

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
CURSO ENGENHARIA DE ALIMENTOS

RAFAELA MARISE HALL

**ESTUDO DE CASO: Ampliação da Capacidade de Refrigeração na Produção de
Presunto em uma Unidade Industrial**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA
2014

RAFAELA MARISE HALL

ESTUDO DE CASO: Ampliação da Capacidade de Refrigeração na Produção de Presunto em uma Unidade Industrial

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso Superior de Engenharia de Alimentos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Medianeira, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Ilton José Baraldi

MEDIANEIRA

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

O termo de aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

**A Deus e
À minha querida família, pelo amor e compreensão.**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me abençoar com paciência e sabedoria para a conclusão desse trabalho, e pelo seu infinito amor e misericórdia.

Ao professor Dr. Ilton Baraldi pela orientação, pelos ensinamentos, pela paciência e contribuição para a minha formação profissional.

Aos meus amigos e colegas da UTFPR pelo convívio, amizade, alegria e apoio nos momentos difíceis. Em especial à Camila Fávoro e à Monalisa Ohara, pelo companheirismo, pela paciência, e por ouvirem minhas lamúrias durante o curso. Vocês são incríveis e inesquecíveis.

Com todo coração aos meus amigos: Ariane, Carla, Chanaísa, Lucas e Taís, pois mesmo distante estão sempre ao meu lado. Obrigada pela amizade sincera.

À indústria parceira deste projeto, que viabilizou este trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia de Alimentos pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional, pela dedicação, empenho e por sempre estarem solícitos.

À UTFPR pela oportunidade de realização do trabalho e pela estrutura do campus oferecida para a realização dos experimentos.

E por fim, e em especial, à minha família, pela compreensão, pelo apoio incondicional, pela paciência e investimento durante essa jornada.

"Sobre tudo o que se deve guardar, guarda o teu coração, pois dele procedem as saídas da vida." (Provérbios 4:23)

RESUMO

HALL, Rafaela Marise. **ESTUDO DE CASO: Ampliação da Capacidade de Refrigeração na Produção de Presunto em uma Unidade Industrial.** 2014. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2014.

A conservação de alimentos pela aplicação de baixas temperaturas é um método antigo e muito utilizado, com isso conhecer o sistema de refrigeração a que o produto será submetido e realizar uma análise energética é de extrema importância, pois definindo essas condições operacionais consegue-se apontar os principais pontos para melhoria do desempenho do sistema. O objetivo do estudo foi realizar uma análise de consumo e eficiência energética do atual sistema de refrigeração industrial da linha de produção de presunto cozido, e propor uma melhoria no processo de resfriamento, objetivando a redução da capacidade de refrigeração ao dobrar a produção dia de produto. Foram utilizadas correlações empíricas para determinar as características do novo processo de resfriamento, determinando através de métodos iterativos os novos tempos e temperaturas do processo proposto. Foi realizado um comparativo dos gastos energéticos e os tempos de processo do processo atual e o proposto. O atual processo de refrigeração reduz a temperatura do produto de 70 °C até 8 °C, em tanques de imersão em água com princípio de funcionamento do sistema por compressão mecânica de vapor. Já o processo proposto consiste em duas etapas para o resfriamento do presunto, sendo a primeira etapa o resfriamento por convecção forçada de ar, reduzindo a temperatura do produto de 70 °C até 34 °C, e a segunda etapa reduzindo a temperatura do produto de 34 °C até 8 °C em tanques de imersão em água com o princípio de funcionamento do sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor. O processo proposto, com ar forçado, apresentou-se como uma boa alternativa para o processo de resfriamento de presunto, pois reduziu 58,1 % da capacidade de refrigeração pelo sistema de compressão mecânica de vapor, por eliminar já nessa etapa 36 °C. Com essa configuração foi possível reduzir o consumo de energia, por unidade de produto, de 8,61 kWh do atual processo para 5,6 kWh do processo proposto. E com a nova proposta o consumo do frio seria reduzido em 58,1%, redução essa devido ao fato do processo de pré-resfriamento eliminar gastos nessa etapa.

Palavras-chave: Presunto. Capacidade térmica. Transferência de calor. Gasto energético.

ABSTRACT

Food preservation through refrigeration is an old and widely used method, thereby knowledge the cooling system to which the product will be submitted to, and perform an energy analysis is very important to define operational conditions, in order to improve the system performance. The aims of the study was to analysis of consumption and energy efficiency of the current industrial cooling system of a cooked ham production line, and propose an improvement in the cooling process, aimed to reducing cooling capacity when production capacity is doubled. Empirical correlations were used to determine the characteristics of the new cooling process, calculated through iterative methods the times and temperatures of the proposed process. Energy consumption and cooling rate were compared between current a new cooling process proposed. Actual cooling process reduces the product temperature from 70 ° C to 8 ° C, through immersion in hilled water tanks cooled by mechanical steam compression system. The proposed process consists of two steps for the cooling of ham, the first step through forced convection with air, reducing the product temperature from 70 ° C to 34 ° C, and the second stage reducing the temperature of the product from 34 ° C to 8 ° C through immersion in chilled water with the principle of operation of the refrigeration system by mechanical steam compression. The proposed process, with forced air convection, was presented as feasible alternative for ham cooling process due to it reduced 58.1% of the cooling capacity by mechanical compression of steam system, by reducing 36 ° C in this step. With this configuration it was possible to reduce energy consumption per unit of product from 8.61 kWh to 5.6 kWh of the proposed process. And with the new proposal the mechanical steam compression system capacity can be reduced 58.1%, due to pre-cooling with air reduce cooling capacity need in this stage.

Keywords: Ham. Thermal Capacity. Heat Transfer. Energy Expenditure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismos de transferência de calor por convecção (1) e por condução (2).....	23
Figura 2. Ciclo de compressão mecânica de vapor.	26
Figura 3. Estrutura metálica onde as peças de presunto são acondicionadas.	32
Figura 4. Dimensões da estrutura metálica.	32
Figura 5. Tanques de cozimento.....	33
Figura 6. Tanques de resfriamento.	33
Figura 7. Dimensões dos tanques de resfriamento e cozimento.	34
Figura 8. Formas de produção de presuntos.	34
Figura 9. Dimensões das formas de presunto.	34
Figura 10. Esboço de uma matriz tubular com escoamento externo.....	40
Figura 11. Metodologia adotada para validação do experimento.	42
Figura 12. Taxa de aquecimento e fluxo de calor na amostra de presunto liofilizada, pelo método do DSC.	43
Figura 13. Fluxograma das etapas de cozimento e resfriamento.....	44
Figura 14. Processo de cozimento (a), seguido pelo processo de resfriamento (c). (b) estrutura metálica onde os presuntos são acondicionados.....	45
Figura 15. Fluxograma do processo de resfriamento proposto.	47
Figura 16. Proposta de resfriamento de presunto. (a) tanque de cozimento, (b) cabine de pré-resfriamento com ar, (c) tanque de resfriamento com água e (d) estrutura que condiciona os presuntos.	47
Figura 17. Condição proposta inicialmente para determinação do $h_{máx}$	48
Figura 18. Curvas numéricas da variação de temperatura interna do presunto, ao longo do tempo de pré-resfriamento, com a variação do coeficiente convectivo.	50
Figura 19. Configuração da velocidade do ar na cabine de exaustão.....	51
Figura 20. Representação da passagem do ar pela estrutura metálica, dentro da cabine de exaustão.....	53
Figura 21. Comportamento da temperatura interna do presunto nas etapas de pré-resfriamento (ar) e resfriamento com imersão (água).....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Padrões físico-químicos para presunto cozido	19
Tabela 2. Padrões sensoriais para presunto cozido	19
Tabela 3. Dados e condições de operação do processo de resfriamento e cozimento de presunto ...	35
Tabela 4. Propriedades termofísicas do ar	36
Tabela 5. Propriedades termofísicas dos isolantes térmicos.....	36
Tabela 6. Propriedades termofísicas do inox.....	36
Tabela 7. Constantes da equação 9 para a matriz tubular em escoamento alinhado.....	40
Tabela 8. Gastos de energia envolvidos no processo de cozimento e resfriamento	45
Tabela 9. Comportamento da temperatura (°C) no decorrer do processo modificando o coeficiente de transferência de calor	48
Tabela 10. Simulação da redução de temperatura interna do produto após cinco horas de resfriamento.....	51
Tabela 11. Resultados da velocidade do ar e da perda de carga modificando o valor do coeficiente convectivo	52
Tabela 12. Comparativo dos valores de temperatura obtidos no processo de pré-resfriamento pelo modelo e experimentalmente	54
Tabela 13. Gatos de energia para manter a atual configuração do processo de resfriamento.....	56

LISTA DE SÍMBOLOS

h	Coeficiente de transferência de calor	W/m ² °C
ρ	Massa específica	kg/m ³
m	Massa	kg
V	Volume	m ³
c_p	Calor específico	kJ/kg°C
K	Condutividade térmica	W/m°C
α	Difusividade térmica	m ² /s
γ	Viscosidade cinemática	m ² /s
f.c.	Fator de correção	-
dT	Variação de temperatura	-
dQ	Variação de calor	-
Q	Calor	kcal/h
ΔT	Variação de temperatura	° C
q_{conv}	Fluxo de calor por convecção	kcal/h
A	Área	m ²
T_s	Temperatura da superfície	° C
T_∞	Temperatura do ar	° C
q_{cond}	Fluxo de calor por condução	kcal/h
∂t	Variação do tempo	-
Bi	Número de Biot	Adimensional
L	Dimensão característica do alimento	m
Re	Número de Reynolds	Adimensional
v	Velocidade	m/s
Nu	Número de Nusselt	Adimensional
Pr	Número de Prandtl	Adimensional
C_2	Constante	-
C	Constante	-
Pr_s	Número de Prandtl do filme	Adimensional

$v_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima	m/s
D_h	Diâmetro hidráulico	m
v_1	Velocidade do ar	m/s
A_{ET}	rea total da estrutura	m ²
A_E	rea da estrutura subtraída da área da forma	m ²
θ^*	Adimensional de temperatura	-
C_n	Constante	-
ξ_n	Valores discretos (autovalores)	-
Fo	Número de Fourier	Adimensional
x	Comprimento	m
t	Tempo	s ou h
T	Temperatura final	 C
T_i	Temperatura inicial	 C
$h_{m\acute{a}x}$	Coeficiente de transferência de calor máximo	W/m ² C
f	Fator de atrito	-
h_f	Perda de carga pro atrito	m
g	Unidade de aceleração	m/s ²
P	Perímetro	m

LISTA DE SIGLAS

ABCS - Associação Brasileira de Criadores de Suínos
 UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
 DSC - Calorimetria Explortria Diferencial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 HISTÓRICO DA CARNE SUÍNA	18
3.2 PRESUNTO COZIDO	18
3.3 EMPREGO DO FRIO NA CONSERVAÇÃO DE ALIMENTOS	21
3.4 RESFRIAMENTO	23
3.4.1 Resfriamento por mecanismos de transferência de calor	23
3.4.1.1 Coeficiente de transferência de calor.....	24
3.4.2 Refrigeração por compressão de vapor.....	25
3.4.2.1 Principais componentes de um sistema frigorífico por compressão de vapor.....	26
3.4.3 Resfriamento por ar forçado	27
3.5 PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	28
3.5.1 Massa específica	29
3.5.2 Calor específico	29
3.5.3 Condutividade térmica	29
3.5.4 Difusividade térmica	29
4 MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS.....	31
4.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS	35
4.3 DETERMINAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR	37
4.3.1 Parâmetros adimensionais	38
4.3.2 Solução analítica para condução em regime transiente	39
4.4 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO ANALÍTICA.....	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1 DETERMINAÇÃO DO CALOR ESPECÍFICO	43

5.2 CONDIÇÃO ATUAL DO PROCESSO DE COZIMENTO E RESFRIAMENTO.....	43
5.2.1 Calor envolvido nos processos de cozimento e resfriamento.....	45
5.3 DESCRIÇÃO DA PROPOSTA DE RESFRIAMENTO.....	46
5.3.1 Determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor.....	47
5.3.2 Determinação do tempo de pré-resfriamento.....	50
5.3.3 Determinação da velocidade do ar.....	51
5.3.4 Descrição do sistema de resfriamento com ar forçado.....	52
5.4 VALIDAÇÃO DO PROCESSO PROPOSTO.....	53
5.5 COMPARATIVO ENTRE OS DOIS PROCESSOS.....	56
5.5.1 Gastos de energia elétrica no processo de resfriamento.....	57
6 CONCLUSÃO.....	59
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

O consumidor brasileiro passou a comprar mais alimentos industrializados, com isso as indústrias tendem a responder aumentando sua capacidade instalada, em quantidade superior a tal crescimento, já antecipando necessidades futuras.

Em um mercado competitivo, em que o público consumidor tem acesso rápido e fácil a diversos produtos e/ou serviços, a agilidade com que a empresa faz seu produto chegar ao cliente pode ser vista como um dos fatores determinantes para o sucesso de uma organização e, conseqüentemente, para o aumento do grau de sua competitividade no mercado (CORRÊA, 2004).

A economia brasileira apresenta um crescimento expressivo na área da agroindústria e as novas tecnologias são promissoras, principalmente por aumentarem a produtividade aliada à preocupação com a qualidade e com a questão ambiental. O conhecimento técnico e científico é fundamental para que as empresas nacionais estejam preparadas para implantação dessas tecnologias e possam prosperar em um mercado competitivo, sendo bem sucedidas (SLONGO, 2008).

A crescente demanda do mercado consumidor por produtos de alta qualidade revela a necessidade da utilização de tecnologias, que proporcionam a segurança dos alimentos durante a produção e que causem mínimas alterações no produto. Dentre essas tecnologias destaca-se a utilização de frio para produção e conservação dos produtos. Segundo Silva (2001), com a finalidade de aumentar a vida útil de produtos alimentícios usa-se a conservação pelo frio, podendo ser por refrigeração ou congelamento.

A seleção de um método apropriado de resfriamento ou congelamento depende da utilização futura do produto a ser submetido a tal processo. Para selecionar um método de resfriamento ou congelamento eficiente e rápido, alguns fatores devem ser considerados, incluindo a temperatura do produto, a fisiologia do produto, os custos de equipamentos e operações, bem como o resfriamento ou congelamento exigido (MITCHELL, 1992).

Grande parte da refrigeração industrial dos alimentos ocorre por jato de ar (convecção forçada), água de pulverização e resfriamento por imersão (NECKEL; MARIANI, 2010). A técnica de resfriamento por imersão é simples, com baixo custo

operacional, resfriando o produto de forma rápida (KAYS, 1991). Vigneault et al. (2002) afirmam que o resfriamento com ar forçado tem custo inferior contudo exige duas a três vezes mais tempo de congelamento quando comparado ao resfriamento por imersão em água gelada e resfriamento a vácuo.

Para tanto a escolha adequada do projeto de equipamentos de refrigeração de alimentos exige a estimativa dos tempos de resfriamento, bem como as cargas de refrigeração correspondentes. A precisão dessas estimativas, por sua vez, depende de estimativas precisas do coeficiente de transferência de calor da superfície para a operação de resfriamento ou congelamento (NECKEL; MARIANI, 2010). Assim, existem inúmeras correlações envolvendo os números de Nusselt, Reynolds e Prandtl que podem ser utilizadas pelos projetistas de sistemas de refrigeração de alimentos.

Dentro do contexto abordado acima, o presente trabalho busca analisar a atual capacidade de refrigeração da linha de produção de presunto cozido, de uma Unidade Industrial da Região Oeste do Paraná, e investigar a viabilidade de aumentar a capacidade de resfriamento buscando novas alternativas para o processo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise de consumo e eficiência energética do atual sistema de refrigeração industrial da linha de produção de presunto cozido, de uma Unidade Industrial da Região Oeste do Paraná. Além disso, pretende-se determinar uma configuração ideal para suprir a demanda da ampliação da linha de produção de presunto, com menor consumo de energia buscando novas alternativas de resfriamento do produto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as condições de operação do sistema de refrigeração existente;
- Determinar as propriedades termofísicas do presunto;
- Analisar o consumo energético do atual sistema de refrigeração;
- Estudar o desempenho termodinâmico do processo de refrigeração;
- Propor um procedimento de otimização do perfil de carga térmica dos equipamentos, com o objetivo de reduzir os custos operacionais do sistema preservando as características de qualidade do produto;
- Calcular o consumo energético do sistema de refrigeração para dobrar a produção diária de presunto cozido.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 HISTÓRICO DA CARNE SUÍNA

No início da década de 80 com a expansão de grandes redes de supermercados e consolidação do autosserviço nos setores de açougue dessas redes, os hábitos de compra de carnes sofreram consideráveis mudanças. Dentro desse conceito de grandes volumes e diversificação de sortimento de carnes, grandes esforços foram realizados para o aumento do consumo de carne suína (SANTOS, 2005).

Tanto a produção quanto o mercado de carnes e derivados nos países em desenvolvimento vêm crescendo significativamente. A produção de suínos está deixando de ser uma atividade de suinocultores familiares e passando a grandes operações, geralmente controladas por corporações agroindustriais (SANTOS, 2005).

Segunda a Associação Brasileira de Criadores de Suínos (ABCS) (2011), o maior preço da carne bovina nas gôndolas dos supermercados assustou os seus tradicionais consumidores, que migraram principalmente para os produtos suínos in natura e processados em 2010. Já no ano de 2011, a carne bovina permaneceu em patamares aceitáveis para o consumidor, que mesmo assim deu preferência à carne suína. Ainda longe de ser a proteína mais consumida no país, é fato que a carne suína está mais presente na mesa do brasileiro.

No ano de 2011 a carne suína apresentou aumento no consumo de 4,9% em relação a 2010 – passando de 3,24 milhões de toneladas para 3,5 milhões. Já o abate de suínos teve ampliação de 5,5%, saltando de 34,3 milhões de cabeças para 36,2 milhões (ABCS, 2011).

3.2 PRESUNTO COZIDO

Entende-se por presunto cozido, o produto cárneo industrializado obtido exclusivamente com o pernil de suínos, desossado, adicionado de ingredientes, e submetido ao processo térmico adequado. Os ingredientes obrigatórios são a carne de pernil suíno, sal, nitrito e/ou nitrato de sódio e/ou potássio em forma de salmoura

e os ingredientes opcionais são: proteína de origem animal e/ou vegetal, açúcares, maltodextrina, condimentos, aromas e especiarias. Permite-se a adição de proteínas não cárneas na forma agregada de 2,0% (máximo) para presunto cozido (BRASIL, 2000).

Segundo a legislação vigente, o presunto cozido deve atender aos critérios físico-químicos (BRASIL, 2000) e sensoriais (BRASIL, 2000) listados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Padrões físico-químicos para presunto cozido

Classificação	Relação Umidade/Proteína (% max.)	Proteína (% mín.)	Carboidratos (% max.)
Presunto Cozido	5,35	14,0	2,0

Fonte: Brasil, 2000.

Tabela 2. Padrões sensoriais para presunto cozido

Características Sensoriais	Padrão
Textura	Características
Cor	Característica
Sabor	Característico
Odor	Característico

Fonte: Brasil, 2000.

A tecnologia de fabricação do presunto cozido evoluiu muito com o passar do tempo, sendo a década de 80 um marco altamente significativo, pois coincide com o aparecimento do processo *cook-in*. Nesse processo, a peça cárnea é cozida dentro da embalagem de comercialização, possibilitando triplicar a vida de prateleira do presunto. Outro fato marcante é que o produto passou a não mais ter redução de peso, mesmo após seu cozimento (TERRA, 1998).

A produção de presunto cozido obedece às linhas gerais de fabricação convencional, com as seguintes etapas: injeção, tangleamento, embalagem em filme plástico próprio e enformagem a vácuo (*cook-in*); cozimento; resfriamento e desenformagem (BRESSAN; PEREZ, 2001).

Os cuidados de fabricação do presunto iniciam-se verificando o pH do pernil, que deve estar entre 5,8 e 6,2. Sua temperatura deve ser de 2 °C. É indispensável

que após a desossa, as porções musculares sofram uma toailete com a retirada da gordura, do tecido conectivo, couro, nódulos e tendões (TERRA, 1998).

A aplicação dos agentes de cura é realizada na forma líquida, por injeção aplicadas no interior das massas musculares, numa proporção de até 10%. A composição da salmoura pode variar de acordo com a formulação da empresa. No processo de cura por injeção, a salmoura é bombeada para o interior da carne através de um sistema de agulhas, onde o produto segue por uma esteira e o sistema de agulhas possui movimento automático de sobe e desce (BRESSAN, PEREZ, 2001).

O tambleamento sob vácuo busca a uniformização da distribuição da salmoura e a extração das proteínas que irão unir os diferentes pedaços de carne em um bloco único. Os equipamentos são estáticos, possuindo sistema de pás que giram sobre seu eixo e fazem com que os músculos e a salmoura se movimentem. Esse massageamento deve ser intermitente, em temperaturas menores que 10 °C (TERRA, 1998).

No sistema *cook-in*, o acondicionamento do produto na embalagem é feito antes do cozimento (BRESSAN, PEREZ, 2001). As peças são colocadas na embalagem cujo filme, composto basicamente de poliamida e *surlyn*[®] (Du Pont[™]), permite a termoformagem e termocontração com a eliminação do ar, criando uma barreira durante as fases de estocagem e comercialização do produto (TERRA, 1998).

As peças assim protegidas são enformadas e submetidas ao cozimento em água quente ou estufa a vapor (TERRA, 1998). O cozimento recomendado é gradativo, em que a temperatura da água ou do vapor do tanque ou estufa de cozimento deve, inicialmente, estar entre 25 e 30°C acima da temperatura do produto a ser cozido. Essa temperatura será aumentada gradativamente (BRESSAN, PEREZ, 2001) até que a temperatura interna atinja 72 °C (TERRA, 1998).

O processo *cook-in* oferece as seguintes vantagens: aumento no rendimento, pois diminui a perda de peso pós cozimento; economia de trabalho, pois facilita a etapa de limpeza das formas; eliminação da operação de embalagem pós cozimento; maior tempo de conservação, já que evita o manuseio do produto após o processamento e qualidade da cor, por oferecer barreiras ao oxigênio (TERRA, 1998).

Após o cozimento, as peças de presunto são resfriadas em tanques ou em túneis de resfriamento, até temperaturas de aproximadamente 12 a 23 °C. Então, as peças seguem para um local de resfriamento onde permanecem até que a temperatura desejada seja atingida em seu interior. O resfriamento desempenha papel importante no processo *cook-in*, sendo imprescindível para a qualidade do produto (BRESSAN, PEREZ, 2001).

Após o resfriamento e a retirada do presunto da forma, caso o produto não seja direcionado diretamente para a expedição, é necessário que seja armazenado em ambiente com temperaturas entre 0 e 5°C para que o produto mantenha as características e propriedades com a qualidade desejada (BRESSAN, PEREZ, 2001).

3.3 EMPREGO DO FRIO NA CONSERVAÇÃO DE ALIMENTOS

O frio no processamento de alimentos age de maneira inibitória. De modo geral, as reações químicas, enzimáticas e o crescimento microbiológico são inibidos com a redução da temperatura (ORDÓÑEZ, 2005). Esse tipo de processo tem a finalidade de aumentar a vida útil de produtos alimentícios, seja de produtos formados por estruturas celulares ou pelos que não são formados por células (SILVA, 2001).

A temperatura é um dos fatores mais importantes para a conservação dos alimentos. Quando há um aumento de temperatura, a deterioração do alimento é acelerada, deixando-o vulnerável a agentes patogênicos. Segundo Neckel e Mariani (2010) o conhecimento das taxas de transferência de calor e massa e dos respectivos coeficientes de trocas térmicas permite a otimização do aporte dos recursos energéticos, o aumento de produtividade, a redução de perdas e o aumento da qualidade e da segurança do alimento. Tais propriedades são essenciais para a simulação da variação da temperatura no interior dos alimentos, e para as estimativas do tempo e da carga térmica do produto durante o congelamento e o resfriamento (RESENDE; SILVEIRA, 2002).

O processo de refrigeração é uma operação unitária, que difere dos demais processos de frio pelas temperaturas utilizadas, que estão compreendidas entre - 1 °C a 10 °C. A temperatura ideal é variável para cada tipo de produto, de acordo com seu ponto de congelamento (EVANGELISTA, 2000).

Na indústria, o resfriamento e o congelamento de produtos alimentícios são tratamentos de preservação amplamente utilizados. Ambos processos têm por objetivo manter o produto com qualidade até o consumo. A seleção de um método apropriado de resfriamento ou congelamento depende da utilização futura do produto a ser submetido a tal processo (MITCHELL, 1992).

Alguns dos métodos de resfriamento mais conhecidos são resfriamento por ar, resfriamento por água, resfriamento por gelo e resfriamento a vácuo.

A técnica de resfriamento por gelo consiste em colocar gelo picado ou moído em contato direto com a superfície do produto, sobre e/ou dentro de contêineres. A vantagem desse método é a manutenção da baixa temperatura e a alta umidade relativa do ar no meio refrigerante. Porém a colocação de gelo em contato direto com produtos quentes pode provocar estresse térmico considerável, podendo causar problemas de congelamento na superfície do produto. Além disso, ensaios em escala comercial demonstraram que a troca de calor entre o produto e o gelo é lenta. Devido a suas desvantagens, este método é considerado menos eficiente que o resfriamento à água e a ar forçado (VIGNEAULT; CORTEZ, 2002).

O método de resfriamento em água gelada consiste na utilização desta, obtida por agitação ou adição de gelo, na lavagem, aspersion, pulverização ou imersão. Um resfriamento eficiente depende da quantidade de água usada sobre o produto, sendo que ela deve ser distribuída de maneira uniforme sobre todo o produto. O tempo de resfriamento com água gelada depende do tamanho do produto (BECKER; FRICKE, 2002). A água usada no resfriamento é mantida a 0°C e 0,5°C, mediante a refrigeração mecânica. Os produtos que são sensíveis à injúria pelo frio podem ser resfriados em água a 0°C, desde que o tempo de resfriamento seja limitado. As unidades de resfriamento por água gelada requerem um grande potencial de refrigeração em um curto período de tempo (LINO; LINO, 2014).

Diferentemente de outros métodos de resfriamento, o resfriamento a vácuo remove calor através da evaporação da água, diminuindo significativamente o tempo de resfriamento (MCDONALD et al., 2000). Durante o resfriamento a vácuo, reduzindo-se a pressão do sistema, atinge-se a uma menor temperatura de ebulição da água, que evapora rapidamente do produto, resultando em seu resfriamento para garantir a evaporação (HOUSKA et al., 2003). Comparado a outros métodos, como resfriamento por convecção forçada de ar frio e por imersão em água, o resfriamento a vácuo é o método mais rápido. Porém, é o processo que causa a maior perda de

massa por estar intrinsecamente associado com a evaporação da água livre do produto (MCDONALD et al., 2000).

O resfriamento a ar forçado consiste em lançar jatos de ar sob pressão nos produtos ou recipientes que armazenam os mesmos (BRACKMANN et al., 2001). Esse é o método mais simples de refrigeração, mas podem existir modificações no sistema para melhorar a circulação do ar entre as embalagens de produto. As vantagens desse método é a simplicidade da operação, inexistência de picos na carga térmica e possibilidade de uso em produtos que são comercializados logo após a colheita, em produtos que são armazenados sem embalagem e com aqueles que requerem temperaturas amenas de resfriamento (LINO; LINO, 2014).

3.4 RESFRIAMENTO

3.4.1 Resfriamento por mecanismos de transferência de calor

Durante a etapa de resfriamento, os processos de transferência de calor relevantes podem ocorrer através de dois mecanismos conhecidos: condução e convecção. Dependendo do processo adotado, e do projeto de concepção pode-se predominar um ou outro mecanismo, porém na grande maioria dos casos, coexistem os dois mecanismos, como pode ser observado na Figura 1.

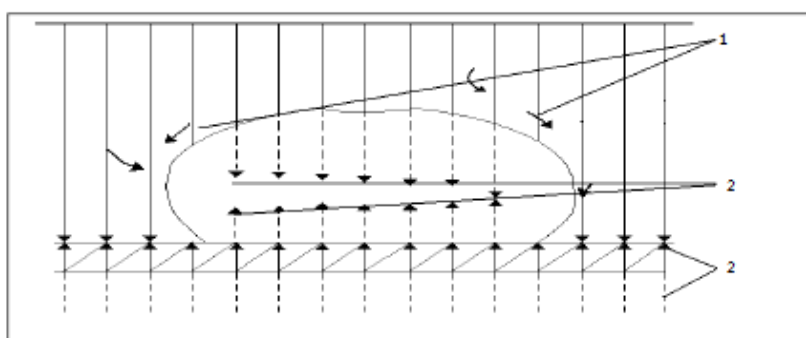


Figura 1. Mecanismos de transferência de calor por convecção (1) e por condução (2). Fonte: adaptado de Reis, 2012.

No contato do alimento com a esteira, bandejas ou recipientes, o alimento recebe calor por condução através da área de contato com o material. Já o meio

existente no interior da câmara transfere calor predominantemente por convecção para a superfície externa do produto (REIS, 2012).

A transferência de calor por condução consiste na troca de calor entre um fluido e a superfície de um sólido, quando estes estão em contato e se encontram em temperaturas diferentes, provocando, assim um gradiente de temperatura no interior do sólido e induzindo à transferência de calor por condução (SILVA, 2007). Para produtos planos, a transferência de calor por condução - em consequência da grande área de contato entre o alimento com a esteira ou bandeja - representa a fonte primária de transferência de calor (REIS, 2012).

A transferência de calor por convecção é classificada em convecção natural e convecção forçada, de acordo com a natureza do escoamento do fluido. Define-se convecção natural quando o movimento do fluido ocorre como resultado somente das diferenças de massa específica causadas pelos gradientes de temperatura. Quando o escoamento do fluido é induzido por agentes externos tal como uma bomba, o processo é denominado convecção forçada (SILVA, 2007).

3.4.1.1 Coeficiente de transferência de calor

O coeficiente convectivo de transferência de calor (h) representa a taxa de transferência de calor para cada grau de diferença de temperatura através da interface sólido-fluido por unidade de área da superfície do material sólido (CASTRO, 2004). O coeficiente de transferência de calor não é uma propriedade térmica, mas é necessário para projetar equipamentos que trabalhem com transferência de calor, bem como para validar estudos gerados, via simulação numérica do processo de resfriamento (ASHRAE, 1993).

O coeficiente de transferência de calor, em condições normais, varia com a velocidade do ar, com a área de escoamento, com as propriedades físicas do fluido, com a temperatura média e com a posição ao longo da superfície do corpo. Pode ser determinado analiticamente nos corpos que têm uma geometria simples. No escoamento sobre corpos com configuração complexas, utilizam-se métodos experimentais para determinar h (KREITH, 2002).

3.4.2 Refrigeração por compressão de vapor

Um ciclo de refrigeração nada mais é do que um sistema térmico que transfere energia em forma de calor de uma região de baixo potencial energético para uma região de alto potencial energético. Como o saldo de variação de energia é positivo, tem-se que a energia adentra no sistema, portanto, em um ciclo de refrigeração se faz necessária uma fonte de energia externa (FERZOLA, 2010).

Basicamente, um ciclo de refrigeração é composto por uma saída de calor, uma entrada de calor e uma entrada de trabalho. Esta entrada de trabalho é responsável pelo salto energético do ciclo (FERZOLA, 2010).

A refrigeração é produzida quase totalmente por meios artificiais, utilizando diferentes tipos de sistemas, dentre os quais destacam-se: refrigeração por absorção, refrigeração por compressão mecânica de vapor, refrigeração a ar, refrigeração termoelétrica e refrigeração termomagnética (NASCIMENTO, 2011).

A produção de frio por compressão mecânica de vapor utiliza um sistema que retira calor de um ambiente e transporta para outro utilizando um fluido refrigerante (TIZZEI, 2011). O fluido refrigerante é uma substância que, circulando dentro de um sistema fechado, é capaz de retirar calor de um ciclo enquanto se vaporiza a baixa pressão. Este fluido entra no evaporador a baixa pressão na forma de mistura líquido e vapor, e retira energia do meio interno refrigerado enquanto passa para o estado de vapor. O vapor entra no compressor onde é comprimido e bombeado, tornando-se vapor superaquecido e descolando-se para o condensador, que tem a função de liberar a energia retirada dos alimentos e a resultante do trabalho de compressão para o meio externo. O fluido, ao liberar energia, passa do estado de vapor superaquecido para líquido (condensação) e finalmente entra no dispositivo de expansão, onde tem sua pressão reduzida, para novamente ingressar no evaporador e repetir-se assim o ciclo (SILVA, 2003). Esse processo é ilustrado através da Figura 2.

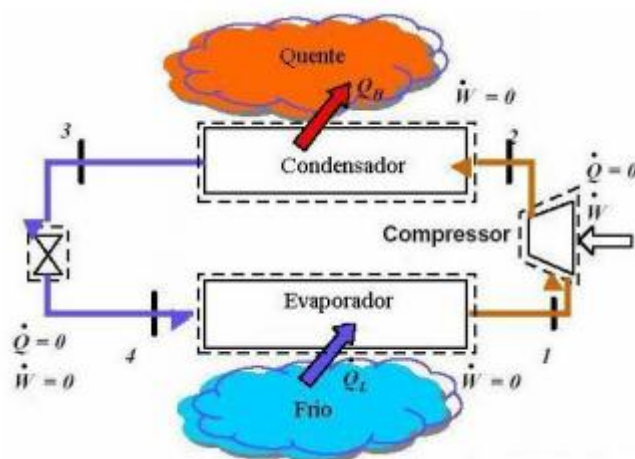


Figura 2. Ciclo de compressão mecânica de vapor. Fonte: Silva, 2011.

3.4.2.1 Principais componentes de um sistema frigorífico por compressão de vapor

Os equipamentos de refrigeração resfriam a câmara pelo princípio de compressão e descompressão de um fluido refrigerante. É importante ressaltar que somente o evaporador está localizado dentro da câmara (MARQUES, 2011).

A análise do ciclo termodinâmico efetuado pelo sistema tem um início no compressor. Sendo esse equipamento responsável pelo fornecimento de trabalho ao fluido refrigerante na forma de compressão do mesmo. É o componente mais controlável do sistema, podendo ser determinadas as suas pressões máximas e mínimas de trabalho, vazão volumétrica e potência do motor utilizado (FERZOLA, 2010).

O condensador é responsável pela retirada de calor do sistema para o ambiente. Após o fluido refrigerante ter sua temperatura e pressão elevadas no compressor, ele condensa, fornecendo calor para o ambiente na forma latente (FERZOLA, 2010). Os condensadores podem funcionar a água ou a ar. Os condensadores evaporativos são utilizados em conjunto com uma torre de arrefecimento, sendo mais comuns em instalações de maior porte. Já os condensadores a ar são amplamente utilizados na refrigeração doméstica e na refrigeração comercial (SILVA, 2003).

Os dispositivos de expansão têm a função de controlar a quantidade de líquido no evaporador, e de evitar que os vapores provenientes da evaporação sejam aspirados excessivamente quentes pelo compressor (SILVA, 2003). No

dispositivo de expansão ocorre a diminuição da pressão do fluido refrigerante com uma mudança de fase parcial de líquido para líquido mais gás (FERZOLA, 2010).

Os evaporadores são equipamentos que têm a função de retirar calor do meio a ser refrigerado diretamente pelo fluido refrigerante (sistemas de expansão direta), ou indiretamente através de serpentina de água gelada (sistemas de expansão indireta) (SILVA, 2003). No evaporador ocorre a entrada de calor do ambiente no sistema. Quanto maior for essa entrada de calor, maior será a geração de vapor e maior será a vazão mássica do sistema (FERZOLA, 2010).

Na fase de evaporação o líquido ao passar pelo evaporador é expandido e sofre sua vaporização, processo parcialmente iniciado pela válvula de expansão, retirando calor do ambiente interno ao qual se deseja refrigerar (TIZZEI, 2011).

3.4.3 Resfriamento por ar forçado

No sistema de resfriamento por ar forçado, é utilizado ar a baixa temperatura como meio de resfriamento, baseado no princípio de convecção. O ar é forçado através do produto, geralmente embalado em caixas, de forma a reduzir o tempo de congelamento (THOMPSON, 2004). Este processo pode ser aplicado em equipamentos de funcionamento contínuo ou em batelada.

O produto deve permanecer no túnel o tempo necessário para que a temperatura no seu centro térmico seja reduzida até o patamar desejado, sendo então, transferido para uma câmara de estocagem para manutenção desta condição até o momento da comercialização (SANTOS, 2005).

O tempo de resfriamento em sistemas de refrigeração por ar forçado é determinado pela temperatura do meio, pelas características do produto, pelo calor específico, pelo fluxo de ar e pela disposição e geometria do produto (BARBIN et al., 2009).

Dentre os fatores que influenciam a taxa de resfriamento por ar forçado, além da diferença de temperatura, estão a área de superfície de contato do meio de resfriamento com o produto, velocidade do ar de resfriamento e orientação da montagem e empilhamento do produto a ser resfriado (LAGUERRE et al., 2006). Sendo o movimento do ar sempre na direção do ar refrigerado para o produto, evitando a condensação de água sobre o produto (TERUEL et al., 2004).

Os sistemas de refrigeração por ar forçado podem ser com exaustão ou insuflação de ar. Promover a exaustão do ar, ao invés da insuflação, é mais adequado de forma a evitar que o ar passe por caminhos preferenciais, promovendo uma troca de calor mais uniforme. Neste sentido, o túnel de resfriamento por ar forçado à exaustão é muito utilizado. Esta forma de operação altera um dos pontos críticos do processo, que é o controle do fluxo do ar, já que ele determina a eficiência e homogeneidade dos tratamentos aos quais os produtos são submetidos (FRASER, 1998).

Quanto maior for a área de superfície exposta, maior vai ser a obtenção de um alto coeficiente de transferência de calor convectivo e aceitáveis taxas de fluxo de ar. A taxa de evaporação na superfície do produto também afeta significativamente a taxa de resfriamento. No início, o resfriamento evaporativo ocorre quando o ar não se encontra saturado, e é insuflado através de uma superfície úmida. O calor vai ser removido à medida que ocorre a evaporação da água na superfície do produto, conseqüentemente, ocorre diminuição da temperatura (VISSOTTO et al., 1999).

A utilização do sistema de resfriamento por ar forçado pode resultar em produtos de boa qualidade, menores perdas no processo, aumento no tempo de comercialização com menor desperdício e maiores ganhos (ASHRAE, 1994).

3.5 PROPRIEDADES TÉRMICAS

As propriedades termofísicas de alimentos resumem-se à sua habilidade de transferir calor, sendo essenciais para o desenvolvimento de cálculos de transferência de calor, para a simulação da variação da temperatura no interior dos alimentos, para as estimativas de tempos de processo e carga térmica dos produtos, que ocorrem em processos térmicos tais como refrigeração, congelamento e aquecimento (CASTRO, 2004).

Por essas razões, as propriedades devem ser conhecidas em situações diversas e modelos matemáticos devem ser usados para correlacioná-las ou, eventualmente, predizê-las (BECKER; FRICKE, 1999). As principais propriedades de interesse no processo de resfriamento são: calor específico, condutividade térmica, difusividade térmica, massa específica e coeficiente convectivo de transferência de calor.

3.5.1 Massa específica

A massa específica (ρ) pode ser definida pela relação entre a massa (m) e o volume (V) ocupado por um material biológico, podendo ser expressa em kg/m^3 (BOUKOULAS et al., 2006).

3.5.2 Calor específico

Segundo Borém et al. (2002) o calor específico à pressão constante (c_p) é entendido como a quantidade de calor necessária para alterar a temperatura de um corpo em 1 °C por unidade de massa, sem mudança de estado. Neste sentido, é importante parâmetro termodinâmico para a determinação da quantidade de energia a ser adicionada ou removida nos processos de aquecimento e resfriamento de alimentos (ARAUJO et al., 2004).

Em materiais sólidos de origem vegetal, as propriedades térmicas, tais como condutividade térmica, difusividade térmica e o calor específico, são funções do tipo, da temperatura e/ou do conteúdo de água do material.

3.5.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica (K) é uma propriedade do material que descreve a habilidade do mesmo de conduzir calor. Equivale à quantidade de calor transmitido em uma unidade de tempo através de uma espessura e área, ambas unitárias, com um diferencial de temperatura entre as faces (DÚSSAN SARRIA, 2003).

A condutividade térmica depende da composição do produto, principalmente da umidade, incluindo a presença de espaços vazios e do grau de homogeneidade estrutural (ARAUJO et al., 2004).

3.5.4 Difusividade térmica

A relação entre a habilidade de conduzir e armazenar energia de um material é conhecida como difusividade térmica (α). Materiais que apresentam altos valores de difusividade térmica respondem rapidamente à mudanças térmicas em

seu ambiente, enquanto materiais com baixos valores respondem mais lentamente demorando a atingir o novo estado de equilíbrio (INCROPERA et al., 2011).

A determinação dessa propriedade é de grande importância para os produtos alimentares, por ser indispensável para a predição de processos de transferência de calor, tal como o resfriamento (VENÂNCIO et al., 2006). Essa propriedade é afetada pela temperatura, composição, conteúdo de água, homogeneidade e estrutura física do material, e seu valor determina com que velocidade o calor se propaga, e como ele se difunde através do material (NUNES et al., 2002).

A difusividade térmica está associada à difusão de calor dentro do produto durante as mudanças da temperatura com o tempo, portanto, um elevado valor da difusividade térmica significa uma rápida transferência do calor dentro do produto e pouco tempo para a temperatura interna do corpo reduzir (DÚSSAN SARRIA, 2003).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O método adotado para a realização do Trabalho de Conclusão de Curso foi o estudo de caso, onde o processo de resfriamento de presunto foi estudado e analisado em seu contexto real, buscando entender e identificar as condições de operação do atual sistema de refrigeração e o consumo energético do sistema.

A partir do método adotado foram realizados levantamentos de dados, buscando informações sobre o processo de refrigeração da linha de produção de presunto, de uma Unidade Industrial da Região Oeste do Paraná.

Foram analisadas e descritas as características do sistema de refrigeração da atual linha de produção de presunto, que baseia-se no ciclo de refrigeração por compressão de vapor, onde foram calculados e analisados os parâmetros térmicos do ciclo de refrigeração da atual produção, e posteriormente sugeridos os cálculos para futura ampliação da linha de produção.

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Inicialmente a coleta de dados ocorreu em uma visita à indústria, onde foi conhecido o processo de fabricação de presunto, e, após, foram realizados levantamentos de dados da etapa de cozimento e refrigeração.

Os dados coletados no processo foram: dimensões dos tanques de cozimento e resfriamento, massa e dimensão da estrutura metálica onde as peças de presunto são acondicionadas, massa e dimensão das formas de presunto, massa do presunto, material isolante dos tanques de cozimento e resfriamento com suas devidas espessuras, temperaturas externas e internas dos tanques de cozimento e resfriamento, temperaturas internas do produto nas etapas de cozimento e resfriamento e tempos de cozimento e resfriamento. A seguir são apresentados os dados através de ilustrações e tabela.



Figura 3. Estrutura metálica onde as peças de presunto são acondicionadas. Fonte: CREMINOX.

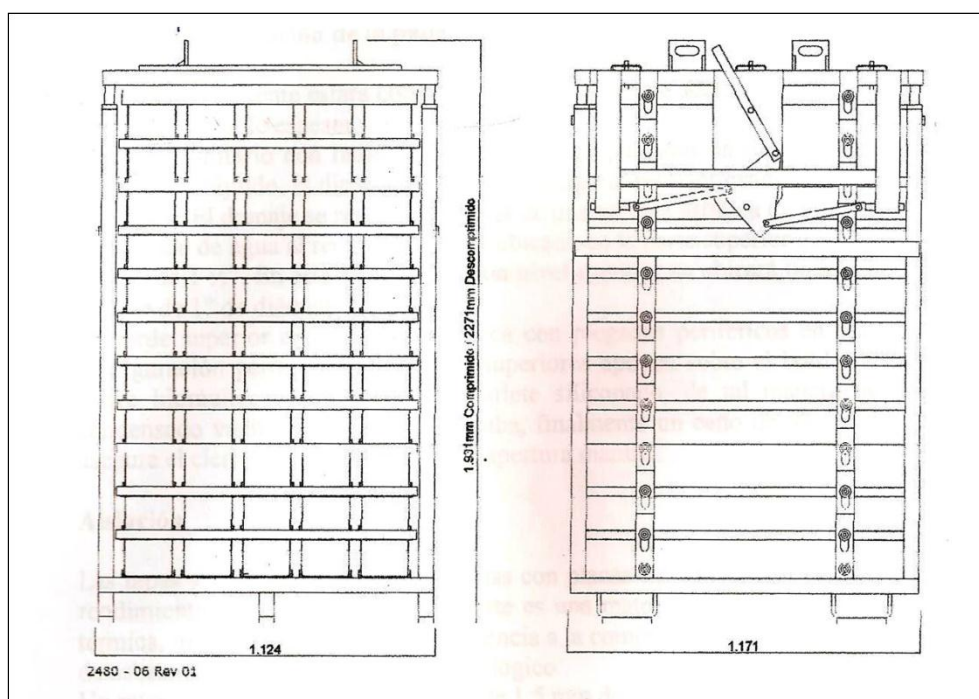


Figura 4. Dimensões da estrutura metálica. Fonte: CREMINOX.



Figura 5. Tanques de cozimento. Fonte: CREMINOX.



Figura 6. Tanques de resfriamento. Fonte: CREMINOX.

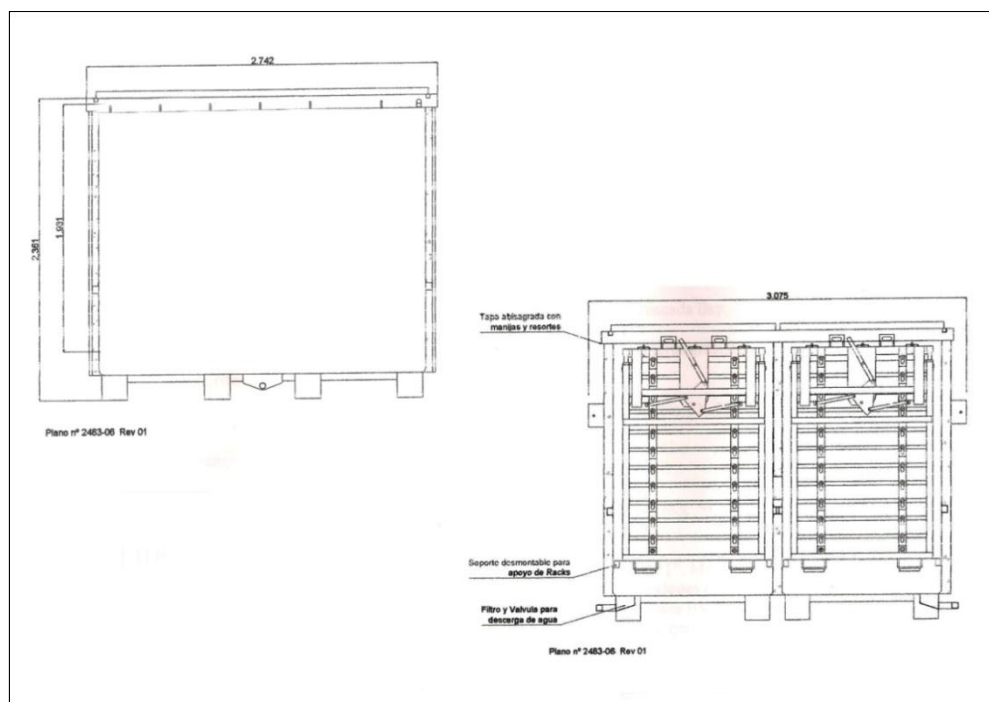


Figura 7. Dimensões dos tanques de resfriamento e cozimento. Fonte: CREMINOX.



Figura 8. Formas de produção de presuntos. Fonte: CREMINOX.

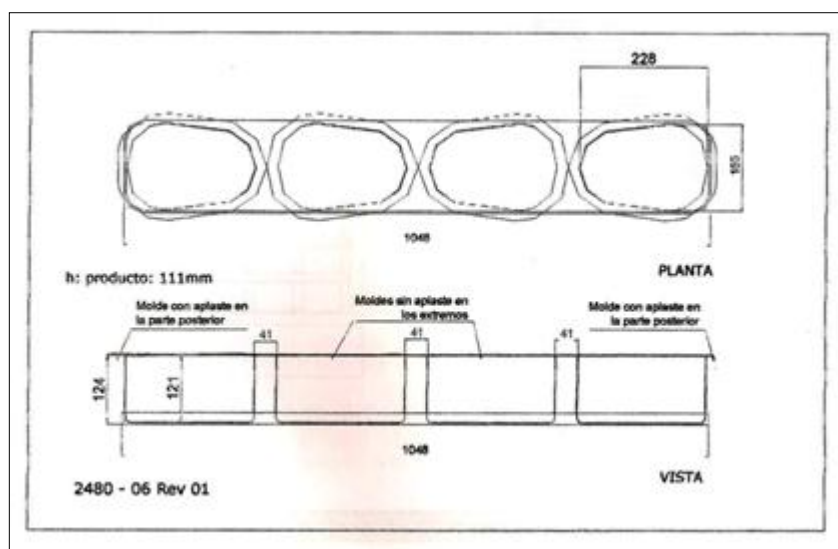


Figura 9. Dimensões das formas de presunto. Fonte: CREMINOX.

Tabela 3. Dados e condições de operação do processo de resfriamento e cozimento de presunto

Massa da estrutura metálica que acondiciona as formas (kg)	1065
Massa de presunto por forma (kg)	3,4
Massa total de presunto por estrutura (kg)	748
Quantidade de formas na estrutura metálica (unidade)	220
Material isolante do tanque de cozimento	Lã de vidro
Espessura do material isolante do tanque de cozimento (m)	0,05
Material isolante do tanque de resfriamento	Poliuretano
Espessura do material isolante do tanque de resfriamento (m)	0,05
Temperatura da parede externa do tanque de cozimento (°C)	32
Temperatura da parede externa do tanque de resfriamento (°C)	25
Temperatura de entrada do produto no tanque de cozimento (°C)	11
Temperatura de entrada do produto no tanque de resfriamento (°C)	70
Temperatura de saída do produto no tanque de cozimento (°C)	70
Temperatura de saída do produto no tanque de resfriamento (°C)	8
Tempo de cozimento (horas)	5
Tempo de resfriamento (horas)	7
Área do tanque de cozimento (m ²)	42,24
Área do tanque de resfriamento (m ²)	34,37

4.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

As propriedades termofísicas do ar, dos isolantes térmicos, lã de vidro e poliuretano, e do aço inoxidável, foram retiradas da literatura segundo Incropera et al. (2011), sendo os valores calculados com base em uma temperatura média do processo e apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6.

Tabela 4. Propriedades termofísicas do ar

T (°C)	Ar			
	K (W/m.°C)	γ (m ² /s)	P_r	P_{rs}
30	$26,522 \times 10^{-3}$	$16,1636 \times 10^{-6}$	0,70658	0,700098

Fonte: Incropera et al., 2011.

Tabela 5. Propriedades termofísicas dos isolantes térmicos

Material	K (W/m.°C)
Lã de vidro	0,038
Poliuretano	0,023

Fonte: Incropera et al., 2011.

Tabela 6. Propriedades termofísicas do inox

Material	c_p (kJ/kg°C)
Aços inoxidáveis AISI 304	0,477

Fonte: Incropera et al., 2011.

O valor da difusividade térmica (α) do presunto utilizado no presente estudo baseou-se em trabalho realizado por Oliveira (2003), no qual foi determinada a difusividade térmica do presunto cozido e seus constituintes sólidos principais em função do nível de umidade do presunto cozido. O valor da difusividade térmica correspondente a 72 % de umidade do presunto foi de $1,458 \times 10^{-7}$ m²/s, valor adotado para o desenvolvimento dos cálculos deste trabalho.

Para a determinação do calor específico (c_p) do presunto foram realizadas análises de calorimetria exploratória diferencial (DSC), utilizando o equipamento DSC PerkinElmer (Frontier) no Laboratório de Química da UTFPR, previamente calibrado com metal índio (f.c. = 0,6957), usando disco de teflon e sistema de resfriamento com nitrogênio líquido até -50 °C.

Os parâmetros utilizados nas análises foram: 3,6 a 5,6 mg de amostra de presunto liofilizado em cadinho de alumínio com tampa, fechados hermeticamente; taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹ entre 40 e 70 °C. Os ensaios foram conduzidos em triplicata.

Se a temperatura na amostra aumenta a uma taxa constante de aquecimento $\left(\frac{dT}{dt}\right)$ e a taxa de calor $\left(\frac{dQ}{dt}\right)$ na amostra, de massa conhecida, pode ser

medida, de modo que o calor específico é determinado pela equação (1) (RAHMAN, 1995).

$$c_p = \frac{\frac{dQ}{dt}}{m_{amostra} \times \frac{dT}{dt}} \quad (1)$$

4.3 DETERMINAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para os cálculos de energia térmica dos processos de resfriamento e cozimento foi utilizada a equação (2), que representa a energia térmica para sistemas com escoamento em regime estacionário (INCROPERA et al, 2011).

$$Q = mc_p \Delta T \quad (2)$$

Em que: m é a massa do produto, c_p é o calor específico e ΔT é a variação de temperatura, na entrada e na saída.

Os mecanismos de transferência de calor envolvidos no processo de resfriamento ocorrem por condução e convecção.

A lei do resfriamento de Newton, representada pela equação (3), corresponde à definição da taxa de transferência de calor por convecção, quando o mecanismo corresponde à difusão molecular associado ao movimento do fluido (INCROPERA et al., 2011).

$$q_{conv} = Ah(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

A lei de Newton aplica-se à uma interface sólido – fluido. Na interface, uma análise do processo de transferência de calor envolvido mostra que o coeficiente individual local de transferência de calor pode ser calculado conhecendo-se as propriedades físicas do fluido, a temperatura de aproximação do fluido, T_∞ , a temperatura da superfície do sólido, T_s , e o gradiente de temperatura do fluido na interface.

Durante o resfriamento de alimentos, ocorre a retirada de calor do interior desses produtos por condução até a superfície. Assim, o calor da superfície do

produto é removido para o meio de resfriamento através do processo de convecção. Por este motivo é necessário estudar também a transferência de calor por condução que ocorre no interior dos alimentos (SILVA, 2007).

O gradiente de temperatura em um meio provoca a transferência de calor por condução, das moléculas de maior energia para as de menor energia. Para o processo condutivo, a equação da taxa de transferência de calor é conhecida pela Lei de Fourier, apresentada pela equação (4) (INCROPERA et al., 2011).

$$q_{cond} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

A Lei de Fourier implica que a taxa de transferência de calor (q_x) é uma grandeza direcional. Em particular, a direção de q_x é normal a área da seção transversal. O $\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)$ é o gradiente de temperatura na direção normal à superfície do meio que apresenta a temperatura constante e K é uma constante de proporcionalidade conhecida como condutividade térmica.

4.3.1 Parâmetros adimensionais

Os parâmetros adimensionais desempenham um papel fundamental nos problemas de transferências de calor, sendo de extrema importância calculá-los para o desenvolvimento dos cálculos de transferência de calor. Os principais parâmetros que foram definidos para o estudo são: número de Biot, número de Fourier, número de Reynolds e número de Nusselt.

O número de Biot fornece uma medida da queda de temperatura no sólido em relação à diferença de temperaturas entre a superfície e o fluido, sendo representada pela equação (5) (INCROPERA et al., 2011).

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (5)$$

O número de Fourier é um tempo adimensional que, como o número de Biot, caracteriza problemas de condução transiente, sendo expresso pela equação (6) (INCROPERA et al., 2011).

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_c^2} \quad (6)$$

O número de Reynolds é um agrupamento adimensional de parâmetros que representa a razão entre as forças de inércia e as viscosas (INCROPERA et al., 2011). O número de Reynolds é expresso pela equação (7).

$$Re = \frac{v \cdot L}{\gamma} \quad (7)$$

O número de Nusselt fornece uma medida da transferência de calor por convecção que ocorre na superfície. A partir do conhecimento de Nu , o coeficiente convectivo h pode ser determinado pela equação (8) (INCROPERA et al., 2011).

$$Nu = \frac{hL}{k} = f(Re, Pr) \quad (8)$$

4.3.2 Solução analítica para condução em regime transiente

O resfriamento de presunto ocorre em regime transiente, pois as condições do sistema variam ao longo do tempo e do espaço. As condições de operação do processo levaram a realização de os cálculos adotando uma condição para a transferência de calor com base em uma matriz tubular em escoamento externo.

O arranjo geométrico é mostrado esquematicamente na Figura 10, onde um fluido se move sobre os tubos, enquanto um segundo fluido, a uma temperatura diferente, escoar no interior dos tubos. Esse arranjo foi adotado por representar de certa forma a condição de resfriamento, já que a estrutura metálica a qual os presuntos são acondicionados apresenta espaçamentos entre uma forma e outra de presunto, havendo assim um escoamento externo entre as peças de presunto. Além disso, as condições do fluido foram diferentes externa e internamente, como proposto pelo arranjo geométrico escolhido. Para melhorar a aproximação do arranjo utilizou-se para os cálculos o diâmetro hidráulico, equação (9), das peças de presunto.

$$D_h = \frac{4 \times A}{P} \quad (9)$$

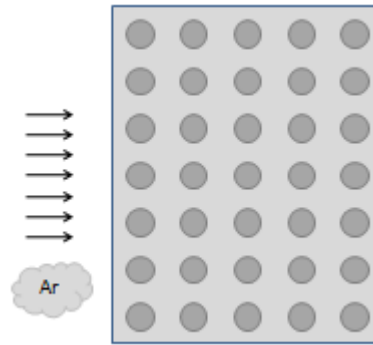


Figura 10. Esboço de uma matriz tubular com escoamento externo. Fonte: Incropera et al., 2011, adaptado.

Os tubos estava, arranjados de forma alinhada, com isso as correlações adotadas para a determinação do coeficiente de transferência de calor são apresentadas pelas equações a seguir.

$$Nu = C_2 C Re^m Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

$$Re = \frac{v_{m\acute{a}x} D_h}{\gamma} \quad (11)$$

$$v_1 A_{ET} = v_{m\acute{a}x} A_E \quad (12)$$

$$h = Nu \frac{k}{D_h} \quad (13)$$

Todas as propriedades que aparecem nas equações anteriores são avaliadas na temperatura do fluido que se move sobre os tubos. As constantes que aparecem nas equações foram obtidas na literatura (INCROPERA et al., 2011) e são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Constantes da equação 9 para a matriz tubular em escoamento alinhado.

Arranjo	C	m	C ₂
Alinhado	0,021	0,84	0,92

Fonte: Incropera et al., 2011.

Para a determinação do tempo de processo do resfriamento em uma determinada temperatura, o método selecionado para o estudo foi uma solução analítica exata na forma de uma série infinita (INCROPERA et al., 2011), apresentada pela equação (14).

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\xi_n^2 Fo) \cos(\xi_n x) \quad (14)$$

Onde θ^* e C_n são:

$$\theta^* = \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \quad (15)$$

$$C_n = \frac{4 \sin \xi_n}{2\xi_n + \sin(2\xi_n)} \quad (16)$$

Os valores discretos (autovalores) de ξ_n são raízes positivas da equação transcendental:

$$\xi_n \tan \xi_n = Bi \quad (17)$$

Para o desenvolvimento dos cálculos foi utilizado o Scilab, que é um software científico para computação numérica, de maneira a verificar os tempos do processo de resfriamento, variando os valores do coeficiente de transferência de calor.

4.4 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO ANALÍTICA

A validação dos tempos do processo de resfriamento ocorreu comparando os valores obtidos através dos resultados numéricos e os resultados experimentais. Essa comparação é comumente realizada para que se possa validar a simulação analítica utilizada.

Os resultados numéricos foram obtidos utilizando as correlações de transferência de calor para regime transiente (equações do item 4.3.1) e os resultados experimentais foram obtidos simulando a condição real do processo, nas condições estudadas.

A simulação do processo foi realizada no Laboratório de Fenômenos de Transporte e Operações Unitárias da UTFPR e é descrita a seguir.

Inicialmente ocorreu o aquecimento do presunto em um banho termostático, até que a peça de presunto alcança-se 70 °C internamente, simulando assim o processo de cozimento. Após a peça de presunto ter atingido a temperatura estipulada, a mesma foi direcionada para um túnel de convecção forçada com ar a uma velocidade de 4,2 m/s. Essa etapa simulou o processo de pré-resfriamento, sendo finalizada quando a peça de presunto atingiu internamente 36 °C. Finalizada essa etapa a peça de presunto voltou para o banho termostático onde ocorreu a etapa final do processo de resfriamento por imersão, tendo como temperatura interna da peça de presunto 8 °C.

Durante o processo de pré-resfriamento e resfriamento foram coletadas temperaturas internas do produto a cada minuto, para posterior avaliação do tempo estimado em cada etapa simulada. A Figura 11 ilustra o processo de simulação das etapas de cozimento, pré-resfriamento e resfriamento.



Figura 11. Metodologia adotada para validação do experimento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DETERMINAÇÃO DO CALOR ESPECÍFICO

Os calores específicos das amostras de presunto liofilizado foram determinados com base nas curvas de DSC, apresentadas na Figura 12.

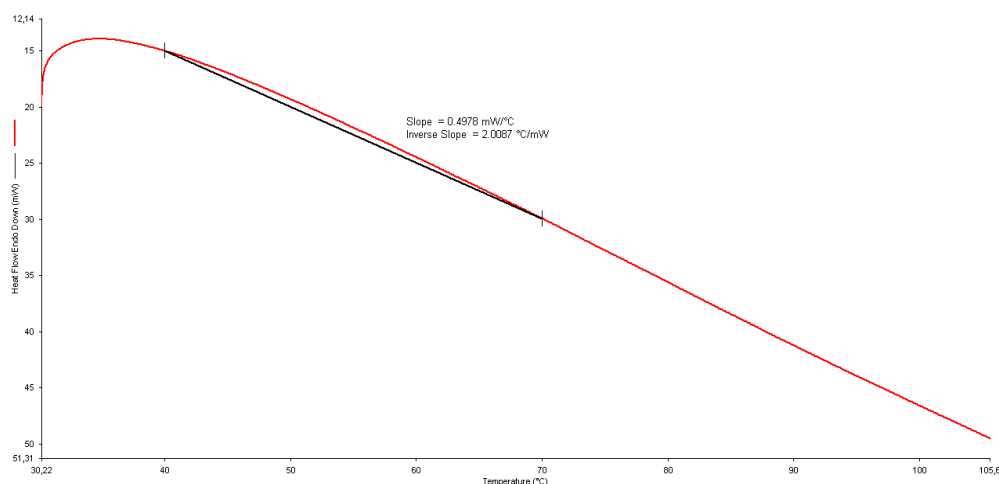


Figura 12. Taxa de aquecimento e fluxo de calor na amostra de presunto liofilizada, pelo método do DSC.

O valor obtido para o calor específico da amostra de presunto liofilizado foi de 3,9 (kJ/kg°C), para um nível de umidade de 75 %. Este valor foi adotado para a realização dos cálculos do trabalho.

Marcotte et al. (2008) encontrou valores de c_p de presunto, com 72,7 % de umidade, para diferentes temperaturas. Para a temperatura de 40 °C os autores encontraram c_p de 3,1(kJ/kg°C), e para 70 °C, c_p de 3,3 (kJ/kg°C). Comparando os valores obtidos por Marcotte et al. e o obtido experimentalmente no presente trabalho verificou-se pequena variação, que pode estar relacionada com o conteúdo de água do presunto, já que o c_p é diretamente proporcional ao conteúdo de água.

5.2 CONDIÇÃO ATUAL DO PROCESSO DE COZIMENTO E RESFRIAMENTO

A atual instalação de cozimento e resfriamento de presunto conta com uma estrutura com 8 tanques de cozimento e 12 tanques de resfriamento. O material dos

tanques é aço inoxidável AISI 304, sendo o tanque de cozimento isolado termicamente com lã de vidro e o tanque de resfriamento com poliuretano.

Tanto para o processo de cozimento quanto para o processo de resfriamento, os presuntos são acondicionados em uma estrutura metálica, onde ficam comprimidos, para garantir a moldagem do produto. Cada estrutura metálica possui 220 peças de presunto, e estas são alocadas nos tanques ficando imersas em água, sendo a água o meio de transferência de calor para o produto.

O processo de cozimento tem a finalidade de cozinhar o presunto, até que a temperatura interna do produto atinja 70 °C. O tanque é totalmente fechado, o tempo necessário é de 5 horas e o aquecimento da água é realizado por contato direto com vapor. Após a etapa de cozimento, a estrutura metálica a qual os presuntos estão acondicionados é retirada do tanque e direcionada para o tanque de resfriamento.

O processo de resfriamento consiste em resfriar o presunto da temperatura de 70 °C para 8 °C, o tempo necessário para que o produto atinja a temperatura desejada é de 7 horas. O tanque possui como princípio de funcionamento um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor, com um coeficiente de performance de 6,2.

Após a etapa de resfriamento o produto é desenformado, acondicionado em caixas e armazenado para posterior comercialização.

Nas condições atuais as etapas de cozimento e resfriamento ocorrem em um intervalo de tempo de 12 horas para cada batelada, e a produção diária é de 30 toneladas. Nas ilustrações a seguir é apresentado o atual processo.

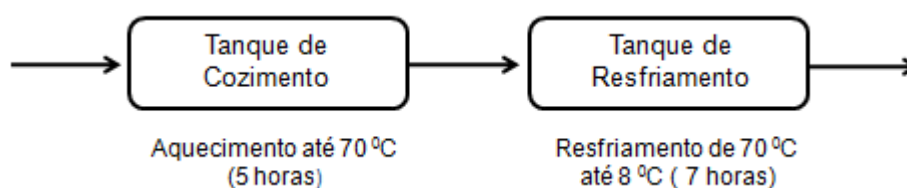


Figura 13. Fluxograma das etapas de cozimento e resfriamento.

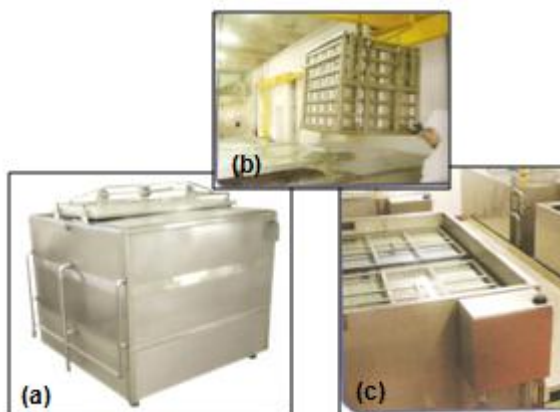


Figura 14. Processo de cozimento (a), (b) estrutura metálica onde os presuntos são acondicionados e processo de resfriamento (c).

5.2.1 Calor envolvido nos processos de cozimento e resfriamento

Na Tabela 8 são apresentados os gastos energéticos envolvidos no atual sistema de cozimento e resfriamento para uma batelada de presunto.

Tabela 8. Gastos de energia envolvidos no processo de cozimento e resfriamento

Consumo de Refrigeração		Consumo de Vapor	
Q resf.	212.363 kJ	Q aquec.	202.087 kJ
Q perdido cond.	6.773 kJ	Q perdido cond.	21.958 kJ
Q perdido conv.	14.566 kJ	Potência	12,4 kW
Potência	9,3 kW		

resf.=resfriamento; cond=condução; conv.=convecção; aquec.=aquecimento

Devido aos gradientes de temperatura envolvidos nos processos de cozimento e resfriamento é necessário fornecer ao sistema energia para que ocorra a transferência de calor desejada. Para o processo de cozimento o calor fornecido é de 202.087 kJ, devendo ser acrescido a esse valor a perda por condução que corresponde a 21.958 kJ. A perda por condução nesse caso, ocorre pela troca térmica entre o tanque e o meio sólido com o qual está em contato. Não ocorrendo perdas por convecção nesse processo, pois os tanques são fechados.

No resfriamento o calor fornecido ao sistema é de 212.363 kJ, devendo ser acrescido a esse valor o calor perdido por condução (6.773 kJ) e o calor perdido por convecção (14.566 kJ). A perda de calor por condução ocorre pela troca térmica ente o tanque e o meio sólido, e a perda de calor por convecção está relacionada

com a troca térmica ocorrida através de um fluido, nesse caso o ar atmosférico, pois o tanque é aberto.

Sendo assim o consumo de energia para produzir vapor no processo de cozimento por batelada, nas atuais condições é de 224.045 kJ, e o consumo de energia de refrigeração no processo de resfriamento é de 233.702 kJ. Como cada batelada possui 748 kg de produto tem-se um consumo de energia para produção de vapor por kg de presunto de 299,5 kJ, e o consumo de energia de refrigeração por kg de presunto é de 322,5 kJ.

5.3 DESCRIÇÃO DA PROPOSTA DE RESFRIAMENTO

Com base no atual sistema foram levantadas informações sobre um novo processo de resfriamento que diminuísse a capacidade de refrigeração (sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor).

A nova etapa de resfriamento proposta consiste em duas etapas, pré-resfriamento e resfriamento. A etapa de pré-resfriamento consiste na refrigeração do produto por convecção forçada, sendo o ar o meio de resfriamento, onde o produto sai do tanque de cozimento a uma temperatura de 70 °C e seria destinado a etapa de pré-resfriamento em uma cabine de exaustão, sendo o ar forçado através do produto de forma a reduzir a temperatura do centro térmico do presunto até um patamar desejado. O resfriamento por convecção atuaria até a temperatura do presunto atingir 34 °C, totalizando 5 horas de processo.

Após o presunto seria destinado para o tanque de resfriamento por imersão em água, onde o sistema é baseado em um ciclo de refrigeração por compressão de vapor, até atingir a temperatura de 8 °C, totalizando nessa etapa mais 5 horas de processo.

A nova proposta consiste na etapa de cozimento, pré-resfriamento e resfriamento, sendo 5 horas cada etapa, totalizando 15 horas de processo por batelada, como apresentado na Figura 15.

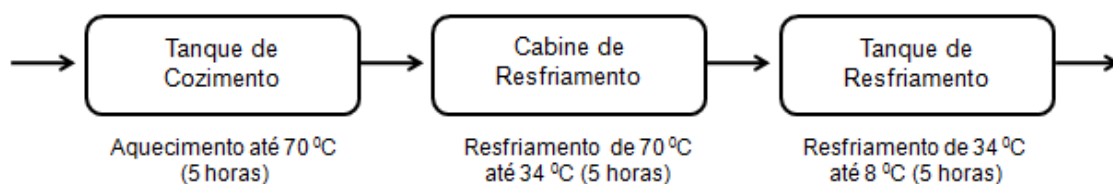


Figura 15. Fluxograma do processo de resfriamento proposto.

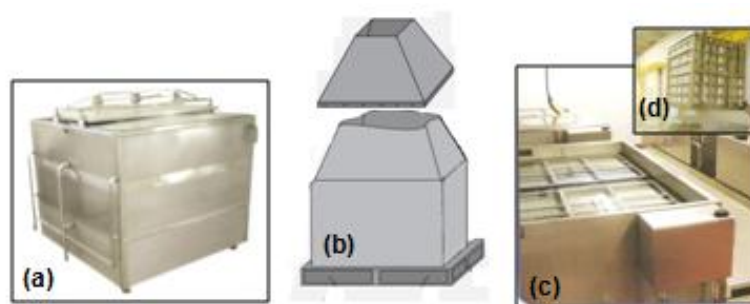


Figura 16. Proposta de resfriamento de presunto. (a) tanque de cozimento, (b) cabine de pré-resfriamento com ar, (c) tanque de resfriamento com água e (d) estrutura que acondiciona os presuntos.

A seguir serão apresentados os cálculos que levaram à escolha do tempo e das temperaturas adotadas para a proposta de resfriamento.

5.3.1 Determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor

Inicialmente, para a determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor estipulou-se uma determinada condição inicial para a obtenção do $h_{máx}$, para, posteriormente, através de um método iterativo, determinar qual o melhor coeficiente para o processo proposto.

Para a obtenção do $h_{máx}$ utilizou-se a condição descrita na Figura 17, onde foi estipulada uma velocidade do ar de 10 m/s e, posteriormente, após a definição do novo coeficiente, recalculou-se a velocidade correspondente.

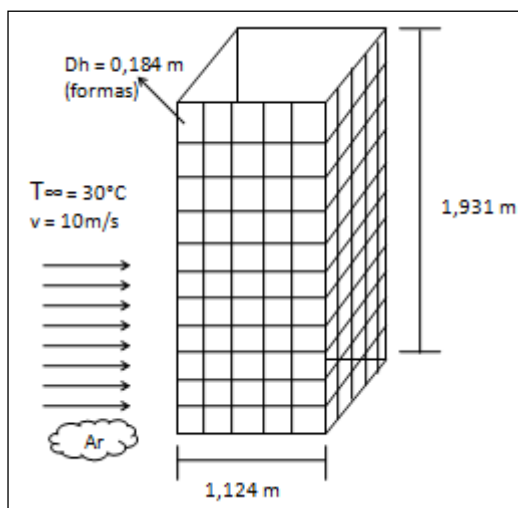


Figura 17. Condição proposta inicialmente para determinação do $h_{m\acute{a}x}$.

Com a condição inicial determinada e com o emprego das equações (9), (10), (11) e (12) calculou-se o valor do coeficiente convectivo máximo de 260 W/m²C.

Conhecendo o valor máximo do coeficiente convectivo foram estipulados novos coeficientes convectivos, para serem utilizados no método iterativo e, posteriormente, avaliar qual se enquadrou melhor no processo proposto. Os valores estudados para o novo coeficiente foram: 50, 70, 90, 100, 130, 160 e 200 W/m²C.

A Tabela 9, apresenta o comportamento da temperatura no centro térmico do produto calculada com os novos valores do coeficiente convectivo.

Tabela 9. Comportamento da temperatura (C) no decorrer do processo modificando o coeficiente de transferência de calor

Tempo (h)	Valores dos Coeficientes Convectivos de Transferência de Calor (W/m ² C)							
	260	200	160	130	100	90	70	50
0	70	70	70	70	70	70	70	70
1	63,1	63,3	63,6	63,9	64,3	64,5	64,9	65,7
2	49,1	49,6	50,1	50,6	51,4	51,8	52,8	54,4
3	40,1	40,5	40,9	41,4	42,2	42,5	43,5	45,2
4	35,2	35,9	35,8	36,2	36,7	37	37,8	39,2
4,75	33,1	33,4	33,6	33,8	34,6	34,5	35,1	36,2
5	32,6	32,8	33,1	33,3	33,7	33,86	34,4	35,5

Na tabela (9), verificou-se que  possível obter diferentes valores de h no processo de resfriamento das peças de presunto com ar forçado, isso ocorre porque

o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção não depende apenas de um fator, mas de um conjunto de fatores associados.

Avaliando o comportamento da temperatura no decorrer do tempo de processo com a variação do coeficiente convectivo, verificou-se que nas três primeiras horas do processo a queda da temperatura apresenta valores relativamente altos, quando comparados com a queda da temperatura nas horas finais do processo. Esse comportamento está relacionado ao gradiente de temperatura apresentado no decorrer do tempo de processo. No início do processo o gradiente de temperatura é maior que do final do processo, uma vez que no final do processo, ocorre a aproximação da temperatura do produto com a temperatura do ar de resfriamento (30 °C). Dússan-Sarria (2003) destaca que a quantidade de calor que é retirada do produto é dependente da diferença de temperatura entre o produto e o meio, confirmando assim a diminuição da queda da temperatura nas horas finais do processo.

Analisando a tabela (9) verificou-se para a condição inicial, utilizando $h_{\text{máx}}$ nos cálculos, nas três primeiras horas de processo, o produto resfriou 29,9 °C, enquanto que, nas últimas duas horas, o resfriamento foi de apenas 7,5 °C. Para os coeficientes de 200 e 160 W/m²°C a queda da temperatura nas três primeiras horas foi em média de 29,3 °C e nas últimas duas horas de 7,8 °C. Já para o coeficiente de 130 W/m²°C, a queda nas primeiras horas foi de 28,6 °C e no final do processo de 8,1 °C. Os coeficientes de 100, 90, 70 e 50 W/m²°C, apresentaram o mesmo comportamento, porém com reduções de temperaturas menores.

Assim, a variação do coeficiente convectivo de 260 W/m²°C, condição inicial, para 130 W/m²°C não resultou em grandes diferenças na queda de temperatura. Portanto, 130 W/m² °C foi o coeficiente adotado para a proposta de pré-resfriamento. A Figura 18, apresenta o comportamento da temperatura no tempo para os dois coeficientes convectivos.

A escolha do coeficiente de 130 W/m²°C levou em consideração o comportamento da redução da temperatura, que foi muito semelhante à verificada com o coeficiente de 260 W/m²°C. Logo, não é viável adotar maior coeficiente, pois a velocidade do ar para alcançar esse coeficiente é maior que a velocidade para o coeficiente selecionado. Ainda, deve-se considerar que quanto maior a velocidade do ar, maiores as perdas de carga no processo, sendo, assim, mais vantajoso e econômico a escolha pelo coeficiente de 130 W/m²°C.

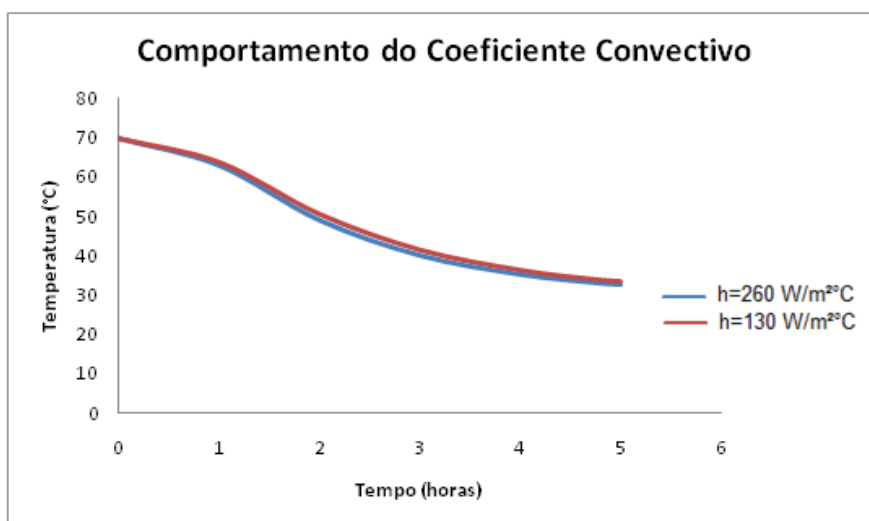


Figura 18. Curvas numéricas da variação de temperatura interna do presunto, ao longo do tempo de pré-resfriamento, com a variação do coeficiente convectivo.

5.3.2 Determinação do tempo de pré-resfriamento

O tempo de resfriamento assim como o coeficiente convectivo de transferência de calor, foi determinado por método iterativo, variando-se o coeficiente convectivo de transferência de calor e avaliando o comportamento da temperatura interna do produto com o passar do tempo.

Considerou-se que no tempo 0 (zero) a temperatura do produto encontrava-se em 70 °C, e estudou-se a redução da temperatura até o tempo de 5 (cinco) horas de resfriamento. Este tempo foi adotado após análise de resultados com maior tempo de pré-resfriamento com ar forçado, tendo sido verificado que maiores tempos não resultavam em mudanças da temperatura, devido à aproximação da temperatura do produto com a temperatura do fluido de resfriamento. Assim, verificou-se não ser mais vantajoso para o processo, tempos maiores que 5 horas, pois a redução da temperatura após esse período é muito lenta.

Os resultados da simulação da temperatura do produto após 5 horas de processo estão descritos na Tabela 10. Verificou-se que a variação da temperatura para os coeficientes de 260, 200, 160 e 130 W/m²°C apresentaram um desvio de 0,31 °C, sendo possível, portanto, selecionar qualquer um desses coeficientes para os cálculos, já que a temperatura final do processo foi muito próxima.

Tabela 10. Simulação da redução de temperatura interna do produto após cinco horas de resfriamento.

	Valores dos Coeficientes Convectivos de Transferência de Calor (W/m ² °C)							
	260	200	160	130	100	90	70	50
°C reduzidos do produto após 5 horas	37,4	37,2	36,9	36,7	36,3	36,1	35,6	34,5

Ao avaliar os tempos na Tabela (9), verificou-se que a maior redução de temperatura ocorreu nas três primeiras horas, como comentado anteriormente, e que o tempo de resfriamento em sistema de ar forçado é determinado pela diferença entre a temperatura do fluido (ar) e a temperatura do produto.

O processo de pré-resfriamento após 5 horas reduz em média 52% da temperatura do presunto, sendo 40% dessa redução de temperatura após 3 horas do processo.

5.3.3 Determinação da velocidade do ar

A velocidade do ar juntamente com a perda de carga por atrito foi calculada em função dos coeficientes convectivos de 260, 200, 160 e 130 W/m²°C. A condição adotada para a realização dos cálculos está apresentada na Figura 19, em que no ponto 2 o ar encontra-se parado, $v_2 = 0$, e no ponto 1 a velocidade foi calculada em função do h .

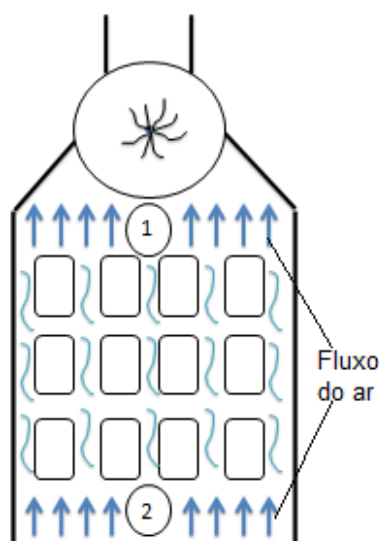


Figura 19. Configuração da velocidade do ar na cabine de exaustão

Os resultados da velocidade de entrada do ar, v_1 , e da perda de carga por atrito entre as extremidades, ponto 1 e 2, são apresentadas na Tabela 11. Para os cálculos de perda de carga utilizou-se o diagrama de Moody, em função do número de Reynolds e considerando o material de construção de superfície lisa, obtendo, assim, o valor do coeficiente de atrito (f). Após calculou-se a perda de carga por atrito segundo a equação (17).

$$h_f = f \left(\frac{L}{D_h} \right) \frac{v^2}{2g} \quad (17)$$

Tabela 11. Resultados da velocidade do ar e da perda de carga ao modificar o valor do coeficiente convectivo

h (W/m ² °C)	v (m/s)	Re	Perda de carga (m)
260	10	$9,56 \times 10^5$	11,31
200	7	$6,99 \times 10^5$	6,46
160	5,4	$5,36 \times 10^5$	3,92
130	4,2	$4,19 \times 10^5$	2,46

Como pode ser verificado na Tabela 11, a perda de carga aumentou com o aumento da velocidade e do valor de Reynolds. Segundo Rouse e Ince (2006), a perda de carga é uma restrição à passagem do fluxo do fluido. Esta resistência influencia diretamente a vazão volumétrica e a diminuição da eficiência do sistema, aumento a potência consumida.

Assim, constatou-se não ser viável a aplicação de altas velocidades para o escoamento de ar e, conseqüentemente, valores altos de coeficiente de transferência de calor, pois a perda de carga para o coeficiente de 260 W/m²°C foi de 11,31 m, enquanto que para o coeficiente de 130 W/m²°C foi de 2,46 m (Tabela 11).

5.3.4 Descrição do sistema de resfriamento com ar forçado

A proposta de pré-resfriamento do presunto consiste em uma cabine de exaustão, onde a estrutura metálica que acondiciona os produtos é colocada dentro da cabine para o seu resfriamento. O escoamento do ar ocorre em regime turbulento, a transferência de calor em regime transiente e a passagem do ar pela estrutura onde os presuntos são acondicionados é representada pela Figura 20.

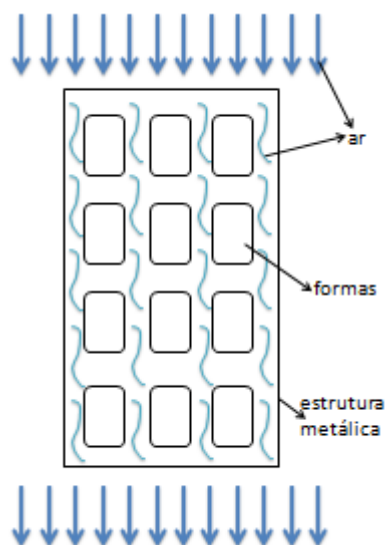


Figura 20. Representação da passagem do ar pela estrutura metálica, dentro da cabine de exaustão

As características da cabine de exaustão proposta para a realização do pré-resfriamento de presunto são apresentadas a seguir:

- Temperatura do fluido (ar): 30 °C;
- Temperatura inicial do produto: 70 °C;
- Temperatura final do produto: 34 °C;
- Tempo estimado para o processo: 5 horas;
- Velocidade do ar: 4,2 m/s;
- Coeficiente convectivo: 130 W/m²°C;
- Perda de carga do sistema: 2,46 m;
- Potência do exaustor: 340 W;
- Vazão mássica do ar: 10,6 kg/s.

5.4 VALIDAÇÃO DO PROCESSO PROPOSTO

Para a comparação dos dados obtidos pelo modelo e os dados obtidos experimentalmente, validou-se o método proposto de pré-resfriamento com ar forçado. A validação foi realizada com uma estrutura metálica de presunto (forma), de dimensões 0,15 x 0,09 x 0,08 m, a temperatura inicial do presunto foi de 68 °C, e o sistema operou com velocidade do ar de 4,2 m/s e coeficiente convectivo de 91,23 W/m²°C.

Os valores obtidos são apresentados na Tabela 12, juntamente com o erro oriundo das diferenças de temperatura que foi calculado utilizando as equações (18) e (19).

$$\text{Erro de ajuste} = \text{Valor Experimental} - \text{Valor Simulado} \quad (18)$$

$$\text{Erro Relativo} = \frac{\text{Valor Experimental} - \text{Valor Simulado}}{\text{Valor Experimental}} \times 100 \quad (19)$$

Tabela 12. Comparativo dos valores de temperatura obtidos no processo de pré-resfriamento pelo modelo e experimentalmente

Tempo (h)	Temperatura (°C) Simulada	Temperatura (°C) Experimental	Erro de Ajuste	Erro Relativo (%)
0	68	68	0,000	0,000
0,5	63,2	64,44	1,240	1,924
1	52,35	53,3	0,950	1,782
1,5	45,01	44,63	-0,380	-0,851
1,8	42,21	40,94	-1,270	-3,102
2	40,84	39	-1,840	-4,718
2,1	40,27	38,19	-2,080	-5,446
2,2	39,76	37,44	-2,320	-6,197
2,3	39,32	36,75	-2,570	-6,993
2,333	39,18	36,25	-2,930	-8,083

Os valores de temperatura obtidos pelo modelo e experimentalmente apresentaram erro de ajuste menor nas primeiras duas horas do processo de pré-resfriamento, aumentando com o passar do tempo do processo. Os valores do erro relativo apresentados são menores que 10 %, mostrando que o modelo adotado para a simulação do processo de pré-resfriamento se ajusta a situação real proposta (Tabela 12). O valor negativo do erro indica que o valor calculado tem um valor menor do que o valor de controle, e o valor positivo indica que o valor calculado possui um valor acima do valor de controle.

Verificou-se que o tempo total do pré-resfriamento para redução de 28,82 °C foi de 2,333 horas (140 s), ocorrendo na primeira hora do processo a redução de aproximadamente 23 °C e nas últimas horas o resfriamento foi mais lento, devido à aproximação da temperatura do produto à temperatura do ar.

Assim é possível concluir que os cálculos apresentados para a simulação do processo de pré-resfriamento são válidos e podem ser aplicados para o processo de pré-resfriamento de presunto.

Também foi realizada a validação para todo o processo de resfriamento de presunto, etapa de pré-resfriamento com ar forçado e, após, etapa de resfriamento com imersão em água. Na Figura (21) pode ser analisado o comportamento da temperatura interna do produto no processo.

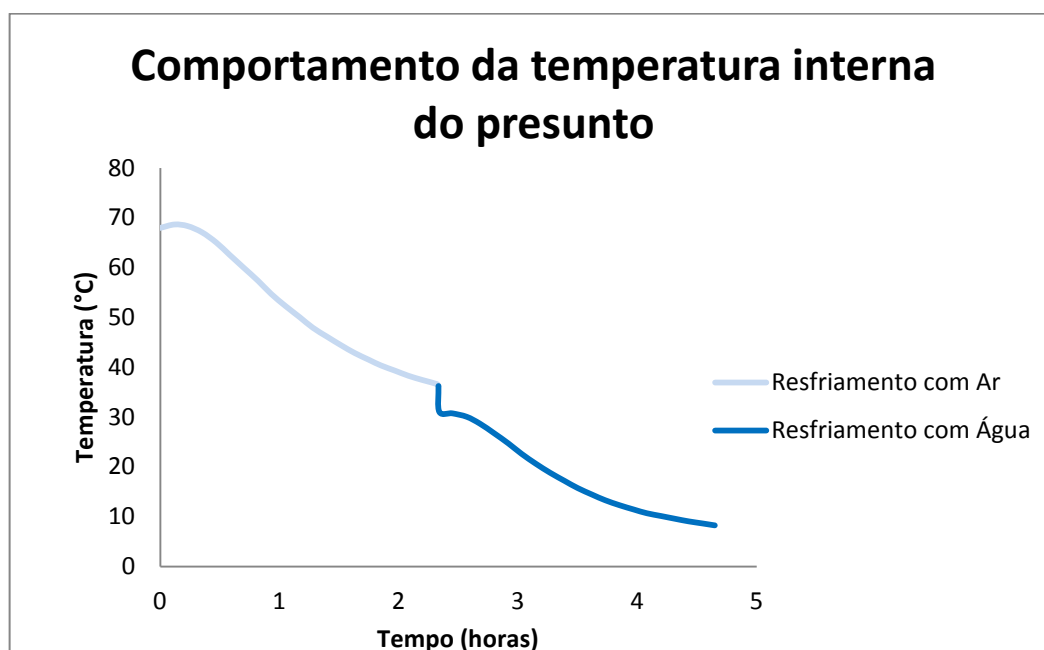


Figura 21. Comportamento da temperatura interna do presunto nas etapas de pré-resfriamento (ar) e resfriamento com imersão (água).

Na Figura 21, verificou-se o comportamento do resfriamento de presunto, onde inicialmente o produto encontrava-se à temperatura de 68 °C e foi resfriado com ar forçado até a temperatura de 36,25 °C em um período de tempo de 2,333 horas (140 s). Após o produto foi resfriado por imersão em água de 36,25 °C até a temperatura de 8,25 °C em um período de tempo de 2,317 horas (139 s). O tempo total de resfriamento do produto foi de 4,65 horas (279 s).

Analisando o processo de resfriamento constatou-se que a redução da temperatura interna do produto foi de 59,75 °C, sendo 53,14 % da temperatura reduzida através do processo de pré-resfriamento com ar forçado, e os outros 46,86 % reduzida no processo de resfriamento com imersão em água. Dessa forma, mais da metade da redução de temperatura do produto ocorreu através de um sistema de

resfriamento que não utiliza um ciclo de refrigeração por compressão, ou seja, não necessita de equipamentos que forneçam energia para a redução da temperatura.

5.5 COMPARATIVO ENTRE OS DOIS PROCESSOS

Ambos os processos resfriam o produto da temperatura inicial de 70 °C até a temperatura final de 8 °C. O processo atual resfria o produto utilizando tanques de imersão em água, no qual o princípio de funcionamento utiliza um ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor, operando durante 7 horas para cada batelada. Já o processo proposto consiste em duas etapas para resfriar o produto: uma etapa de pré-resfriamento que consiste em um sistema de resfriamento por convecção forçada com ar à 30 °C, operando por 5 horas, e outra etapa, que é o resfriamento com imersão em água, operando por mais 5 horas, como o ciclo de operação do atual processo, totalizando 10 horas de resfriamento por batelada. A proposta estaria acrescentando mais uma etapa ao processo atual, que seria a etapa do pré-resfriamento.

Ao dobrar a produção, nas condições atuais, seria necessário dobrar a quantidade de tanques de cozimento e resfriamento. Mas, na condição proposta não seria necessário dobrar a compra dos tanques, mas sim implementar ao sistema atual cabines de pré-resfriamento.

Na Tabela 13, são apresentados os gastos energéticos comparando a configuração do processo atual e a configuração do processo proposto, com relação a produção de 30 ton/dia, produção atual, e com o dobro da produção, 60 ton/dia.

Tabela 13. Gastos de energia para produção de 30 e 60 ton/dia de presunto

Produção de Presunto (ton/dia)	Configuração atual		Configuração proposta	
	Vapor (kg _{vapor} /h)	Frio (kW)	Vapor (kg _{vapor} /h)	Frio (kW)
30	184	112	184	46,93
60	368	224	368	93,86

Mantendo a configuração atual, verificou-se que o consumo de vapor para o processo de cozimento, e que o consumo de frio para o processo de resfriamento dobram ao ampliar a produção de presunto de 30 para 60 ton/dia (Tabela 13).

Para o processo proposto, na capacidade de produção de 60 ton/dia, durante o cozimento, o mesmo gasto energético ($368 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{h}$) foi verificado, mas o gasto de energia para o processo de resfriamento foi reduzido para 93,86 kW, pois o consumo do frio seria reduzido em 58,1%, já que o processo de pré-resfriamento diminuiu esses gastos nessa etapa (Tabela 13.)

Constatou-se, assim, que o processo proposto é uma medida que pode ser aplicada na indústria, pois o estudo comprovou a viabilidade do método e a redução dos gastos com calor no ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor.

Outro ponto positivo do processo proposto é que o mesmo auxiliaria na renovação de ar no ambiente de produção, pois a exaustão do ar de resfriamento para fora do ambiente de produção faria a renovação, garantindo o conforto térmico do trabalhador.

5.5.1 Gastos de energia elétrica no processo de resfriamento

Realizou-se um comparativo entre o sistema atual e o proposto com relação ao gasto de energia elétrica no processo de resfriamento.

A análise de desempenho de ciclos de refrigeração é avaliada em termos do coeficiente de desempenho, que é definido como a relação entre a energia útil (potência de refrigeração) e a energia que se paga para obtenção do efeito desejado, que é o custo.

O coeficiente de performance de 6,2 é para um Chiller Yotk[®] YK, com condensação a 30 °C (um sistema com excelente desempenho), e a potência definida para o exaustor no processo proposto foi de 340 W. Com esses valores e com os gastos de calor em cada processo definidos, calculou-se os gastos de energia elétrica para o processo de resfriamento.

O consumo de energia elétrica para o atual processo de resfriamento foi de 8,61 kWh, para resfriar o produto, desde uma temperatura inicial de 70 °C até 8 °C, em 7 horas. Para o processo proposto o consumo foi de 5,6 kWh (1,7 kWh para a etapa de pré-resfriamento e 3,9 kWh para a etapa de resfriamento), para a mesma redução de temperatura em um tempo de 10 horas.

Esta redução no consumo de energia elétrica, em torno de 65%, provocou um aumento no tempo de resfriamento de 3 horas, que não afetaria a qualidade do

produto, e em termos de consumo de energia, justificaria plenamente o uso desta tecnologia.

Segundo Kader (2002), o consumo de energia elétrica também pode ser sensivelmente diminuído se alguns cuidados e boas práticas forem adotados. Dentre as tecnologias de resfriamento, aquele que usa ar forçado tem mostrado melhor relação custo-benefício, devido ao custo capital e custos variáveis menores.

Os custos de resfriamento também podem ser significativamente maiores quando usadas câmaras/tanques de resfriamento, que utilizam como princípio de funcionamento o ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor como única opção de resfriamento, como mostra o estudo desenvolvido por Teruel et al. (2002), quando resfriaram laranjas “Valência” com ar forçado e em câmara frigorífica, utilizando embalagens plásticas e de papelão. Quando resfriadas com ar forçado, os custos foram de R\$ 0,27 e R\$ 0,41 por caixa de 20 kg, para as embalagens plásticas e de papelão, respectivamente. Já quando resfriadas utilizando a câmara frigorífica, os custos quase dobraram, aumentando para R\$ 0,34 e R\$ 0,65, para os dois mesmos tipos de embalagens.

O método proposto, pré-resfriamento combinado com resfriamento em imersão com água, foi eficiente em reduzir a temperatura do produto, além de apresentar um consumo de energia elétrica menor que o processo atual.

6 CONCLUSÃO

A partir do desenvolvimento desta pesquisa, concluiu-se que:

- O modelo matemático aplicado mostrou-se adequado para a caracterização do fenômeno de transferência de calor estudado;
- Comprovou-se com a aplicação do modelo, resultados muito próximos aos obtidos na medição experimental da temperatura no interior do produto, por apresentar valores de erro relativo menores que 10 %;
- O comportamento da temperatura no decorrer do tempo de processo com a variação do coeficiente convectivo apresentou uma queda maior nas três primeiras horas, quando comparados com a queda da temperatura nas horas finais do processo;
- O processo de pré-resfriamento foi responsável por 58,1 % da redução da temperatura do produto;
- O método proposto, pré-resfriamento combinado com resfriamento com imersão com água, mostrou-se como uma alternativa viável para a aplicação em processos de resfriamento, por apresentar uma redução no consumo de energia elétrica e por reduzir gastos com calor no ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor, quando comparado com o processo atual. Assim, seria possível dobrar a produção, sem a necessidade de investir em sistemas de refrigeração por compressão.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCS - Associação Brasileira de Criadores de Suíno. Consumo de Carne Suína no Brasil, 2011. Disponível em: <http://www.abcs.org.br/informativo>. Acesso em: 22 de janeiro de 2014.

ARAÚJO, J. L., QUEIROZ, A. J. M., FIGUEIREDO, R. M. F. Propriedades termofísicas da polpa do cupuaçu com diferentes teores de sólidos. **Ciência Agrotécnica**, v.28, n.1, p.126-134, jan/fev, 2004.

ASHRAE. Hand book of fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1993.

ASHRAE. Methods of precooling fruits, vegetables and cut flowers. Refrigeration systems and applications handbook, Chapter 10, Atlanta, Georgia (USA), 1994.

BARBIN, D. F.; NEVES FILHO, L. C.; SILVEIRA JUNIOR, V. Processo de congelamento em túnel portátil com convecção forçada por exaustão e insuflação para paletes. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, p. 667-675, jul/set, 2009.

BECKER, B. R.; FRICKE, B. Food thermo physical property models. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 26, p. 627-636, 1999.

BECKER, B. R.; FRICKE, B. A. Hydro cooling time estimation methods. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 29, n. 2, p. 165-174, 2002.

BORÉM, F, M; RIBEIRO, R. C. M. S; CORREA, P. C; PEREIRA, R. G. F. A. Propriedades térmicas de cinco variedades de café cereja descascado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p.475-480, 2002.

BOUKOULAS, C. J.; KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Density and porosity: Literature data compilation for foods tuffs. **International Journal of Food Properties**, v.9, p. 715-746, 2006.

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

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento. Instrução normativa nº 20, de 31 de julho de 2000. Aprova os regulamentos técnicos de identidade e qualidade de almôndegas, de apresuntado, de fiambre, de hambúrguer, de quibe, de presunto cozido e de presunto. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 2000.

BRESSAN, Maria Cristina, PEREZ, Juan Ramon Olalquiaga. Tecnologia de carnes e pescados. Ed. Centro de Editoração/FAEPE. Lavras, 2001.

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

CORRÊA, Henrique L. Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica. São Paulo. Atlas, 2004.

CREMINOX. Sistemas de moldagem, cozimento, resfriamento e desmoldagem de presunto. Buenos Aires, Argentina. 35 p.

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

EVANGELISTA, J. Tecnologia dos Alimentos. 2. ed. São Paulo: Atheneu, 2000.

FERZOLA, J. F. Análise global de um sistema de refrigeração industrial. 2010. 22f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

FRASER, H. Tunnel Forced-Air Coolers for Fresh Fruits & Vegetables. Canada: Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Government of Ontario, 1998.

HOUSKA, M.; SUN, D.W.; LANDFELD, A.; ZHANG, Z. Experimental study of vacuum cooling of cooked beef in soup. **Journal of Food Engineering**, v. 59, 105-110, 2003.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. Fundamentos de transferência de calor e massa. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

KADER, A. A. Post harvest technology of horticultural crops. Division of Agriculture and Natural Resources, Davis, University of California, 3 ed., 295 p., n. 3311, 2002.

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

KREITH F. Princípios da transmissão de calor. Editora Edgard Blücher Ltda, 3a edição, 2002.

LAGUERRE, O.; BEN AMARA, S.; FLICK, D. Heat transfer between wall and packed bed crossed by low velocity airflow. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 16, p. 1951-1960, 2006.

LINO, G. C. de L.; LINO, T. H. L. Congelamento e Refrigeração. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2014.

MARCOTTE, M.; TTAHERIAN, A. R.; KARIMI, Y. Thermo physical properties of processed meat and poultry products. **Journal of Food Engineering**, v. 88, p. 315-322, 2008.

MARQUES, J. F. M. Gestão energética na pequena e média agroindústria: um enfoque térmico. 2011. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2011.

MCDONALD, K.; SUN, D-W; KENNY, T. Comparison of the quality of cooked beef products cooled by vacuum cooling and by conventional cooling. **Lebensmittel – Wissenschaftund – Technologie**, v. 33, 21-29, 2000.

MITCHELL, G. Cooling horticultural commodities need for cooling. In: Post harvest technology of horticultural crops. Kader, A. A. (ed.) California. University of California, 1992.

NASCIMENTO, N. R. Análise termodinâmica e otimização de um sistema de refrigeração por absorção para conservação de alimentos. 2011. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

NECKEL, J. V.; MARIANI, V. C. Modelagem do congelamento da beterraba. Pontifca Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2010.

NUNES, A. S.; PARK, K. J.; FABBRO, I. M. D.; PARK, K. J. B.; BROD, F. P. R. Métodos de determinação experimental da condutividade e difusividade térmica de materiais biológicos. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos (SBCTA)**, v. 36, n. 1, p. 55-58, 2002.

ORDÓÑEZ, J. A. Tecnologia de Alimentos: Componentes dos Alimentos e Processos. Porto Alegre: Artmed; 2005.

OLIVEIRA, G. S. de; LOPES FILHO, J. F.; THOMÉO, J. C. Difusividade térmica do presunto cozido e seus constituintes sólidos principais. **Brazilian Journal Food Technology**, v. 6, n. 2, p. 137-142, jul./dez., 2003.

RAHMAN, S. Food Properties Handbook. New York, 1995.

REIS, J. C. D. Medidas do coeficiente de transferência de calor em fornos combinados. 2012. 77p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos - Escola de Engenharia Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul, 2012.

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

ROUSE, H., INCE, S. History of hydraulics. In: FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. Introdução à mecânica dos fluidos. 6. ed. LTC Editora Ltda., Rio de Janeiro – RJ, 2006.

SANTOS, B. P. Caracterização físico-química e sensorial dos apresentados elaborados com carne suína proveniente da raça JSR, e acrescidos dos hidrocolóides: carragena, fécula de mandioca e maltodextrina. 2005. 95f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Programa de Pós Graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SANTOS, C. A. Estudo da Transferência de Calor Durante o Congelamento de Cortes de Aves em Caixas de Papelão Ondulado. 2005. 99 p. Dissertação Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SILVA, A. C. S. Efeitos do degelo de balcão refrigerado sobre a qualidade de torta de confeitaria. 2001. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Qualidade em Alimentos) - Centro de Excelência em Turismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

SILVA, J. G. Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização. São Paulo: Artliber Editora, 2003.

SILVA, R. R. Estudo da transferência de calor em tanques submersos: influências do modo e da intensidade da agitação da água. 2007. 114 p. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Alimentos - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

SILVA, V. R. Modelagem e simulação de um sistema de refrigeração industrial. 2011. 26 f. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica - Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SLONGO, A. P. Uso de alta pressão hidrostática em presunto: avaliação físico-química e sensorial e modelagem do crescimento microbiano. 2008. 163f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

TERRA, Nelcindo Nascimento. Apontamentos de Tecnologia de Carnes. Editora Unisinos, 1998.

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

TERUEL, M. B.; KIECKBUSCH, T.; CORTEZ, L. Cooling parameters for fruits and vegetables of different sizes in a hydricooling system. **Science Agricola**, v. 61, n. 6, p. 655-658, 2004.

THOMPSON, J. F. Pre-cooling and Storage Facilities. In: USDA. Agriculture Handbook Number 66 – DRAFT. United States: Department of Agriculture. (Revisado em 2004).

TIZZEI, Alexandre. Implementação e avaliação de desempenho de estratégias de controle aplicadas em um sistema de armazenamento refrigerado. 2011. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2011.

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

VIGNEAULT, C.; CORTEZ, L. A. Método de resfriamento rápido com gelo. Embrapa Informação Tecnológica, cap. 13, p. 283-309, Brasília, 2002.

VISSOTTO, F. Z.; KIECKBUSH, T. G.; NEVES FILHO, L. C. C. Pré-resfriamento de frutas e hortaliças com ar forçado. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos (SBCTA)**, v. 33, n. 1, p. 106-114, jan/jun, 1999.