tempo de cozimento da linguiça tipo calabresa sem que ocorra uma alteração no comportamento do processo e nas características de qualidade do produto acabado.

As informações sobre o processo, bem como as informações acerca da influência das variáveis no processo foram fundamentais para o desenvolvimento do modelo e entendimento do processo de cozimento. Dessa forma, procurou-se elucidar detalhes operacionais do processo, que posteriormente serão aplicados na modelagem matemática e otimização do processo.

Neste capítulo foram apresentadas as descrições dos materiais, dos procedimentos utilizados para a obtenção dos dados operacionais na planta industrial, bem como das equações utilizadas como base para a elaboração do

modelo. Foi evidenciada também, a importância da avaliação estatística para o tratamento das informações obtidas no processo e os passos que serão tomados para a otimização do processo de cozimento.

CAPITULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LINGUIÇA TIPO CALABRESA

A composição química da linguiça tipo calabresa utilizada está disposta na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química da linguiça tipo calabresa

Componentes	Composição (%)
Umidade	42 – 48
Proteínas	14 – 17
Lipídios	29 – 33
Carboidratos	0,8 – 2
Cinzas	Máximo 0,5

O padrão de composição estipulado pela empresa atende ao regulamento técnico de identidade e qualidade (RTIQ) de linguiça o qual determina as características mínimas de qualidade que deverá apresentar o produto cárneo denominado Linguiça. Dentre algumas das características físico químicas exigidas incluem-se um valor máximo de 60% de umidade, máximo de 35% de gordura e mínimo de 14% de proteína (BRASIL, 2000).

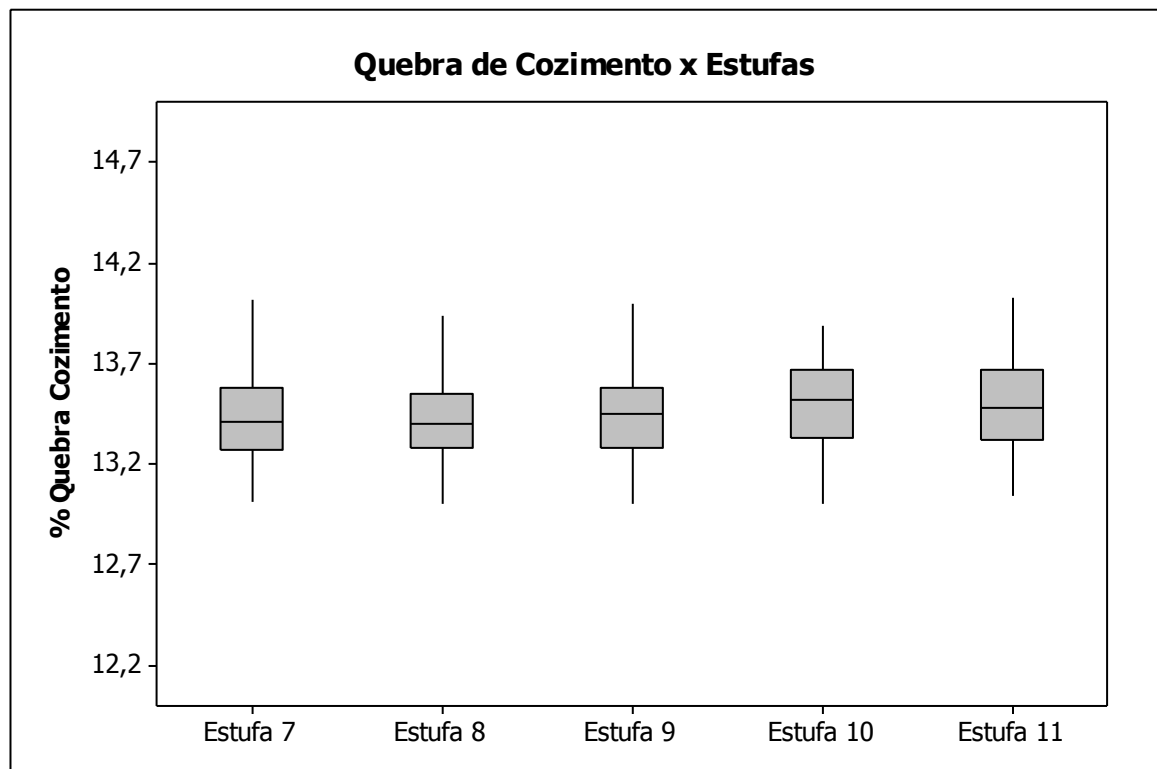
4.2 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DO PROCESSO

Antes de realizar a elaboração do modelo matemático foi realizada uma avaliação da estabilidade do processo a partir da variável de resposta quebra de cozimento (perda de peso), uma vez que essa variável impacta diretamente na segurança alimentar do produto, bem como em custo para a empresa.

Foram realizadas as avaliações agrupando as estufas de cozimento de linguiça tipo calabresa (Figura 7) e realizado o teste de variância no software Minitab 14.0 para avaliar se havia diferença significativa da quebra de cozimento entre as estufas.

Os dados utilizados para avaliação da estabilidade foram coletados no processo de produção de linguiça tipo calabresa após a implantação do trabalho de Silva (2011) com o intuito de verificar se o processo ainda se mantinha sob controle.

Figura 7. Comparativo da quebra de cozimento entre as estufas.

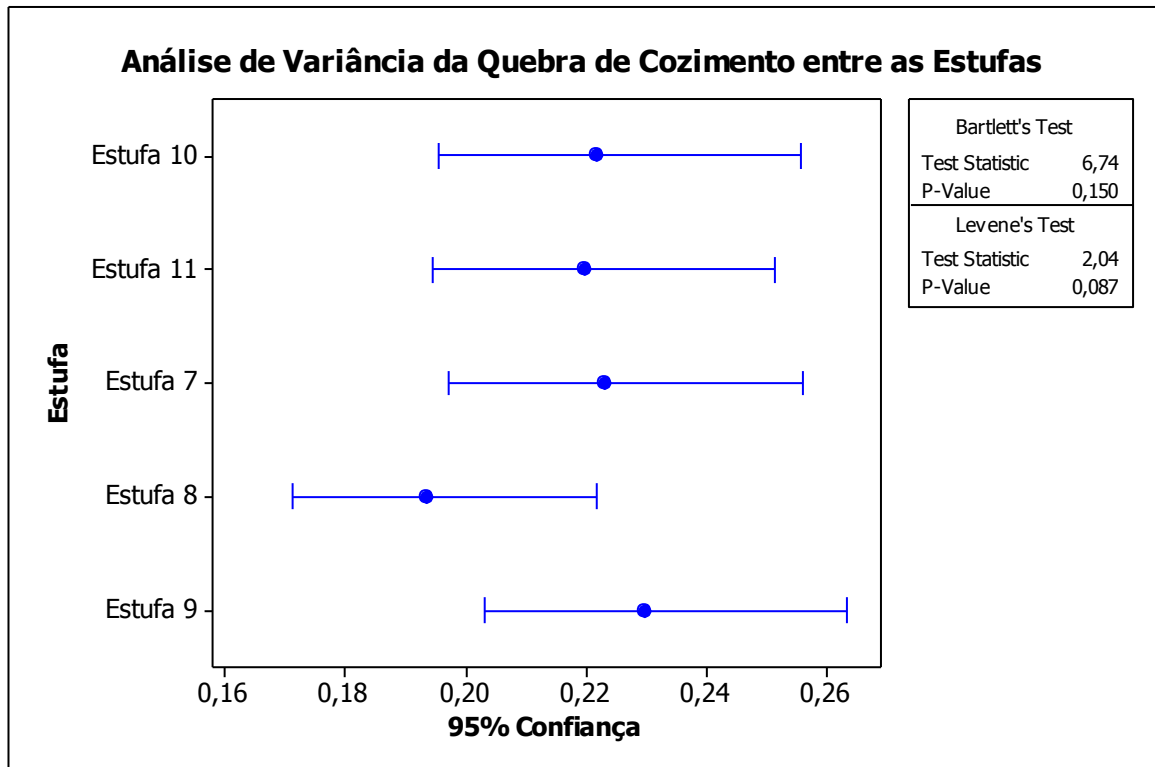


Fonte: A autora

Pode-se perceber através da Figura 7 que as estufas apresentam comportamentos similares conforme pode ser observado pela linha central que representa a mediana.

Na Figura 8 demonstra a avaliação da quebra de cozimento entre as estufas para o nível de confiança de 95%.

Figura 8. Análise de variância da quebra de cozimento entre as estufas para 95% de confiança.



Fonte: A autora

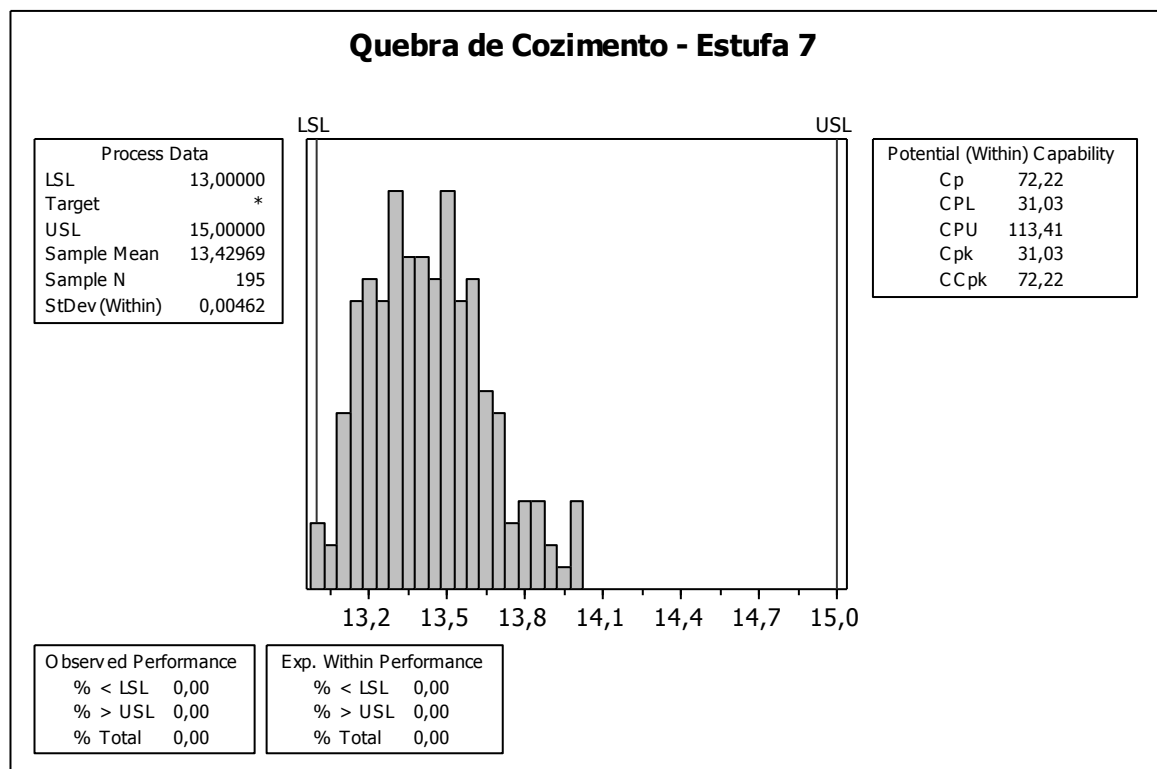
Na Figura 8, as linhas sobrepostas demonstram que não há diferença significativa na variância entre as estufas, confirmada pelo valor de p (p-value), que tanto no teste de Bartlett ($p=0,150$) (para dados normais) como no teste de Levene ($p=0,087$) (para dados não normais), é maior que 0,05 (p-value), ou seja, para 95% de confiança. Os valores de Test Statistic presente no gráfico são apenas informações que complementam a distribuição teórica que origina o valor de p em cada um dos testes.

4.2.1 Avaliação da Capacidade do Processo

Após determinar se um processo está sob controle estatístico é desejável saber se esse processo é capaz. Um processo é capaz quando atende as especificações e produz bons resultados. Para avaliar a capacidade, foi realizada a dispersão da variação do processo frente aos limites de quebra especificados.

Foi realizada a avaliação da capacidade para cada estufa utilizando os dados de quebra obtidos para cada estufa após a implantação do controle de processo realizado por Silva (2011). Os resultados da capacidade de cada estufa estão dispostos nas Figuras 9, 10, 11, 12 e 13.

Figura 9. Avaliação da capacidade da quebra de cozimento da estufa 7.



Fonte: A autora

onde:

LSL – Limite inferior de especificação;

USL – Limite superior de especificação;

Cp – índice de capacidade do processo, considerado como a taxa de tolerância à variação do processo, desconsidera a centralização do processo;

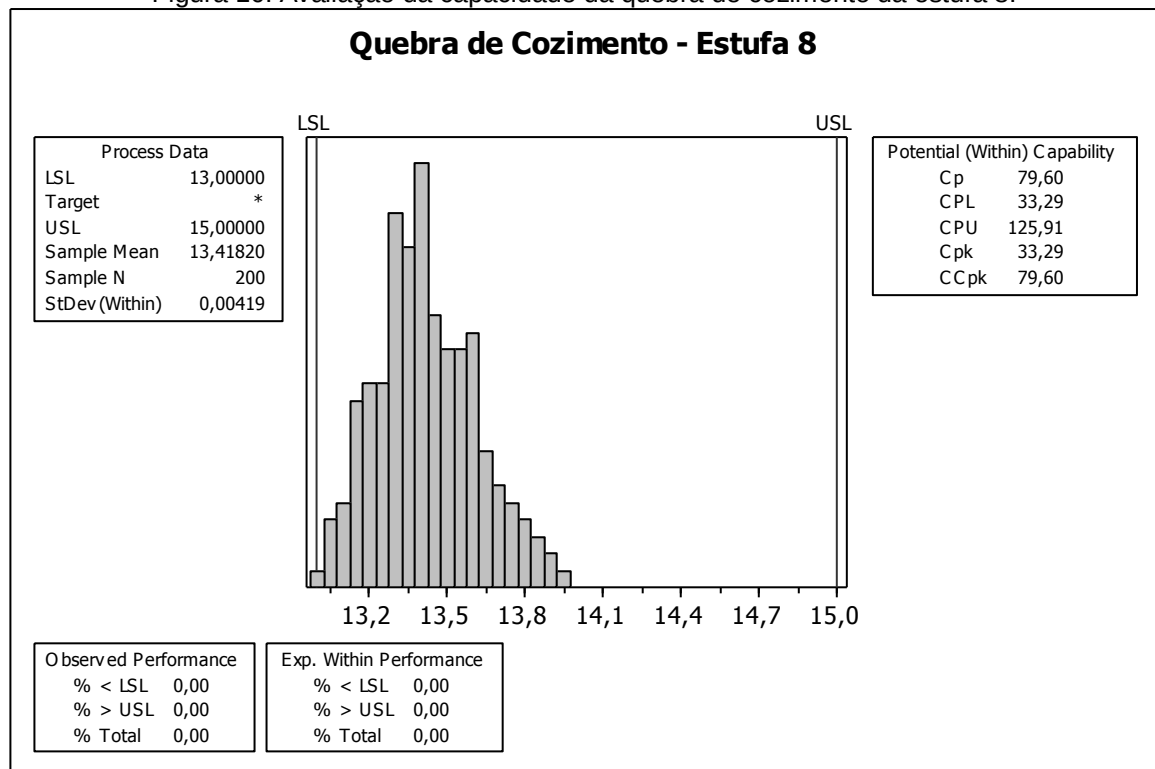
CPL – variação inferior da tolerância dividida pela dispersão superior real do processo;

CPU – variação superior da tolerância dividida pela dispersão superior real do processo;

Cpk – demonstra que o processo é capaz, porém considera a centralização do processo;

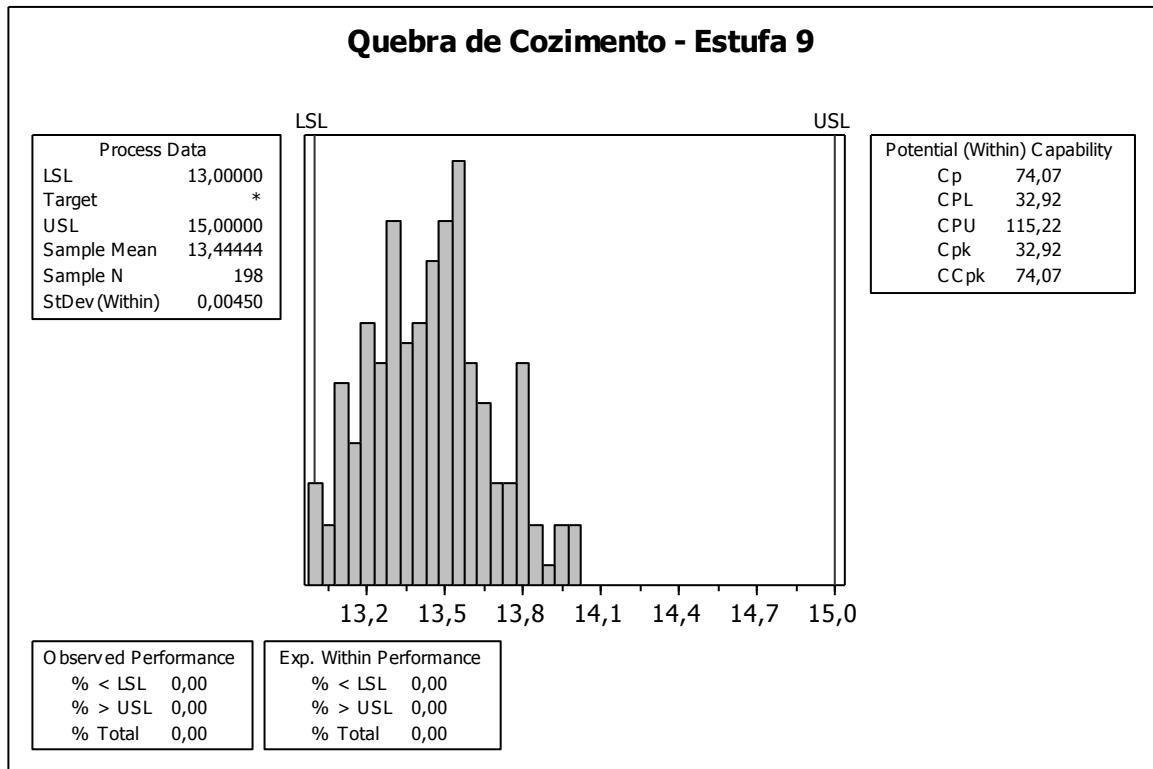
CCpk – índice de capacidade potencial, idêntico ao índice Cpk, mas centrado no alvo do processo.

Figura 10. Avaliação da capacidade da quebra de cozimento da estufa 8.



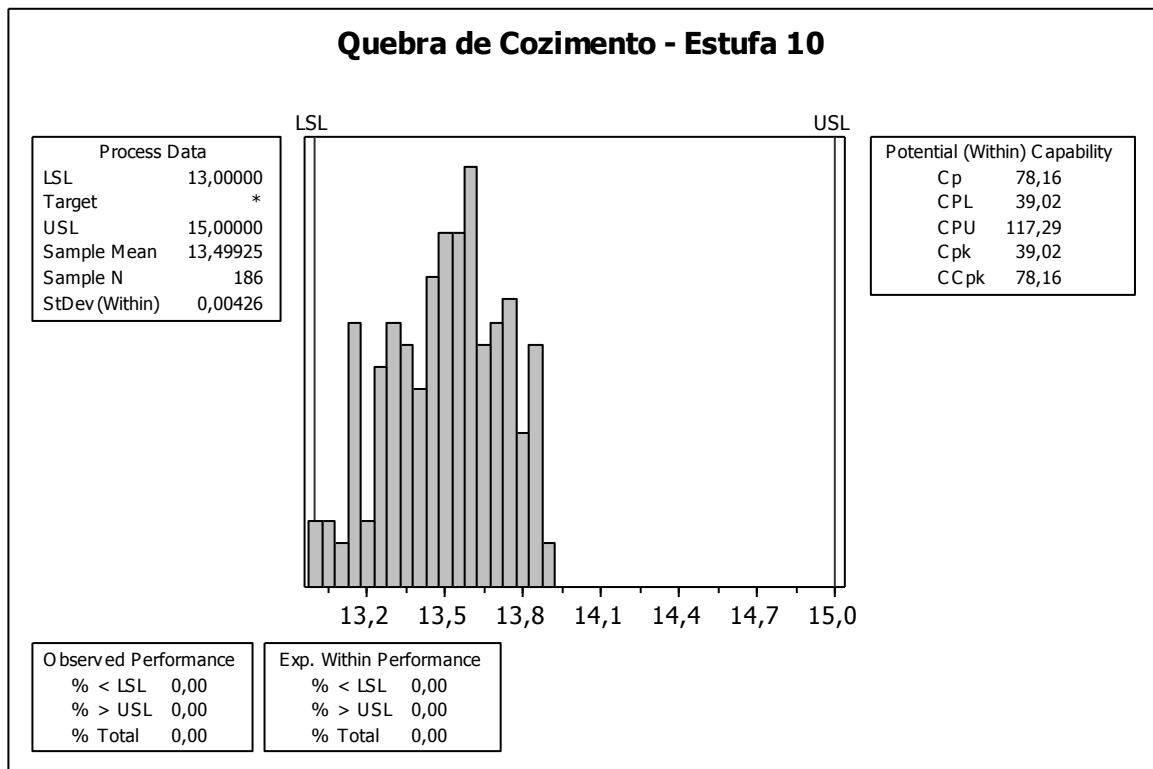
Fonte: A autora

Figura 11. Avaliação da capacidade da quebra de cozimento da estufa 9.



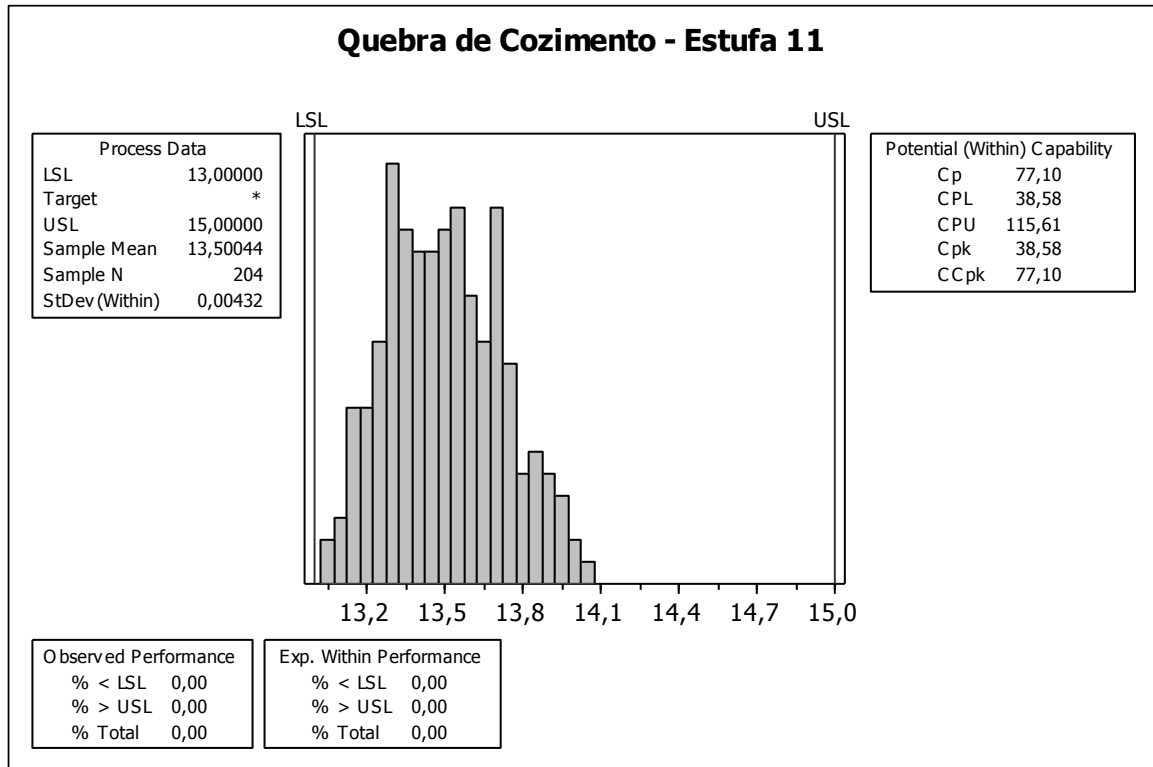
Fonte: A autora

Figura 12. Avaliação da capacidade da quebra de cozimento da estufa 10.



Fonte: A autora

Figura 13. Avaliação da capacidade da quebra de cozimento da estufa 11.



Fonte: A autora

Pode-se perceber através das Figuras 9, 10, 11, 12 e 13 que para todas as estufas de cozimento o processo é capaz, não havendo pontos fora das especificações do processo. Dessa forma, é possível realizar a modelagem da etapa de cozimento.

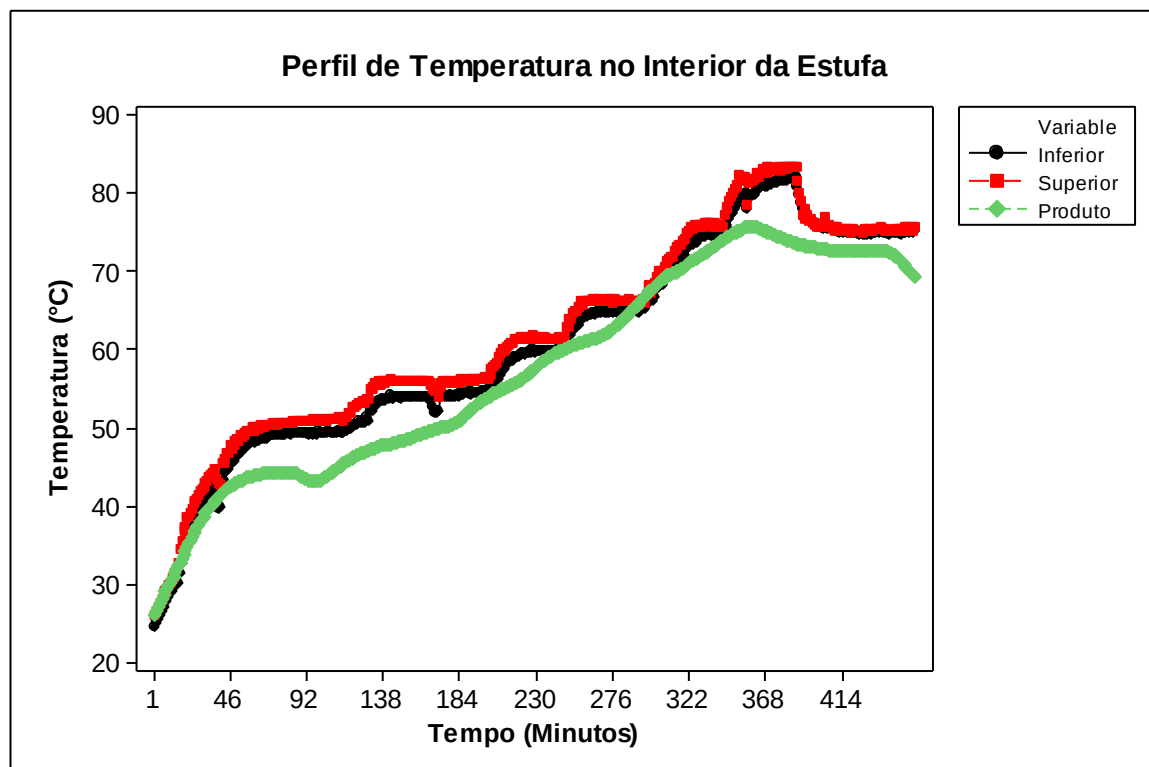
4.3 PERFIL DE TEMPERATURA

Para verificar como estava o comportamento do processo em função da temperatura após a realização do trabalho de Silva (2011), foi avaliado o perfil de temperatura ao longo do processo de cozimento.

Da mesma forma como realizado por Silva (2011), não houve diferença significativa na quebra de cozimento entre as estufas avaliadas. Foi realizada a medição em uma das estufas utilizando equipamentos denominados termoregistradores. Este equipamento possuía a finalidade de medir a cada minuto a

temperatura na parte superior do equipamento, logo abaixo da saída dos dutos de circulação de ar, na parte inferior da estufa, próximo ao piso e no interior do produto, o qual estava situado no centro da estufa. Na Figura 14 é possível visualizar o comportamento da temperatura nos três pontos avaliados.

Figura 14. Perfil de temperatura no interior da estufa ao longo do cozimento da linguiça tipo calabresa.

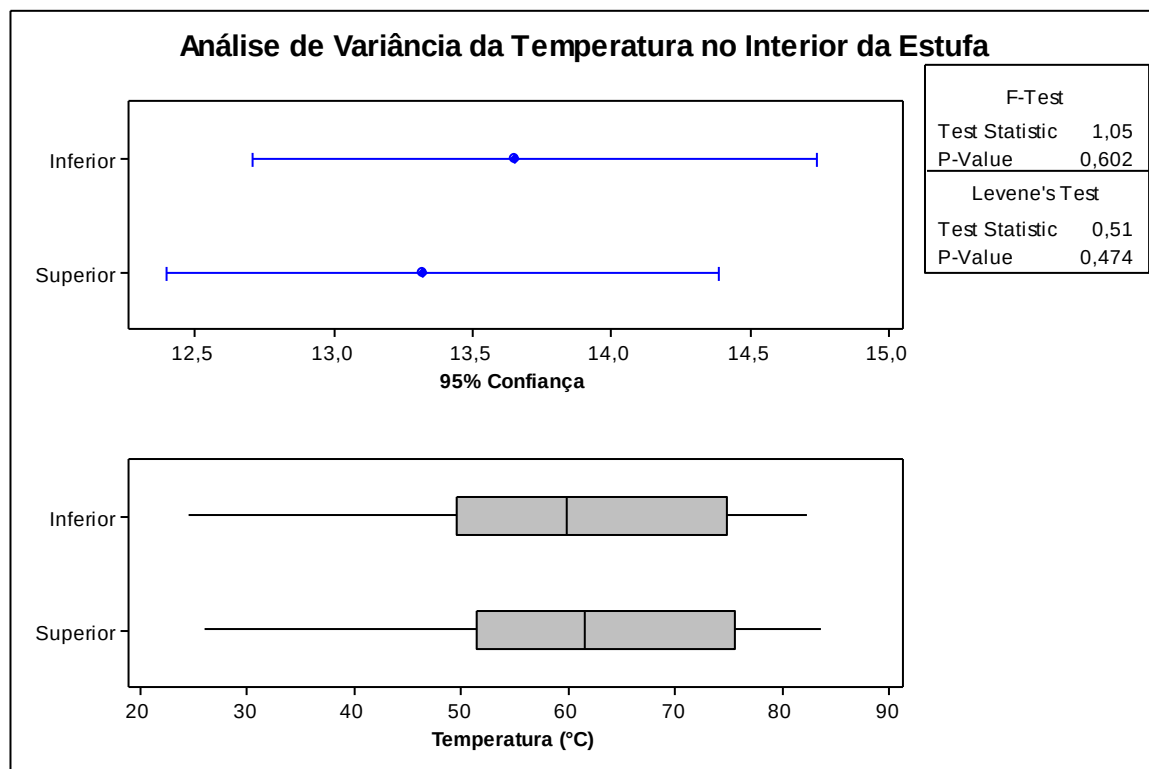


Fonte: A autora

É possível perceber através da Figura 14 um comportamento de temperatura similar entre a parte inferior e superior da estufa o que proporciona um cozimento lento e gradual do produto.

Para verificar se o comportamento da temperatura na parte superior e inferior da estufa apresentava diferença significativa foi realizada uma avaliação de variância no software Minitab 14.0 para o nível de confiança de 95%, avaliação similar a realizada por Silva (2011). Os resultados da avaliação de variância estão dispostos na Figura 15.

Figura 15. Análise de variância da temperatura entre os níveis no interior da estufa para 95% de confiança.



Fonte: A autora

Através da Figura 15 é possível perceber uma pequena variabilidade entre o topo e a base da estufa de cozimento, porém, pelas linhas sobrepostas e pelo valor de $p > 0,05$, pode-se concluir que não há diferença significativa entre os níveis do interior da estufa. Quanto aos valores de Test Statistic presentes no gráfico apenas são informações que complementam a distribuição teórica que origina o valor de p em cada um dos testes.

4.4 VELOCIDADE DO AR E DA FUMAÇA DENTRO DA ESTUFA DE COZIMENTO

Baseado no estudo realizado por Silva (2011) repetiu-se a avaliação das velocidades do ar na parte superior e inferior das estufas de cozimento tanto na velocidade classificada como lenta como na classificada como rápida. Foi realizada também a medição da velocidade de entrada da fumaça que é utilizada para a etapa de defumação. Os dados estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Medidas de velocidade do ar e da fumaça no interior da estufa

Tipo de Velocidade	Velocidade Ar (m/s)		Velocidade da fumaça (m/s)
	Superior	Inferior	
Rápida	16	2	2
Lenta	8	1	-

Fonte: A autora

As coletas de velocidade do ar foram divididas em velocidade rápida e lenta. O tipo de velocidade está relacionado com o programa de cozimento do produto sendo utilizada a velocidade lenta na etapa de secagem. No cozimento da linguiça tipo calabresa tem-se a maior parte do tempo o programa operando na velocidade lenta, logo, na velocidade de 8m/s na parte superior do equipamento e 1 m/s na parte inferior.

Foi possível perceber através das medições de velocidade que os valores encontrados apresentaram diferença significativa. Dessa forma, foram realizadas novas medições de velocidade do ar na velocidade classificada como lenta, nos pontos 3, 4 e 5 indicados na Figura 16 tendo sido obtidos os valores dispostos na Tabela 3.

A velocidade da fumaça classificada como lenta não é utilizada ao longo do processo de cozimento.

Figura 16. Diagrama esquemático das medidas de velocidade do ar na etapa lenta.



Fonte: Brusinox, 2014.

Tabela 3. Medidas de velocidade do ar na etapa lenta no interior da estufa.

Pontos Avaliados	Velocidade Ar (m/s)
Ponto 1	8
Ponto 2	1
Ponto 3	4
Ponto 4	2
Ponto 5	2

Fonte: A autora

Percebe-se através dos dados dispostos na Tabela 3 uma redução gradativa da velocidade do ar se mantendo nos pontos 4 e 5 com velocidade constante de 2m/s.

4.5 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

Na Tabela 4 são demonstrados os resultados obtidos através das leituras de condutividade, resistividade e difusividade durante o cozimento da linguiça tipo calabresa abordada, realizadas no trabalho de Silva (2011).

Tabela 4. Propriedades termofísicas da linguiça tipo calabresa.

Tempo (minutos)	Condutividade (Wm⁻¹°C⁻¹)	Resistividade (m°CW⁻¹)	Difusividade (mm²s⁻¹)
0	0,36	2,76	0,10
25	0,35	2,84	0,10
100	0,37	2,74	0,10
115	0,38	2,64	0,10
155	0,46	2,18	0,11
165	0,43	2,38	0,11
200	0,39	2,56	0,10
210	0,44	2,24	0,11
245	0,42	2,40	0,10
335	0,49	2,04	0,11
395	0,46	2,38	0,10
505	0,40	2,46	0,10

Fonte: A autora

Pode-se perceber que não houve grandes oscilações na difusividade ao longo do processo de cozimento. O valor obtido foi em torno de 0,10 mm²s⁻¹, de acordo com Silva (2011).

Fontana et al (2001) cita valores de difusividade térmica para produtos cárneos os quais podem variar de 0,108 a 0,131mm²s⁻¹ o que vai ao encontro com as medidas de difusividade encontradas durante a medição ao longo do processo de cozimento que foram em torno de 0,10mm²s⁻¹.

4.6 COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

As variações dos coeficientes convectivos de transferência de calor estão relacionadas aos gradientes locais de velocidade no interior do equipamento.

Os valores dos coeficientes de transferência de calor foram calculados utilizando as velocidades do ar ao longo do programa de cozimento.

Foi considerada a velocidade na etapa de secagem, que também é o maior tempo do processo.

A densidade do ar foi considerada constante, $\rho_{ar} = 1,21 \text{ kg/m}^3$ (HU; SUN, 2000).

4.7 UMIDADE RELATIVA

Os valores da umidade de equilíbrio foram calculados através de sensores disponíveis no equipamento em cada etapa de entrada de umidade na estufa, logo, na etapa em que entrava a fumaça de defumação. Como o programa de cozimento já trabalha com parâmetros de umidade definidos foram realizadas as verificações desses valores experimentalmente em cada fase do cozimento. Os valores preditos e os reais estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5. Medidas de umidade relativa no interior da estufa.

Tempo (minutos)	Umidade Programada (%)	Umidade Real (%)
100	57	57
155	45	45
200	36	36
245	29	29

Fonte: A autora

4.8 MODELO MATEMÁTICO

Através da equação geral do balanço de massa foi possível descrever um modelo matemático para o processo de cozimento da linguiça tipo calabresa o qual abrangesse diversas variáveis correlacionadas a esta etapa do processo.

A equação foi inserida no programa Matlab versão 7.8.0 a fim de avaliar a capacidade do modelo de prever o comportamento do produto perante os dados experimentais previamente dispostos.

Como o tratamento térmico para o cozimento do produto é brando a fim de garantir características sensoriais desejadas, foi possível realizar uma aproximação do coeficiente de transferência de calor (h_c) para um valor médio constante e considerando que toda a superfície da linguiça está sob iguais condições externas.

O modelo foi baseado na teoria da difusão líquida. Esta teoria assume que não há influência da capilaridade, despreza os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, dada a dificuldade de se quantificarem esses múltiplos efeitos na massa do produto.

Os processos físicos de difusão de massa no interior do produto obedecem às leis da conservação. Durante a secagem o calor é transferido principalmente por convecção na superfície do material e por condução até o centro. Neste período a umidade difunde-se para a superfície externa do material. Como condições, considerou-se que para a transferência de massa na superfície da linguiça tipo calabresa, toda a água que chega à superfície por difusão é removida por convecção pelo ar.

A equação 23 demonstra o modelo matemático utilizado:

$$\frac{\partial X_T}{\partial t} = -\frac{h_c \cdot D}{r_m^2} \cdot \left[X_T - A(T) \cdot \left(\frac{UR(T)}{1-UR(T)} \right)^{B(T)} \right] \quad (23)$$

onde:

X_T – Umidade total na massa

t - tempo (s)

h_c – Coeficiente convectivo de transferência de calor

D – Difusividade

r - Raio da linguiça tipo calabresa (m)

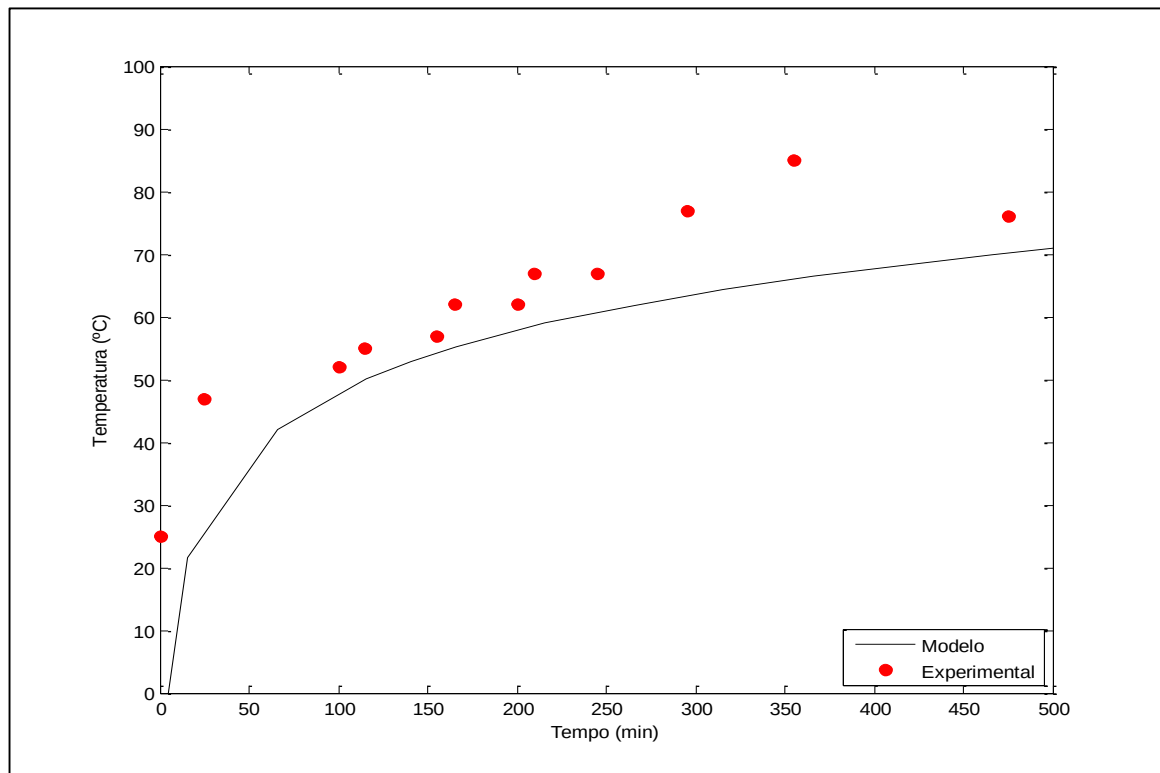
UR - Umidade relativa do ambiente.

A , B - Parâmetros de ajuste em função da temperatura

4.9 EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA

A Figura 17 apresenta os resultados observados e simulados da temperatura da linguiça tipo calabresa durante o processo de cozimento.

Figura 17. Resultados da temperatura da linguiça tipo calabresa experimentais versus simulados (a).



Fonte: A autora

Através da Figura 17 é possível observar que a temperatura da linguiça tipo calabresa apresentou um aumento acelerado no início do cozimento seguindo de aumentos graduais.

A distribuição uniforme de calor no produto com pequenos gradientes de temperatura é resultado do tratamento térmico brando, o qual impede a formação de crostas superficiais, sendo este tratamento adotado pela indústria de alimentos na obtenção das características sensoriais desejadas.

Outro ponto que é avaliado na indústria é a temperatura mínima na fase de cozimento. Essa temperatura é utilizada como um ponto intermediário de controle para auxiliar na garantia da segurança alimentar do produto. A temperatura, que é de no mínimo de 73 °C, foi definida através da implantação do programa APPCC

(Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle) onde foram analisadas as diversas etapas do processo. É possível observar através da Figura 17 para os dados experimentais que a mesma foi atingida.

O traçado da curva obtida com os resultados do modelo matemático aproxima-se dos dados experimentais com coeficiente de determinação $R^2 = 0,87$. De acordo com Mohapatro e Rao (2005), para erro médio inferior ou ligeiramente superior a 10%, o modelo pode descrever o fenômeno avaliado.

Devido ao coeficiente de determinação R^2 de 0,87 não apresentar um resultado tão desejado quanto o esperado, foram realizados alguns ajustes alterando a velocidade do ar utilizada a fim de predizer de maneira mais adequada a correlação da equação frente aos dados experimentais.

Na Tabela 6 é possível verificar as variáveis utilizadas para simulação.

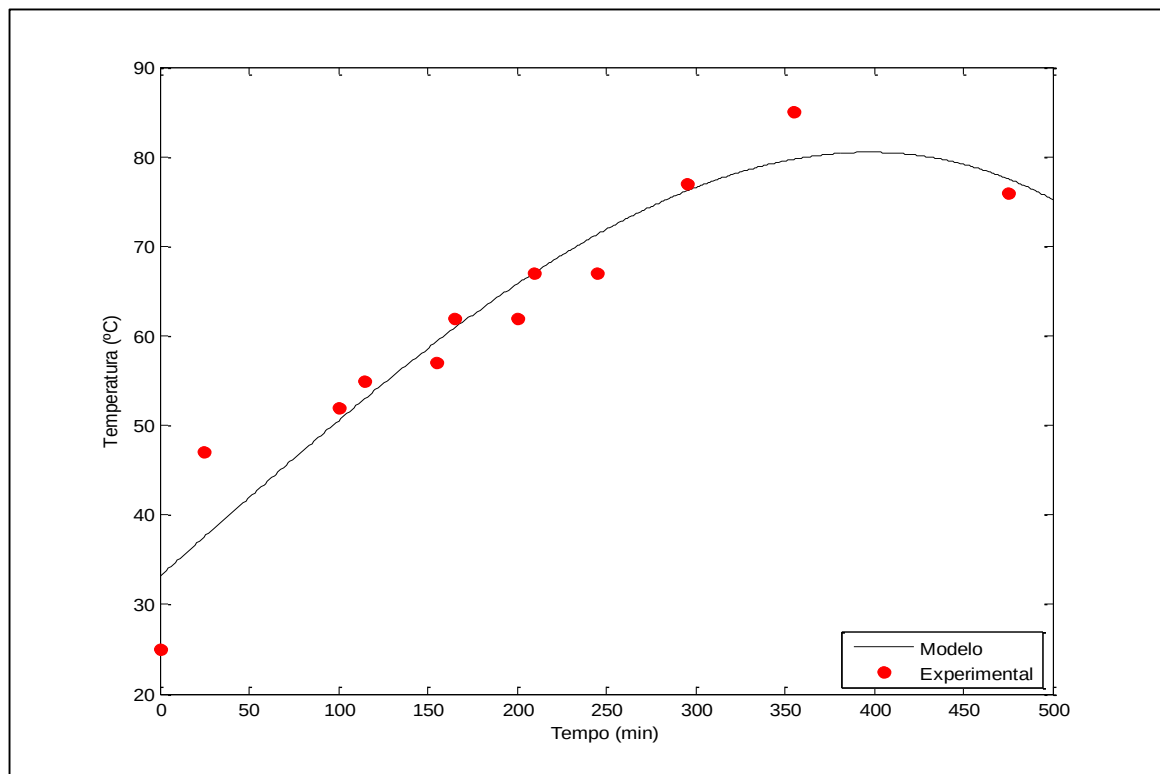
Tabela 6. Variáveis utilizadas na simulação do modelo.

Variáveis	Dados Iniciais	Dados Finais
Velocidade do ar (m/s)	8	2
Difusividade (mm^2s^{-1})	0,10	0,10
Densidade do ar (kg/m^3)	1,21	1,21
Raio (mm)	21	21

Fonte: A autora

Na Figura 18, é possível visualizar a nova curva obtida com o ajuste dos dados ao modelo versus os dados obtidos experimentalmente.

Figura 18. Resultados da temperatura da linguiça calabresa experimentais versus simulados (b).



Fonte: A autora

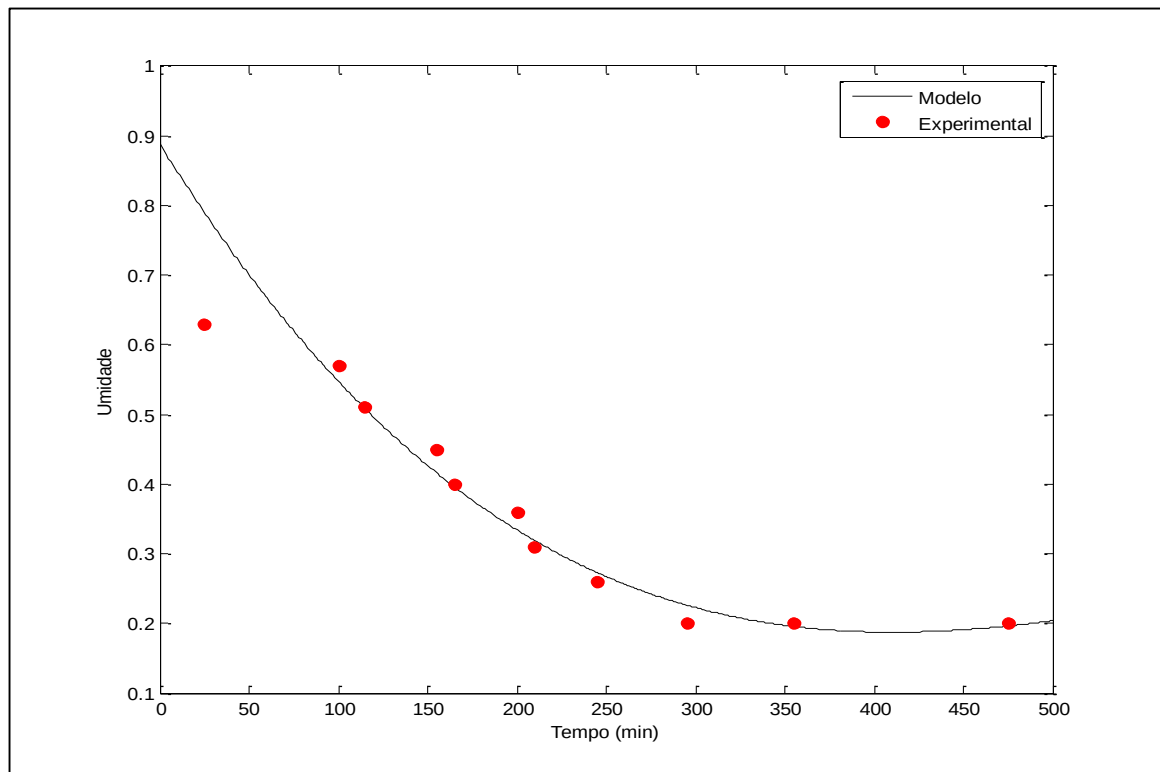
O traçado da curva obtida com os resultados do modelo matemático aproximou-se frente aos dados experimentais com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,99$. Segundo Madamba, Driscoll e Buckle (1996), coeficientes de determinação (R^2) superior ou próximo a 0,98 representam o fenômeno em estudo.

Pode-se perceber que a alteração do critério da velocidade do ar ao longo do cozimento foi de extrema relevância para a boa correlação do modelo frente aos dados experimentais.

4.10 TEOR DE UMIDADE

A Figura 19 apresenta os resultados observados e simulados dos teores de umidade da linguiça tipo calabresa durante o processo de cozimento. A curva experimental demonstra um período de secagem com taxa decrescente, com algumas oscilações devido à programação e ao controle de temperatura existente nas etapas do programa.

Figura 19. Resultados da umidade da linguiça tipo calabresa experimentais versus simulados.



Fonte: A autora

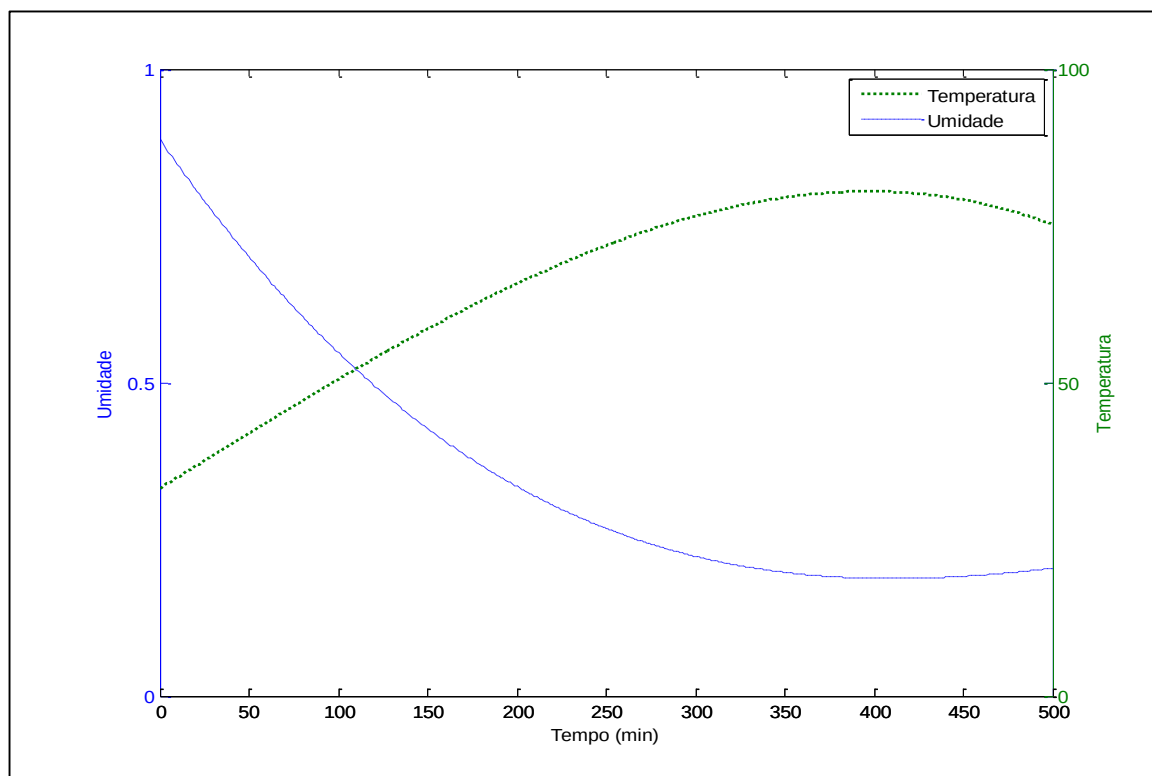
O ajuste da curva obtida através dos resultados simulados é bastante satisfatória; o modelo matemático ajustado aos dados experimentais apresentou coeficiente de determinação, $R^2=0,99$.

No final do processo de cozimento observa-se um comportamento quase linear da curva de secagem. Esse fenômeno conforme Freire *et al*, (2003) indica a influência das forças de escoamento da água no interior do produto.

4.11 COMPORTAMENTO TEMPERATURA X UMIDADE

Na Figura 20 apresentam-se os resultados da variação da umidade e temperatura em função do tempo para os dados experimentais.

Figura 20. Relação da temperatura versus umidade.



Fonte: A autora

É possível observar através da Figura 20 que em um primeiro momento ocorre o aquecimento gradual do produto e o início da redução de umidade do interior da linguiça tipo calabresa demonstrando dessa forma a correlação da secagem (aumento da temperatura com redução da umidade do produto).

4.12 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

Ao longo da realização do trabalho, várias propostas surgiram que poderiam ser fontes de novos estudos tais como o aumento da capacidade das estufas, redução do consumo de utilidades, redução do tempo de cozimento de forma a melhorar a eficiência do processo, entre outros temas. Dessa forma, foi realizada uma otimização do processo de cozimento com a utilização do modelo matemático elaborado a fim de reduzir o tempo de cozimento do processo e assim aumentar o tempo disponível no processo.

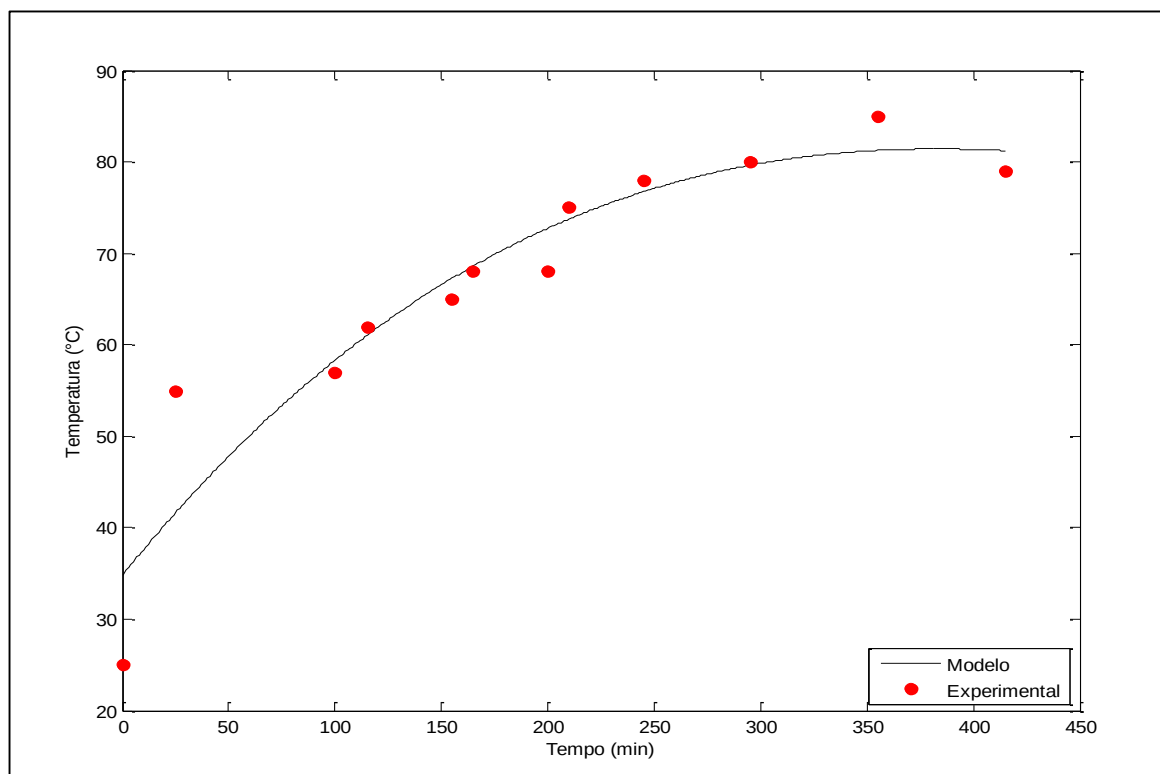
Através da utilização do modelo matemático estabelecido foram realizadas simulações com aumentos da temperatura de trabalho da estufa atentando para que

essas mudanças não resultassem em uma alteração no comportamento do processo. Na medida em que se efetuavam as alterações das temperaturas de trabalho, em paralelo eram realizadas também avaliações do produto na linha de produção. Essas avaliações do produto tinham como objetivo verificar se as temperaturas propostas não afetariam, principalmente as características sensoriais da linguiça tipo calabresa em estudo.

Foram realizadas as avaliações até o momento em que foi verificado que o aumento da temperatura em demasia acabava por impactar nas características sensoriais do produto (formação de crosta na superfície do produto).

Portanto, após as simulações das temperaturas e verificações do produto em linha de produção, foram estabelecidas as novas temperaturas de programação das estufas de cozimento. Na Figura 21 é possível observar o traçado da curva com as alterações das temperaturas de trabalho da estufa.

Figura 21. Resultados da temperatura da linguiça tipo calabresa experimentais versus simulados - Novo Programa

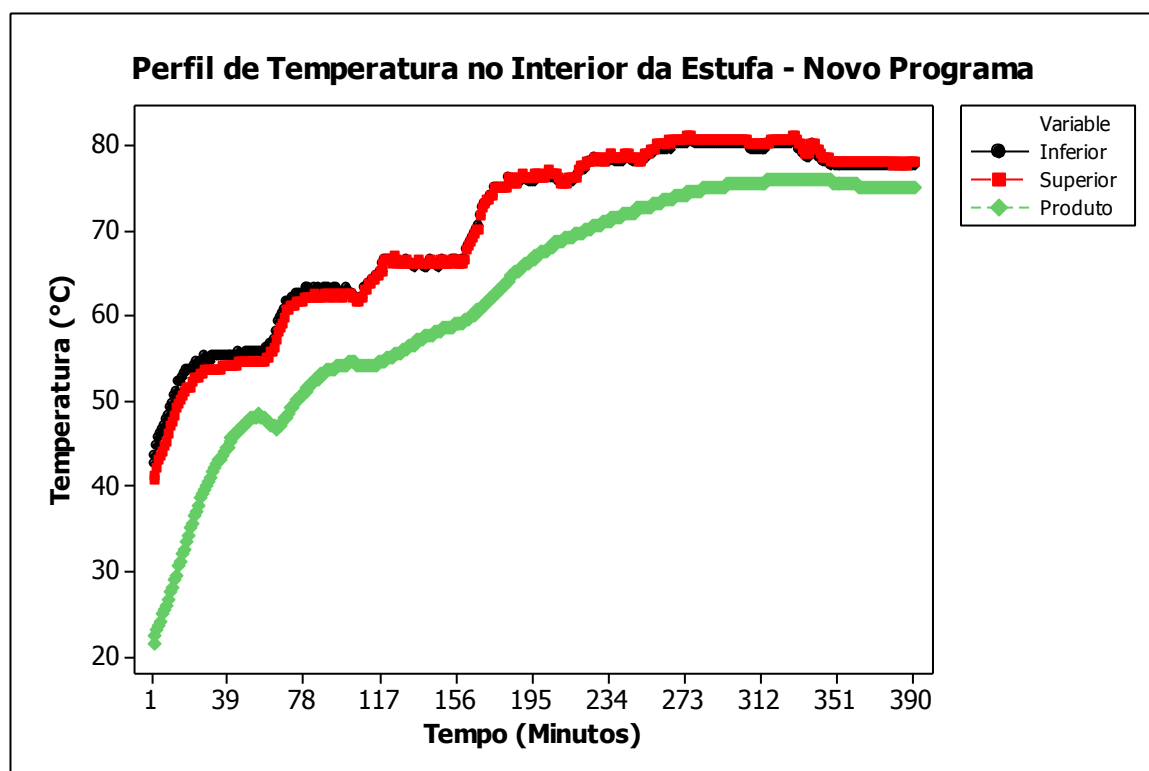


Fonte: A autora

Através do comparativo da Figura 21, com a utilização das novas temperaturas de trabalho propostas com a Figura 18 em que demonstra as temperaturas de trabalho que até então eram utilizadas no processo, nota-se que em ambas as situações apresentaram o mesmo comportamento se comparado os dados experimentais com o modelo matemático.

Da mesma forma que o realizado por Silva (2011) e também realizado no presente trabalho disposto na Figura 14, foi realizada a avaliação do produto e equipamento em função da temperatura com o auxílio de termoregistradores ao longo do cozimento considerando nessa avaliação as novas temperaturas de trabalho adotadas. Na Figura 22 é possível visualizar o comportamento da temperatura nos três pontos avaliados.

Figura 22. Novo perfil de temperatura no interior da estufa ao longo do cozimento da linguiça tipo calabresa.



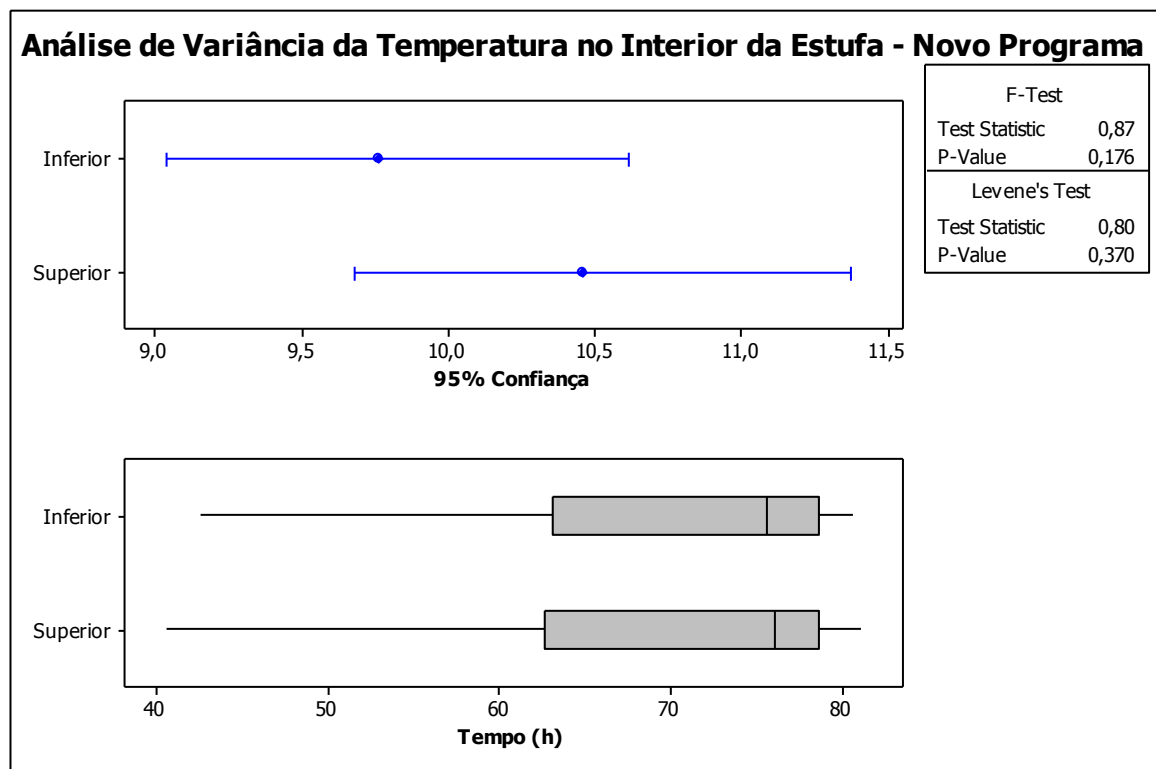
Fonte: A autora

É possível perceber através da Figura 22 um comportamento de temperatura similar entre a parte superior e inferior da estufa. Percebe-se também um tempo total de cozimento de cerca de 391 minutos. Ao se realizar um comparativo do tempo de

cozimento atingido com o tempo disposto na avaliação realizada na Figura 14, é possível evidenciar uma redução de cerca de 66 minutos.

Com o objetivo também de avaliar se o comportamento da temperatura na parte superior e inferior da estufa apresentava diferença significativa de temperatura, conforme demonstrado anteriormente no trabalho, foi realizada uma avaliação de variância no software Minitab 14.0 para o nível de confiança de 95%. Os resultados da avaliação de variância estão dispostos na Figura 23.

Figura 23. Análise de variância da temperatura entre os níveis no interior da estufa para 95% de confiança - Novo Programa



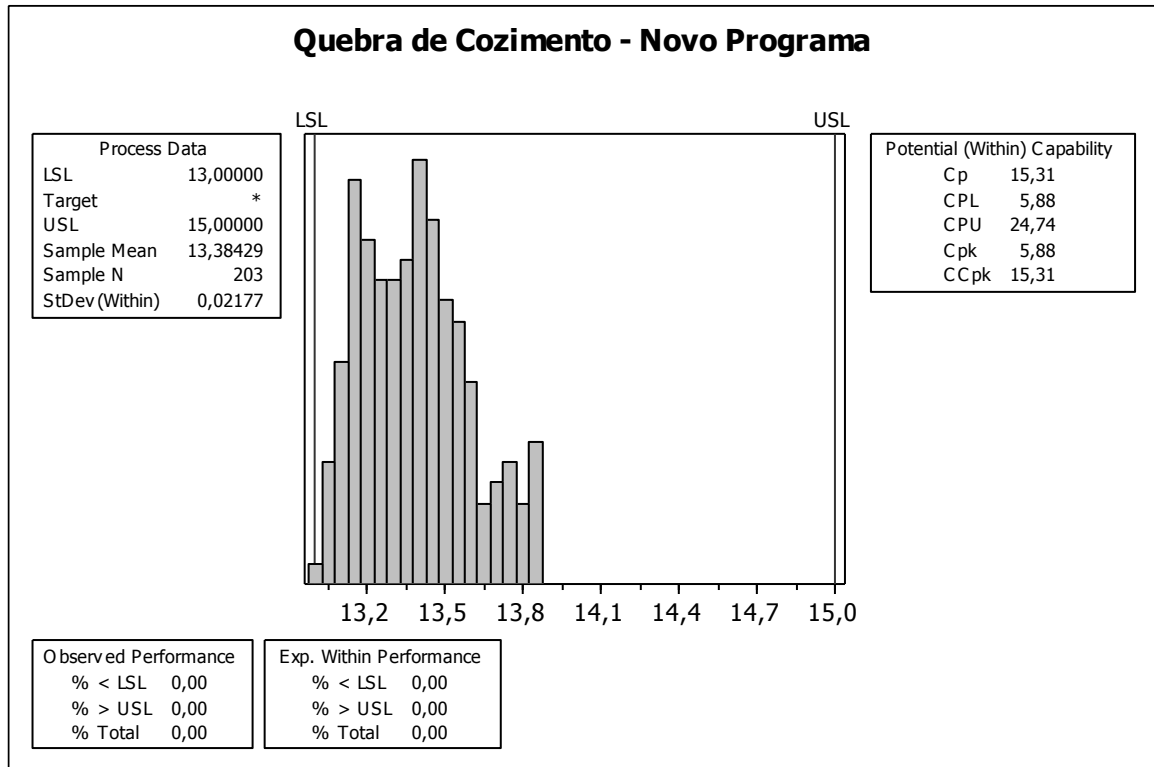
Fonte: A autora

Através da Figura 23 é possível perceber através das linhas sobrepostas e pelo valor de $p > 0,05$, que não há diferença significativa entre os níveis do interior da estufa.

Com a implantação do novo programa de cozimento foram realizadas medições da variável quebra com o intuito de verificar se o processo se mantinha sobre controle e se os resultados se apresentavam dentro da especificação.

Na Figura 24 está apresentada a avaliação do processo baseado na variável quebra.

Figura 24. Avaliação da capacidade da quebra de cozimento - Novo Programa



Fonte: A autora

Pode-se perceber através da Figura 24 que o processo se manteve capaz, não havendo pontos fora das especificações do processo. É possível verificar que a possibilidade do processo apresentar pontos fora das especificações, caso continue com o mesmo comportamento e tendências, é baixa.

4.12.1 Distribuição da Temperatura no Produto

A geração de imagens térmicas é um recurso utilizado para atingir melhorias de qualidade de um produto de forma segura e econômica. A geração de imagens térmicas oferece a habilidade de monitoramento constante das temperaturas do próprio produto. Uma imagem térmica é equivalente a uma ramificação de milhares de sondas de temperatura colocadas na superfície do produto com os dados

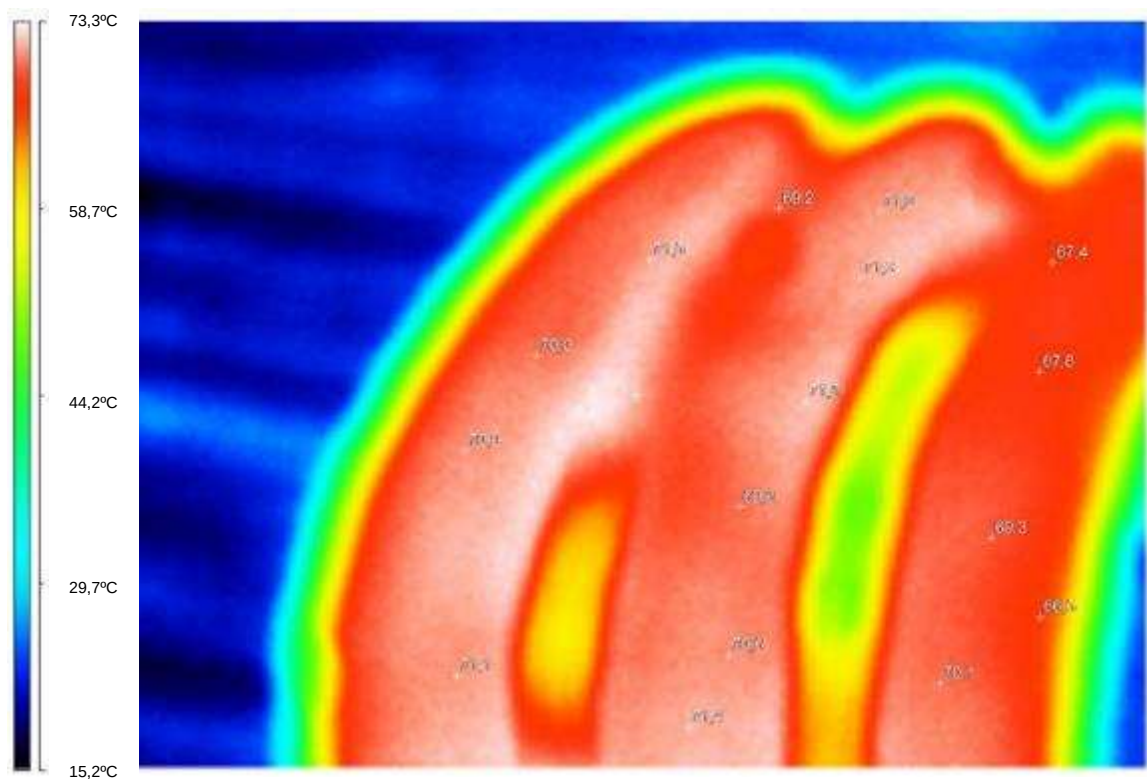
resultantes organizados no formato de uma imagem. Uma distribuição de temperaturas, em vez de uma temperatura única do produto.

Com a implantação do novo programa de cozimento, foram realizadas medições de temperatura continuadas através do uso de um equipamento denominado termógrafo.

Conforme a linguiça tipo calabresa é descarregada da estufa, as mesmas normalmente possuem uma variação ou distribuição de temperaturas ao longo da sua superfície e volume.

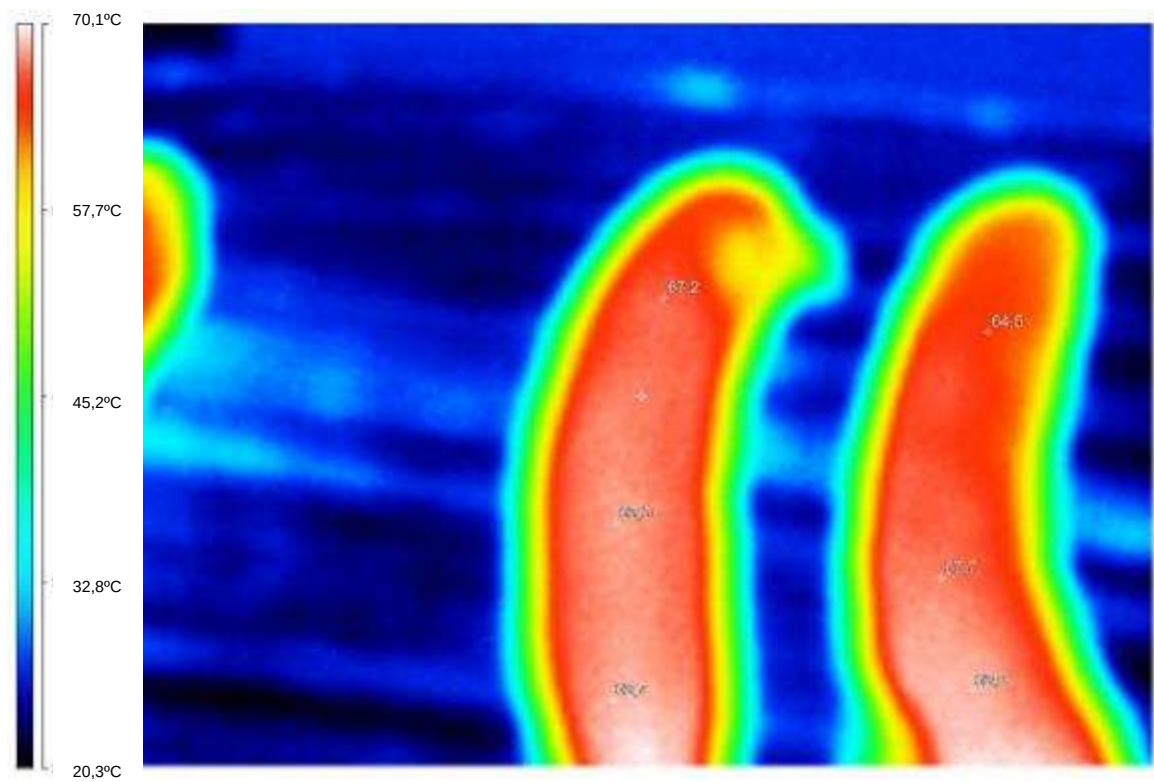
As Figuras 25, 26 e 27 demonstram as imagens térmicas do produto com o novo programa de cozimento, logo após o seu descarregamento da estufa.

Figura 25. Imagem térmica da linguiça tipo calabresa na saída da estufa (a)



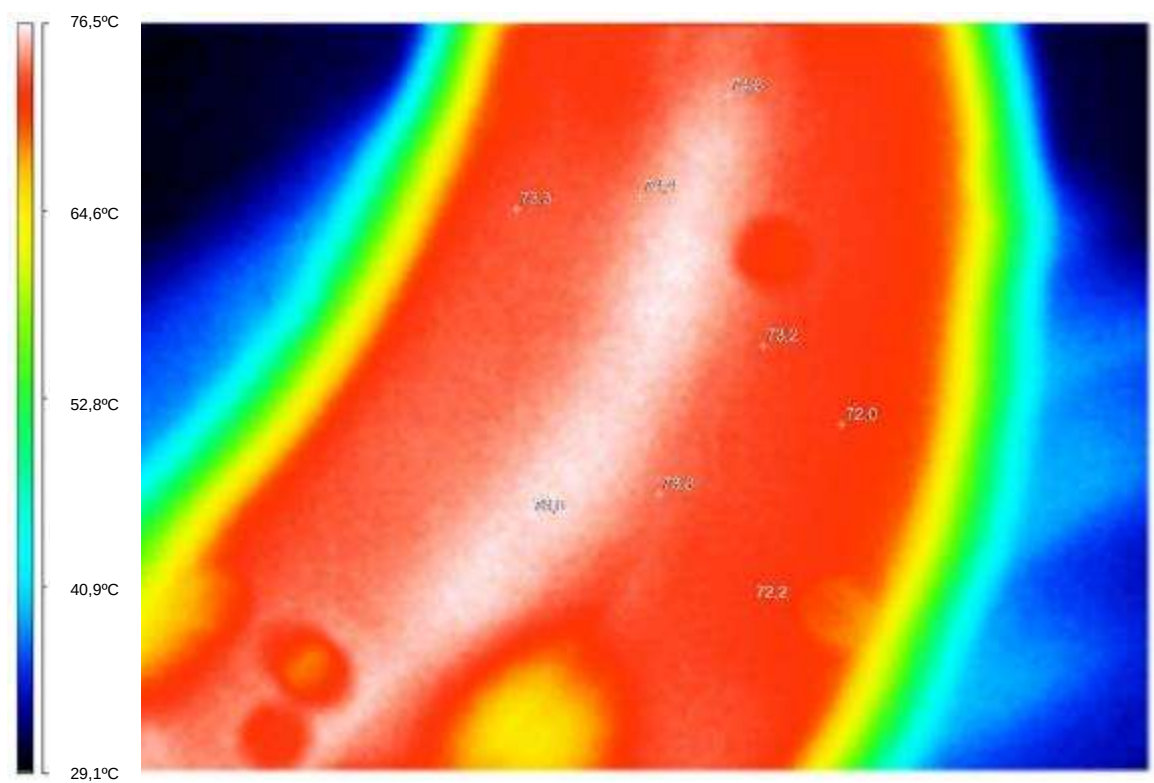
Fonte: A autora

Figura 26. Imagem térmica da linguiça tipo calabresa na saída da estufa (b)



Fonte: A autora

Figura 27. Imagem térmica da linguiça tipo calabresa na saída da estufa (c)



Fonte: A autora

As Figuras 25, 26 e 27 demonstram alguns ângulos diferentes do produto. As variações de temperatura são evidentes, assim como também os efeitos do resfriamento.

4.12.2 Análises de Qualidade do Produto

As análises dos alimentos são pontos a serem avaliados na elaboração ou modificação de um processo. A fim de verificar se as alterações realizadas no programa de cozimento influenciaram nas características físico químicas e sensoriais do produto foram encaminhadas 25 amostras para avaliação, em triplicata a fim de correlacionar os resultados com o padrão previamente estabelecido.

Na Tabela 7 está disposto um compilado com os resultados obtidos através das análises físico químicas da linguiça tipo calabresa.

Tabela 7. Comparativo da composição química da linguiça tipo calabresa

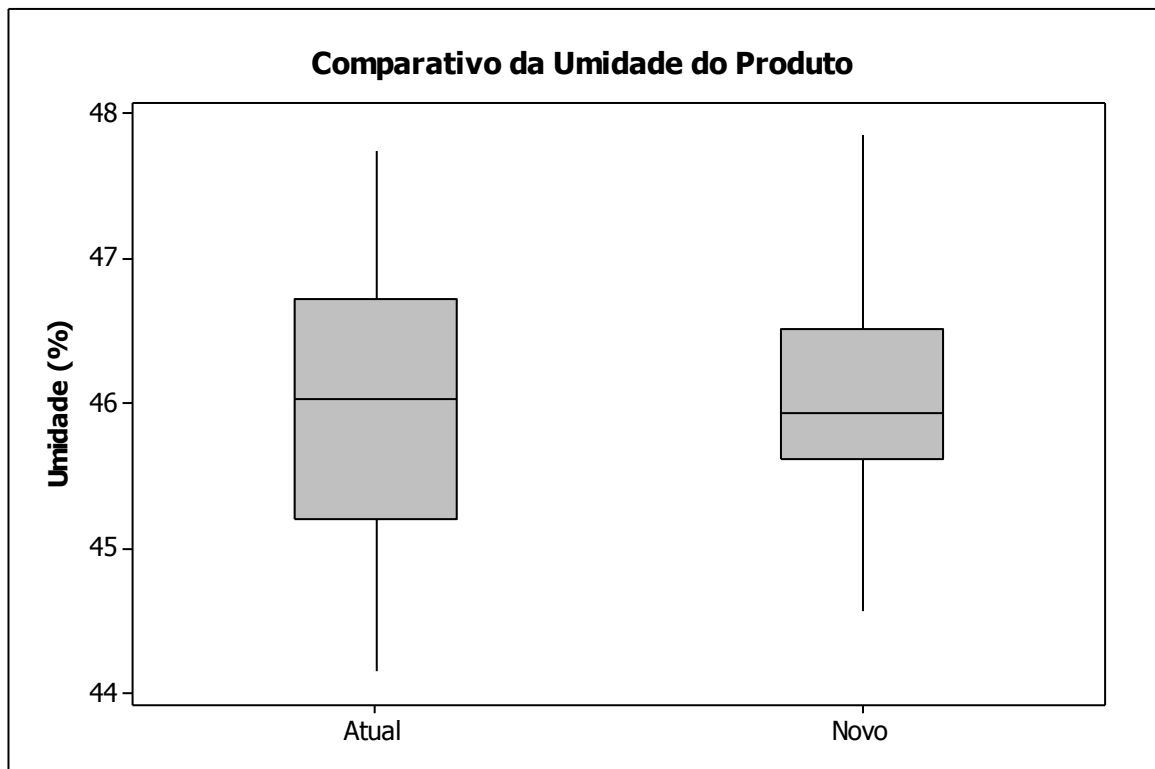
Componentes	Programa Existente	Novo Programa
	Composição (%)	Composição (%)
Umidade	42 – 48	42 – 48
Proteínas	14 – 17	14 – 17
Lipídios	29 – 33	29 – 33
Carboidratos	0,8 – 2	0,8 – 2
Cinzas	Máximo 0,5	Máximo 0,5

Fonte: A autora

Através das análises físico químicas presentes na Tabela 7 percebe-se que os resultados físico-químicos se mantiveram dentro da faixa estipulada como padrão do produto.

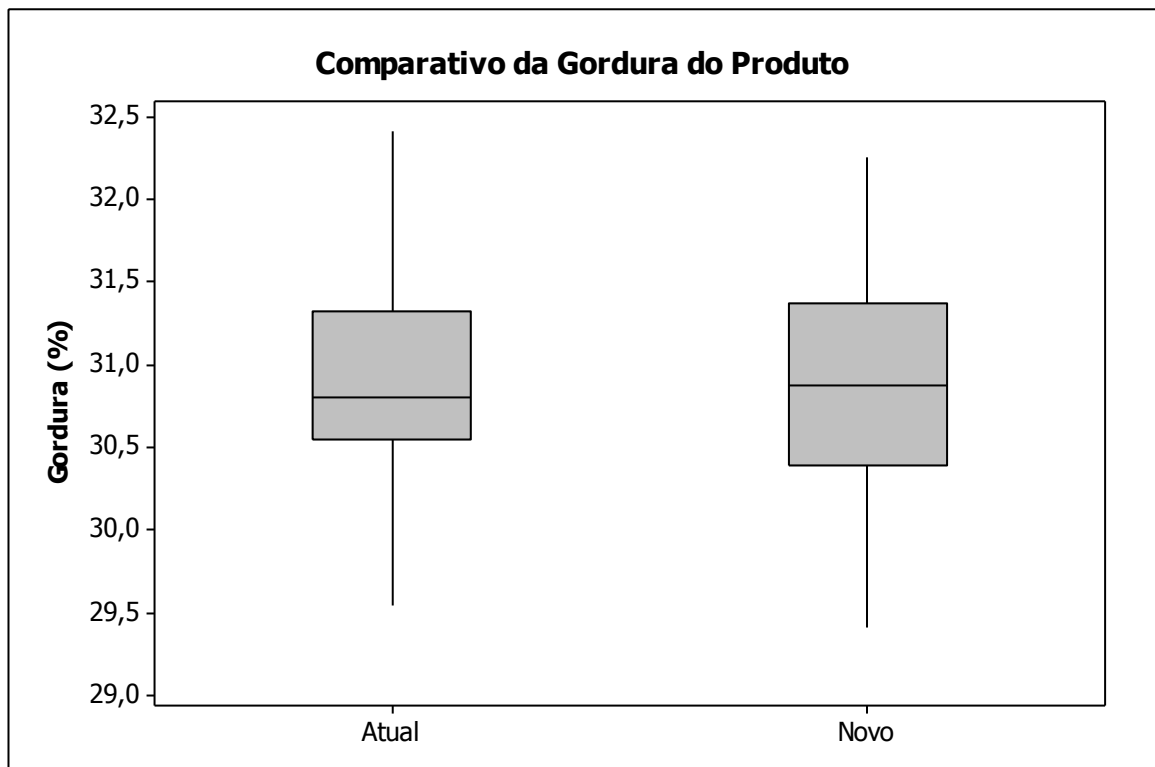
As Figuras 28, 29 e 30 estão apresentadas o comparativo das 75 análises realizadas de umidade, gordura e proteína respectivamente.

Figura 28. Comparativo das análises de umidade do produto



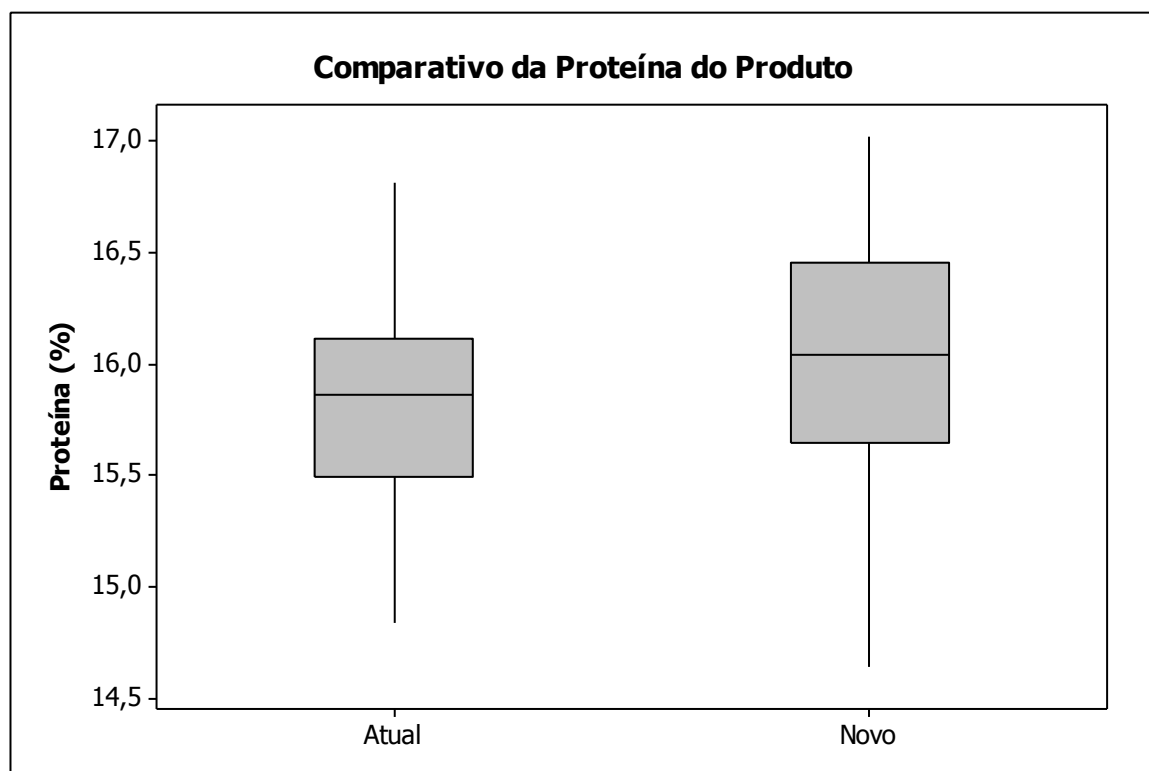
Fonte: A autora

Figura 29. Comparativo das análises de gordura do produto



Fonte: A autora

Figura 30. Comparativo das análises de proteína do produto



Fonte: A autora

Através das Figuras 28, 29 e 30 pode-se perceber que os resultados das análises de umidade, gordura e proteína não apresentaram diferença significativa se comparadas ao novo programa de cozimento com o existente. As médias e variações se mantiveram dentro dos limites aceitáveis.

O teste de comparação pareada unilateral foi utilizado para avaliar a diferença sensorial entre as amostras de linguiça tipo calabresa. As análises foram realizadas por provadores treinados da própria empresa em que o trabalho foi desenvolvido os quais realizaram as avaliações baseados em atributos conforme demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8. Atributos avaliados na análise sensorial para a linguiça tipo calabresa

Atributos Gerais	Atributos Específicos
Sabor	Defumado Gosto Salgado
Textura	Maciez na Mastigação Suculência Textura de Carne
Aparência Interna	Integridade da Fatia no Corte
Aparência Externa antes do Preparo	Cor acastanhada
Odor antes do Preparo	Defumado

Fonte: A autora

A tabela 08 demonstra a relação entre atributos gerais e específicos. Para cada atributo geral estipulado foram detalhados atributos específicos. Como exemplo de correlação podemos citar o atributo geral sabor. Dentro desse atributo foram avaliados os atributos específicos de defumado e gosto salgado e a mesma correlação foi realizada para os demais atributos sucessivamente, onde a escala utilizada para a parametrização dos atributos avaliados segue a seguinte ordem:

Nota -3: O atributo avaliado está totalmente abaixo do padrão;

Nota -2: O atributo avaliado está abaixo do padrão;

Nota -1: O atributo avaliado está ligeiramente abaixo do padrão, porém aceitável;

Nota 0: O atributo avaliado atende ao padrão especificado;

Nota +1: O atributo avaliado está ligeiramente acima do padrão, porém aceitável;

Nota +2: O atributo avaliado está acima do padrão;

Nota +3: O atributo avaliado está totalmente acima do padrão;

Na Tabela 9 é possível verificar o comparativo das pontuações do produto se comparado os programas de cozimento.

Tabela 9. Resultados da análise sensorial para a linguiça tipo calabresa

Atributos Gerais	Atributos Específicos	Programa Existente	Novo Programa
Sabor	Defumado	Nota 0	Nota 0
	Gosto Salgado	Nota 0	Nota 0
Textura	Maciez na Mastigação	Nota 0	Nota 0
	Suculência	Nota 0	Nota 0
	Textura de Carne	Nota 0	Nota 0
Aparência Interna	Integridade da Fatia no Corte	Nota 0	Nota 0
Aparência Externa antes do Preparo	Cor acastanhada	Nota 0	Nota 0
Odor antes do Preparo	Defumado	Nota 0	Nota 0

Fonte: A autora

Através da Tabela 9 percebe-se que não houve quaisquer diferenças de pontuações sensoriais em nenhum dos atributos avaliados quando se comparado o produto produzido com o programa de cozimento proposto com o padrão existente.

4.12.3 Impactos Financeiros

Com a implantação do novo programa de cozimento foi possível atingir uma redução de cerca de 60 minutos a cada batelada produzida.

Através da redução no tempo do processo foi possível obter um ganho em torno de 14% no tempo total de cozimento, possibilitando assim o aumento da capacidade do processo de cozimento (13 toneladas/dia), melhora na eficiência, bem como a redução no consumo de utilidades (energia e vapor). Esses retornos foram de extrema importância para empresa em que foi realizado o estudo uma vez que essa etapa é considerada atualmente como restritiva (gargalo) do processo.

Neste capítulo foram apresentadas as informações gerais do produto utilizado no estudo bem como os dados operacionais do processo industrial. Inicialmente foi realizada a avaliação da estabilidade do processo seguida do perfil de temperatura ao longo do cozimento o qual foi de extrema importância para o entendimento do comportamento do processo ao longo do tempo. Na sequência foram determinadas as demais variáveis utilizadas no modelo.

Por fim, foi apresentado o modelo matemático elaborado, os resultados da modelagem matemática para a etapa de cozimento e os ganhos financeiros obtidos com a otimização do processo através da utilização do modelo matemático.

CAPITULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

O cozimento de linguças tipo calabresas em estufas, ou também denominados fornos, foram realizadas e seus resultados foram comparados com os valores simulados pelo modelo proposto.

O resultado final da correlação foi de $R^2 = 0,99$ indicando significativa correlação dos resultados experimentais frente aos resultados simulados para a temperatura.

A necessidade de algumas simplificações e ajustes de alguns parâmetros foram realizadas devido ao conhecimento do processo e do comportamento dessas variáveis, como as velocidades de entrada de fumaça e ar no interior do forno em cada etapa do programa.

A metodologia utilizada incluindo a comparação dos dados experimentais e simulados permitiu a validação do modelo revelando-se como uma ferramenta de extrema utilidade para utilização na indústria de alimentos. Isto se justifica, uma vez que pequenos ganhos seja em redução de tempo de secagem como também em perda de peso resultam em consideráveis ganhos financeiros.

De posse dessas informações foi possível atuar na otimização do processo e utilizar as informações obtidas no diagnóstico e otimização de outros fornos similares existentes na planta industrial acarretando assim em ganhos elevados para a empresa em que foi realizado o estudo.

Finalmente, pode-se dizer que o modelo matemático proposto é apropriado para a secagem da linguça em estudo, permitindo a otimização do processo sendo possível a redução de custo de produção.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade nesta linha de trabalho, algumas sugestões são citadas abaixo:

- Determinar a influência da pressão de alimentação de vapor nas estufas de cozimento

- Avaliação da velocidade de rotação dos fumegadores no processo
- Influência do aumento do volume de produto a cada batelada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE, L.A. **Enciclopédia de Automática. Controle e Automação**. Vol. 1, São Paulo: Editora Blucher, 2007.
- ALMEIDA, L. W.; SILVA, K. P.; VERTUAN, R. E. **Modelagem Matemática na Educação Básica**. São Paulo: Contexto, 2011, 157 p.
- AOAC. **Association of official analytical chemists**. Official Methods of Analysis of AOAC International. V. II., 2000.
- AOAC. **Official methods of analysis**. AOAC International 19th ed. American Public Health, 2007.
- ARAÚJO, J. L., QUEIROZ, A. J. M., FIGUEIREDO, R. M. F. **Propriedades termofísicas da polpa do cupuaçu com diferentes teores de sólidos**. Ciência Agrotécnica. Lavras, v.28, n.1, p.126-134, jan/fev, 2004.
- ARIMA, H. K., LEMOS, A. L. S. C. **Importância da qualidade das matérias-primas cárneas no processamento de embutidos**. Princípios do processamento de embutidos cárneos. 1 ed. Campinas – SP: CTC/ITAL, 2002, v. 1, p. 137-150.
- BARROZO, M. A. S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. **Secagem de grãos em camada fina: um estudo sobre as equações de secagem**. Revista Brasileira de Engenharia Química, v. XIV, n.1, 1998.
- BASSANEZI, R. C. **Ensino Aprendizagem com Modelagem Matemática**. Editora Contexto, 2002.
- BOTHE, D. R. **Measuring process capability**. New York: McGraw-Hill; 1997.
- BRASIL. Ministério da Saúde, ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Instrução Normativa nº4, de 31 de março de 2000. **Regulamento técnico de identidade e qualidade de linguças**. Disponível em <www.anvisa.gov.br>. Acessado em: Abril de 2014.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Laboratório Nacional de Referência Animal. **Métodos analíticos oficiais para controle de produtos de origem animal e seus ingredientes: II – Métodos físicos e químicos**. Brasília, 1981.
- BRUSINOX. Indústria e Comércio de Máquinas e Equipamentos LTDA, Disponível em: <www.brusinox.com.br>, acessado em 19 de setembro de 2014.
- BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Apostila do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- CAVALCANTE, J. A. **Análise experimental da cinética de secagem da alga marinha *Sargassum sp.*** Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 2003. 169 p. Tese de Doutorado.
- DAUDIN, J. D., KONDJOYAN, A., SIRAMI, J. **Water and salt transfers analysis in drying of sausages**. In **Proceedings of the 38th International Congress of Meat Science and Technology**, Clermont- Ferrand, France, 1992.

DENN, M., **Process modeling**, Longman, New York, 1986.

DESMOND, E. M.; KENNY, T.A.; WARD, P.; SUN, D-W. **Effect of rapid and conventional cooling methods on the quality of cooked ham joints**. Meat Science, v. 56, p. 271-277, 2000.

DIAZ, P.S. **Secagem**. Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas – Disciplina de Operações Unitárias, Pelotas, 2009.

DUTCOSKY, D.S. **Análise Sensorial de Alimentos**. 3ª Edição, Editora: Champagnat. PUCPR - Curitiba, 2011.

EYKHOFF P., **System identification: parameter and state estimation**. Chichester, England: Wiley, 1974. 555 p. [University of Technology, Eindhoven, The Netherlands]

FARIAS, J. C. A **ISO 9000:2000 e o CEP**. Revista Controle da Qualidade. São Paulo, Editora Banas, Agosto, 2001.

FERNANDES, L.P.; COSTA, V.J.; THOMAS, G.C. **Modelagem matemática da secagem de madeira em estufas – fase de aquecimento**. Curitiba: Associação Brasileira de Ciência dos Materiais, 2006. 12p.

FERREIRA, A. B. H. **Novo Aurélio: O Dicionário da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Lexikon Informática Ltda.; Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 2000. 1 CD-ROM.

FIGUEIRÓ, I. S. **Influência da redução do teor de nitrito de sódio na estabilidade oxidativa e avaliação microbiológica de linguiça suína frescal**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, 2013.

FLORAC, A., CARLETON, A. D., **Measuring the Software Process: Statistical Process Control for Software Process Improvement**, Addison-Wesley, 1999.

FONTANA, A. J. *et al*, **Simultaneous Thermal Conductivity, Thermal Resistivity, and Thermal Diffusivity Measurement of Selected Foods and Soils**. California, USA: ASAE (The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems), 2001.

FOUST, A.S. et al. **Princípios de Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

FORTES, M.; OKOS, M.R. **Drying theories: their bases and limitations as applied to foods na grains**. In: MUJUMDAR, A. S. Advances in Drying. Washington: McGraw-Hill, v.1 p. 119-154, 1980.

FREIRE, F. N. A.; SILVA, M. E. V.; ZAPATA, J. F. F.; MAIA, G. A. **Desidratação de músculo de pescado em bancada experimental de secagem**. Brazilian Journal of Food Technology, v.6, n.2, p.273-278, 2003.

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. Editora da Universidade de São Paulo, 2009

GEANKOPLIS, C. **Transport and Unit Operations**. 2nd Ed. Prentice-Hall International Inc. New Jersey, USA. 921p.1983.

GONÇALVES, J. R. **Classificação dos embutidos cárneos. Princípios do processamento de embutidos cárneos** – ITAL, p.03-10, 2002.

HENING, E.; CARVALHO, O. M.; WALTERB, C. F.; SOUZA, N. S.; SAMOBYLB, R. W. **Estudo da Aplicação de Gráficos de Controle Estatístico de Processo em Indicadores de Qualidade de Água**. Revista Sistemas & Gestão, 2014, pp 2-13.

HU, Z.; SUN, D.W. **CFD simulation of heat and moisture transfer for predicting cooling rate and weight loss of cooked ham during air-blast chilling process**. Journal of Food Engineering, v.46, Issue 3, p.189-197. 2000.

HULLBERG, A.; LUNDSTROM, K. **The effects of RN genotype and tumbling yield in cured smoked pork loins**. Meat Science, v. 67, p. 409-419, 2004.

INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 5ª edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, Brasil, 698p., 2003.

INCROPERA, F.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 645p.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ, **Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos**, ANVISA, Brasília, 5ª Ed. 2005.

KARATHANOS, V. T.; BELESSIOTIS, V. G. **Application of thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits**. Journal Agriculture Engineering Research, v.74, p.355-361, 1999.

LEWIS, W.K. **The rate of drying of solids materials**. The Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v.13, n.5, p.427-32, 1921.

LINDEMANN, C; SCHMIDT, V.W. **Relatório de Laboratório de Operações Unitárias: Secagem em leite de jorro**, Rio Grande, Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande, 2010.

LOBO, R. N.; SILVA, D. L. **Planejamento e Controle da Produção**. Editora Érica, 2014

LUIKOV, A. V. **Analytical Heat Diffusion Theory**, Academic Press, Inc. Ltd., London, England, 1968.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. **The thin layer drying characteristic of garlic slices**. Journal of Food Engineering, v.29,p.75-97, 1996.

MARCOTTE, M. **Propriedades Termofísicas**. Food Research and Development Centre, 2005.

MATHIOULAKIS, E.; KARATHANOS, V.T.; BELESSIOTIS, V.G. **Simulation of air movement in a dryer by computational fluid dynamics: application for the drying of fruits**. Journal of Food Engineering, v.36,n.2, p. 183–200, 1998.

McMEEKIN, T. A.; OLLEY, M. B.; ROSS, T., RATKOWSKY, D. A., **Predictive Microbiology: theory and application. Researches Studies**, p. 1-86, 1993.

MENON, A. S., MUJUMDAR, A. S. **Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers: Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel DekkerInc., 1987.

MIYAGI, P. E. **Introdução a Simulação Discreta**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. São Paulo, 2006.

MIRADE, P.S.; DAUDIN, J.D. **A numerical study of the airflow patterns in a sausage dryer**. *Drying Technology*, v.18, 1&2, p. 81–97, 2000.

MIRADE, P.S., KONDOYAN, A., DAUDIN, J. D., **Three-dimensional CFD calculations for designing large food chillers**. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.34, pp.67-88, May 2002.

MIRANDA, A. M. **Escoamento Laminar de Fluidos Viscosos: Equações de Navier Stokes**. Catalão, Goiás, 2007

MISTRY, H.; GANAPATHI-SUBBU.; DEY, S.; BISHNOI, P.; CASTILLO, J.L. **Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens**. *Applied Thermal Engineering*, v.26, p.2448–2456, 2006.

MOHAPATRO, D.; RAO, P.S. **A thin layer drying model of parboiled wheat**. *Journal of Food Engineering*, v.66, n.4, p.513-18, 2005.

MOLINA-FILHO, L.; PEDRO, M. A. M.; TELIS-ROMERO, J.; BARBOZA, S. H. R. **Influência da temperatura e da concentração de cloreto de sódio (NaCl) nas isotermas de sorção da carne de tambaqui** (*Colossoma Nacroparum*). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.26, n.2, p.453-458, 2006.

MONTGOMERY, D. C., 2004, **Introduction to Statistical Quality Control**, John Wiley & Sons, 2004.

MOURA, S. C. S. R. M.; FRANÇA, V. C. L.; LEAL, C. B. L., **Propriedades termofísicas de soluções modelos similares a sucos – Parte I**. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 23, n. 1, Campinas, Jan.-Abr. 2003.

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of industrial drying**. New York: Marcel Dekker. V.1, 1995.

NAKASHIMA, S. M. K.; ANDRÉ, D. S. ; FRANCO, B. D. G. M. Revisão: Aspectos Básicos da Microbiologia Preditiva. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 3, p.41-51, 2000.

NORTON, T.; SUN, D.W. **Computational fluid dynamics (CFD)-an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review**. *Trends in Food Science & Technology*. Volume 17, n.11, p 600- 620, 2006.

ODA, S. H. I.; SOARES, A. L. ; LARA, J. A. F.; YAMASHITA, F.; IDA, E. I. ;SHIMOKOMAKI, M. **Revista Nacional da Carne**, edição n 317, julho 2003

OLIVO, R. **A Fórmula da saúde**. In: PARMIGIANI, Patrick ;TORRES, Ricardo. *Revista Nacional da Carne* Janeiro/2007 n° 359. pág 37.

ORDÓÑEZ, J.A. **Tecnologia de alimentos. Vol. 1 e 2**. São Paulo: Artmed, 2005.

PACHECO, C.R.F. **Conceitos Básicos de Secagem**. São Paulo, Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. **Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem**, Campinas, CT&EA – Centro de Tecnologia e Engenharia Agroindustrial, 2007.

PEREDA, J.A.O.; RODRIGUEZ, M.I.C.; ÁLBAREZ, L.F.; SANZ, M.L.G.; MINQUILLÓM, G.D.G.F.; PERALES, L. de la H.; CORTECERO, M.D.S; **Tecnología de Alimentos**. v. 1. Porto Alegre, Artmed Editora, 2005.

PIAIA, J. C. Z. **Experimentação e modelagem 3D aplicadas a fornos industriais**. 2009.

RABI, J. A. **Modelagem e simulação de processos agroindustriais**. 2011.

RAMOS, A. W. **CEP para processos contínuos e em bateladas**. São Paulo. Editora Edgard Blucher; 2000.

RAMOS, E. M. L. S. Aperfeiçoamento e desenvolvimento de ferramentas do controle estatístico de qualidade. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

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

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

ROZENFELD, H. **A fábrica do futuro**. São Paulo: Banas, 1999.

SANTOS, J. K. C., BATISTA, N. S. **Controle estatístico de processo: uma ferramenta para validação do processo de envase**. Universidade Federal de Pernambuco, 2005.

SEBORG, D., EDGAR, T., MELLICHAMP, D., **Process Dynamics and Control**. 2 ed. New York, John Wiley & Sons, 2004.

SHEWART, W. A., **Economic Control of Quality of Manufactured Product**, ASQ, PR, 1980.

SHIMOKOMAKI, M.; RUBISON, O.; TERRA, N.N. **Atualidades em ciência e tecnologia de carnes**. Ed. Varela, 1ª ed. 236p, 2006, Editora Varela

SILVA, J. A., **Tópicos da tecnologia de alimentos**, Varela São Paulo, pg. 219, 2000.

SILVA, M. O., **Otimização de um processo de cozimento de linguiça**. Universidade Regional Integrada. Erechim: URI, 2011.

SIMAL, S.; FEMENIA, A.; PASCUAL, G.P.; ROSSELLÓ, C. **Simulation of the drying curves of a meat-based product: effect of the external resistance to mass transfer**. Journal of Food Engineering. n.58,p.193-199, 2003.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introduction to food engineering**. 4th ed. London: Academic Press, c2009. xxii, 841 p. (Food Science and Technology, International Series).

SODRÉ, U. **Modelos Matemáticos**. Notas de aulas. Dep. de Matematica da UEL, 2007.

SOUZA, M. L. S. **Solid Fuels Combustion and Gaseification: Modeling, Simulation, and Equipment Operation**. New York: Marcel Dekker (CRC Press), 2004.

STIGTER, J. D.; SCHEERLINCK, N.; NICOLAÏ, B.; VAN IMPE, J. F. **Optimal heating strategies for a convection oven**. Journal of Food Engineering, v.48, p.335-344, 2001.

TEIXEIRA, E.; MAINERT, E. M.; BARBETTA, P. A. **Análise Sensorial de Alimentos**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1987.

TEIXEIRA NETO, R.O. **Levantamento e aplicação de isotermas**. In: JARDIM, D.C.P. I Seminário sobre atividade de água em alimentos. Campinas: Ital, 1987.

TERRA, N. **Apontamento sobre Tecnologia de Carnes**. Editora Unisinos, 2000; São Leopoldo.

THORPE, G.R. **The application of computational fluid dynamics codes to simulate heat and moisture transfer in storage grains**. Journal of Stored Products Research, v.44, p. 21-31, 2008.

TRIVELATO, G. C. **Técnicas de Modelagem e Simulação de Sistemas Dinâmicos**. Ministério da Ciência e Tecnologia. INPE. São José dos Campos, 2003.

VEIGA, R. L. **Inspeção de Produtos Cárneos Acabados**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves, 2011.

WHEELER, D. J., CHAMBERS, D. S., **Understanding Statistical Process Control**, 2nd ed. Knoxville, SPC Press, 1992.

WHELLER, E. F., **Practical Applications of Statistical Process Control**, IEEE Software, Volume 17, Issue 3, pp. 48-55, 2000.