

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

ALINE TEIXEIRA FERRAZ

**ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS EM SISTEMA DE PRÉ-
RESFRIAMENTO DE CARÇAÇAS DE FRANGO POR IMERSÃO**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

ALINE TEIXEIRA FERRAZ

**ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS EM SISTEMA DE PRÉ-
RESFRIAMENTO DE CARÇAÇAS DE FRANGO POR IMERSÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Antônio Marcos de Oliveira Siqueira

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2020

T

F381a Ferraz, Aline Teixeira, 1994-
2020 Análise de estratégias operacionais em sistema de pré-
resfriamento de carcaças de frango por imersão / Aline Teixeira Ferraz.
- Viçosa, MG, 2020.
106 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Antônio Marcos de Oliveira Siqueira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.85-89.

1. Aves. 2. Frigoríficos. 3. Balanço de energia. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Química. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Química. II. Título.

CDD 22 ed. 664.93

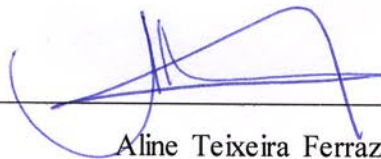
ALINE TEIXEIRA FERRAZ

**ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS EM SISTEMA DE PRÉ-
RESFRIAMENTO DE CARCAÇAS DE FRANGO POR IMERSÃO**

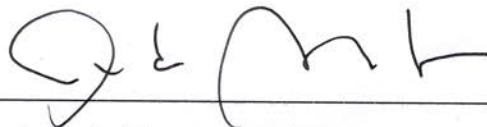
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de março de 2020

Assentimento:



Aline Teixeira Ferraz
Autora



Antônio Marcos de Oliveira Siqueira
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda fé e força.

A minha família, por todo o amor, carinho e paciência.

Ao DEQ/UFV, pela oportunidade de fazer parte do Programa de Pós-Graduação.

A Pif Paf Alimentos, em especial à Garantia da Qualidade, por todo apoio durante a execução e coleta de dados.

Ao meu orientador Prof, Antônio Marcos de Oliveira Siqueira, que foi tão importante na minha vida acadêmica e no desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus amigos, pelo incentivo constante.

A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, iluminando de maneira especial minha vida e minha formação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

FERRAZ, Aline Teixeira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2020. **Análise de estratégias operacionais em sistema de pré-resfriamento de carcaças de frango por imersão**. Orientador: Antônio Marcos de Oliveira Siqueira.

O sistema de pré-resfriamento é uma das etapas que compreende o processamento tecnológico de abate de aves, cuja principal função é a rápida redução da temperatura das carcaças de frango. Tendo em vista a influência desta fase na qualidade e segurança alimentar do produto final além da sua forte contribuição no consumo de recursos hídricos e energéticos das agroindústrias, a presente dissertação teve como principal objetivo analisar um sistema de resfriamento de carcaças de uma indústria de grande porte específica com resfriadores contínuos sob imersão em água no que diz respeito à transferência de calor e massa e eficiência exergética, assim como aspectos envolvendo a segurança alimentar, de forma a validar o processo sob o ponto de vista econômico e tecnológico. A metodologia se baseou na coleta de dados e simulação numérica para determinação dos balanços de massa, energia e exergia com auxílio do *software* EEs, assim como na coleta de amostras de água e carcaça para análise de qualidade e efetividade da redução microbiana. Como principais resultados, a análise demonstrou pleno atendimento quanto aos padrões normativos de temperatura e absorção de água pela carcaça de frango. Acerca da modelagem matemática desenvolvida, foi possível prever adequadamente o comportamento das quantidades totais de água de renovação e gelo de acordo com variações da velocidade da linha de abate e variação de temperatura e massa iniciais da carcaça de frango. As exergias destruídas e eficiências exergéticas relacionadas com cada componente do sistema assim como os custos exergoeconômicos relacionados com o resfriamento da carcaça de frango também foram obtidos, os quais permitiram visualizar a localização das maiores ineficiências do processo: vazão de amônia nos trocadores de calor, turbina de ar comprimido e correntes de saída de água dos resfriadores. No que diz respeito aos padrões microbiológicos, verifica-se, apesar da necessidade de melhorias quanto à cloração e carga de mesófilos, enterobactérias e *E. coli* da água residente dos resfriadores, importante redução logarítmica microbiológica para as carcaças de frango após passagem pelo sistema de pré-resfriamento.

Palavras-chave: Abatedouro frigorífico. Segurança de alimentos. Balanço de massa e energia. Análise exergoeconômica.

ABSTRACT

FERRAZ, Aline Teixeira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2020. **Analysis of operational strategies in a pre-cooling system for chicken carcasses by immersion.** Adviser: Antônio Marcos de Oliveira Siqueira.

The pre-cooling system is one of the stages that comprises the technological processing of poultry slaughter, whose main function is the rapid reduction of the temperature of chicken carcasses. Considering the influence of this phase on the quality and safety of the final product besides its strong contribution to the water and energy consumption of agro-industries, this dissertation had, as main objective, the analysis of a layout of carcass-cooling systems of a specific large-scale industry with chillers with respect to heat and mass transfer and exergetic efficiency, as well as aspects involving food safety, in order to validate processes from an economic and technological point of view. The methodology was based on data collection and numerical simulation to determine the mass, energy and exergy balances with assistance from the EES software, as well as collecting water and carcass samples for quality and effectiveness analysis of microbial reduction. As main results, the analyses showed full compliance with the normative standards of temperature and water absorption by the chicken carcass. About the mathematical modeling developed, it was possible to appropriately predict the behavior of the total amounts of water and ice according to variations in the speed of the slaughter line and variations in temperature and initial mass of the chicken carcass. The destroyed exergies and exergetic efficiencies related to each component of the system as well as the exergoeconomic costs related to the cooling of the chicken carcass were also obtained, which allowed to visualize the location of the biggest inefficiencies of the process: ammonia flow in the heat exchangers, turbine compressed air and water flow from the coolers. Regarding microbiological standards, despite the need for improvements in the chlorination and mesophils load, enterobacteria and *E. coli* from the resident water of the chillers, there is an important microbiological logarithmic reduction for chicken carcass after passing through the pre-cooling system.

Keywords: Poultry Slaughterhouse. Food safety. Mass and energy balance. Exergoeconomic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção anual de carne de frango (milhões ton)	17
Figura 2 - Exportações brasileiras de carne de frango.....	17
Figura 3 - Projeção de carne de frango no Brasil	18
Figura 4 - Fluxograma do processo de abate de frangos.....	21
Figura 5 - Chiller de imersão em água para carcaças de frango	25
Figura 6 - Desenho esquemático para balanço de energia no resfriador	38
Figura 7 - Sala de pré-resfriamento de carcaças da empresa estudada	49
Figura 8 - Etapas para análise de temperatura e absorção de água nas carcaças de frango	51
Figura 9 - Volume de controle para o pré-chiller	55
Figura 10 - Volume de controle para o chiller fase 1	56
Figura 11 - Volume de controle para o chiller fase 2	58
Figura 12 - Volume de controle para o trocador de calor da água de renovação	59
Figura 13 - Volume de controle para o trocador de calor da fábrica de gelo.....	60
Figura 14 - Volume de controle para o sistema de ar comprimido	62
Figura 15 - Fração mássica final de água na carcaça após o pré-resfriamento	67
Figura 16 - Temperatura da carcaça no sistema de pré-resfriamento	67
Figura 17 - Perfil da temperatura da carcaça de frango no sistema de pré-resfriamento.....	68
Figura 18 - Peso inicial da carcaça versus demanda total de água e gelo	73
Figura 19 - Temperatura inicial da carcaça <i>versus</i> demanda total de água e gelo	73
Figura 20 - Velocidade de abate versus demanda total de água e gelo	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rendimento ponderado do processo de abate de frangos	23
Tabela 2 – Custos de utilidades	63
Tabela 3 – Metodologias utilizadas pelo laboratório de microbiologia	64
Tabela 4 – Temperatura médias de entrada e saída da carcaça nos resfriadores.....	69
Tabela 5 – Parâmetros médios para os resfriadores	69
Tabela 6 – Parâmetros obtidos para o cálculo da quantidade de calor cedida pelo sistema	72
Tabela 7 – Parâmetros obtidos pelo balanço de massa e energia nos resfriadores.....	72
Tabela 8 – Exergias das correntes.....	75
Tabela 9 – Eficência exergética.....	76
Tabela 10 – Custo exergoeconômico específico para a carcaça de frango.....	76
Tabela 11 – Cloro livre e pH do gelo e água residente dos resfriadores	78
Tabela 12 – Contagem média de mesófilos aeróbios e anaeróbios em carcaças	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros para controle do sistema de pré-resfriamento de carcaças de frango em resfriadores contínuos tipo rosca sem fim	29
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Mesófilos aeróbios na água de renovação dos resfriadores	79
Gráfico 2 - Mesófilos aeróbios na água residente dos resfriadores	80
Gráfico 3 - Perfil de enterobactérias nos resfriadores.....	80
Gráfico 4 - Perfil de Escherichia coli nos resfriadores	81
Gráfico 5 - Redução decimal em carcaças de frango submetidas ao pré-resfriamento em imersão em água.....	82
Gráfico 6 - Perfil de Escherichia coli antes e após o sistema de pré-resfriamento	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABPA	Associação Brasileira de Proteína Animal
ANA	Agência Nacional das Águas
ANVISA	Agência de Vigilância Sanitária
DEQ	Departamento de Química
DIF	Departamento de Inspeção Federal
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
RIISPOA	Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal
SIF	Serviço de Inspeção Federal
UFV	Universidade Federal de Viçosa
WHO	<i>World Health Organization</i>
WWAP	<i>World Water Assessment Programme</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivos gerais	15
2.2 Objetivos específicos	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1 A importância industrial da carne de frango	16
3.2 O abate e processamento de aves.....	18
3.3 O sistema de pré-resfriamento de carcaças de frango	24
3.4 Normas e legislações pertinentes para a segurança de alimentos	28
3.5 Parâmetros microbiológicos	31
3.6 Recursos materiais e energéticos no setor industrial	33
3.6.1 Análise de recursos materiais e energéticos em sistemas de pré-resfriamento de carcaças de frango por imersão	36
3.7 Exergia	42
3.8 Análise Exergoeconômica	46
4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	49
4.1 Balanço de massa e energia no sistema de pré-resfriamento de carcaças de frango	50
4.1.1 Análise de absorção de água e temperatura para a carcaça de frango	50
4.1.2 Consumo de água e gelo nos resfriadores	52
4.2 Análise exérgica e exergoeconômica.....	53
4.2.1 Análise exérgica.....	54
4.2.1.1 Pré-chiller.....	55
4.2.1.2 Chiller fase 1	56
4.2.1.3 Chiller fase 2	58
4.2.1.5 Trocador de calor – fábrica de gelo	60
4.2.1.6 Sistema de ar comprimido	62

4.2.2 Análise exergoeconômica	63
4.3 Avaliação microbiológica para a segurança alimentar	64
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
5.1 Balanço de massa e energia no sistema	66
5.1.1 Análise de absorção e temperatura da carcaça de frango	66
5.1.2 Consumo de água e gelo nos resfriadores	70
5.2 Análise exérgica e exergoeconômica	75
5.3 Avaliação microbiológica para a segurança alimentar	77
5.3.1 Pontos de renovação de água e água residente dos <i>chillers</i>	77
5.3.2 Carcaça de frango antes e pós <i>chiller</i>	81
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
REFERÊNCIAS	85
APÊNDICE A - Fluxograma do processo de resfriamento de carcaças de frango	90
APÊNDICE B – Dados coletados para análise de absorção e variação de temperatura das carcaças de frango	91
APÊNDICE C – Dados coletados para determinação dos parâmetros de processo na sala de pré-resfriamento	93
APÊNDICE D – Memorial de cálculo EES.....	100

1 INTRODUÇÃO

Em vista dos recentes avanços na tecnologia animal, a produção de carne de frango foi submetida a notável crescimento nos últimos anos, trazendo como resultado maior diversificação dos produtos e aumento do seu valor econômico e prazo de validade (PIZATO et al; CORTEZ-VEGA; PRENTICE, 2015). Tal fato torna o mercado de carnes no Brasil cada vez mais competitivo e complexo, uma vez que para o alcance de excelência produtiva se faz necessário maior rigor no controle sanitário e busca por sustentabilidade nos processos. Segundo Nagel (2012), a segurança e a qualidade da carne de frango são afetadas por muitas etapas ao longo do fluxo de produção. Portanto, quaisquer intervenções para reduzir o risco de contaminação cruzada durante o processamento de aves devem ser praticadas a fim de garantir o direito e a expectativa dos consumidores de obterem produtos alimentícios saudáveis.

De acordo com Dinçer (1997), Carciofi e Laurindo (2010), Nagel (2012) e Viana (2016), dentre todas as etapas do processamento tecnológico industrial de aves, o sistema de pré-resfriamento representa uma das fases mais críticas para o controle de qualidade do produto final. O rápido resfriamento das carcaças de aves promovido por este sistema, além de retardar as alterações físicas, químicas, biológicas e histológicas da carne, diminui a contaminação bacteriana conferindo maior tempo de prateleira ao alimento. Dentre as principais variações deste processo, destaca-se a preferência da maioria das indústrias processadoras de aves no Brasil pela adoção do pré-resfriamento por imersão em água, pois além de ser eficaz frente a redução de micro-organismos, impede a desidratação das carcaças de frango pela absorção de água durante a imersão. Neste contexto, o estudo dos sistemas de pré-resfriamento de carcaças com melhores desempenhos é de suma importância para o atendimento aos padrões de temperatura, carga microbiológica, vazão e absorção de água exigidos pelas atuais entidades regulatórias.

Além dos itens preconizados nas legislações vigentes do MAPA e ANVISA acerca dos procedimentos para segurança alimentar dos produtos de origem animal, os obstáculos financeiros existentes na atual conjuntura do país e o crescente interesse pela conservação de energia leva às organizações a buscarem cada vez mais formas de melhor aproveitamento dos recursos hídricos e energéticos disponíveis. Segundo Rowe (2016), o processamento de alimentos na última década tornou-se um dos maiores conversores de energia nas etapas produtivas, e a interdependência dos alimentos, da água e da energia leva à necessidade de projetos mais eficientes de produção.

Em um mercado altamente acirrado, qualquer fator que leve à redução do custo produtivo é visto como um diferencial competitivo (SANT'ANNA, 2008). De acordo com Matsumura (2007), as indústrias podem ser consideradas grandes fontes de efluentes reusáveis, em que deveriam existir maiores incentivos por parte do governo para a implantação de programas que visem maior eficiência no uso da água, maior possibilidade de reciclagem e gerenciamento de seu uso. Este pesquisador também diz que, além dos benefícios econômicos, a implantação de um programa de conservação e/ou reuso de água traz uma imagem positiva para a empresa, demonstrando a conscientização em relação à preservação ambiental e responsabilidade social.

Considerando que o consumo energético é o responsável por grande parcela dos custos nas indústrias avícolas, e que por sua vez o sistema de pré-resfriamento de carcaças representa grande parte desse consumo, todo esforço para otimizar o processo é relevante (CARCIOFI, 2005). Hoje, o mercado exige produtos de empresas comprometidas com ações de proteção ao meio ambiente e uso consciente dos recursos naturais.

Tendo em vista a relevância do tema, o presente estudo se baseia na análise de uma das diferentes tecnologias utilizadas na etapa de pré-resfriamento de carcaças de frango no que diz respeito à utilização de gelo e água gelada no sistema, utilizando-se de metodologias que combinam a termodinâmica, transferência de calor e massa, a economia e a microbiologia, visando redução de custos e redução do consumo energético no âmbito avaliado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Analisar um sistema de resfriamento de carcaças de uma agroindústria de grande porte, constituído de *chillers* de imersão em água gelada e gelo em série, no que tange à segurança alimentar e ao uso dos recursos materiais e energéticos disponíveis.

2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos desta dissertação:

- Analisar a absorção de água e a diminuição da temperatura das carcaças de frango no sistema em estudo;
- Analisar a quantidade de gelo, água e energia demandadas em cada resfriador;
- Comparar, através da análise exérgica e exergoeconômica, a eficiência do *layout* sobre o ponto de vista tecnológico e econômico;
- Verificar a eficiência do *layout* quanto à manutenção dos padrões microbiológicos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada, no item 3.1, a revisão sobre a importância industrial da carne de frango baseada em dados estatísticos do setor agroindustrial brasileiro. Nos itens 3.2 e 3.3, são expostas breves descrições sobre as etapas de abate e processamento de frangos e sobre o sistema de pré-resfriamento de carcaças de frango em abatedouros frigoríficos, respectivamente, com a apresentação dos principais parâmetros do sistema. No item 3.4 são abordadas as principais normas e legislações para a segurança de alimentos que regem os frigoríficos nacionais e, no item 3.5 seguinte, os principais parâmetros microbiológicos do processo de resfriamento de carcaças de frango. No item 3.6, por sua vez, concentra-se os principais dados e discussões acerca da utilização dos recursos materiais e energéticos em agroindústrias.

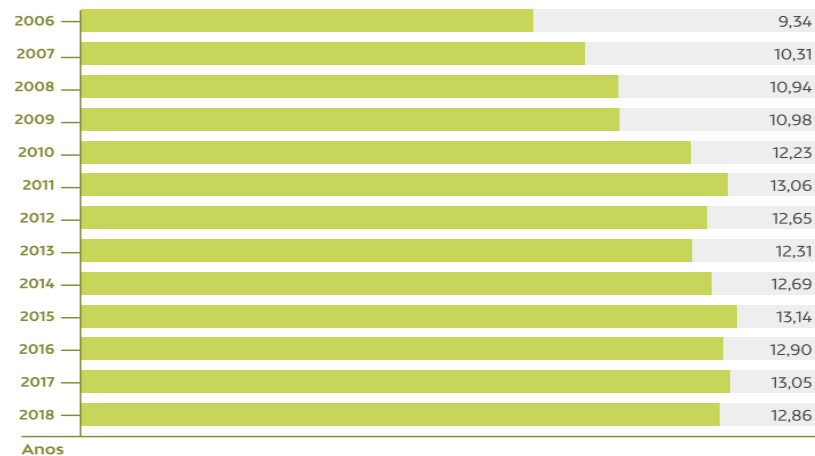
Por fim, os fundamentos da análise exérgica e exergoeconômica presenciam-se nos itens 3.7 e 3.8, respectivamente, com o desenvolvimento das principais equações e descrição dos métodos utilizados para os cálculos das grandezas em questão.

3.1 A importância industrial da carne de frango

Em relação ao mercado de carnes, a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA) aponta, com base no último relatório do setor agropecuário, um consumo médio anual de carne de frango de aproximadamente 42,10 kg por habitante, aliado a uma produção média de 13 milhões de toneladas nos últimos 4 anos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL, 2019), conforme apresentado na Figura 1.

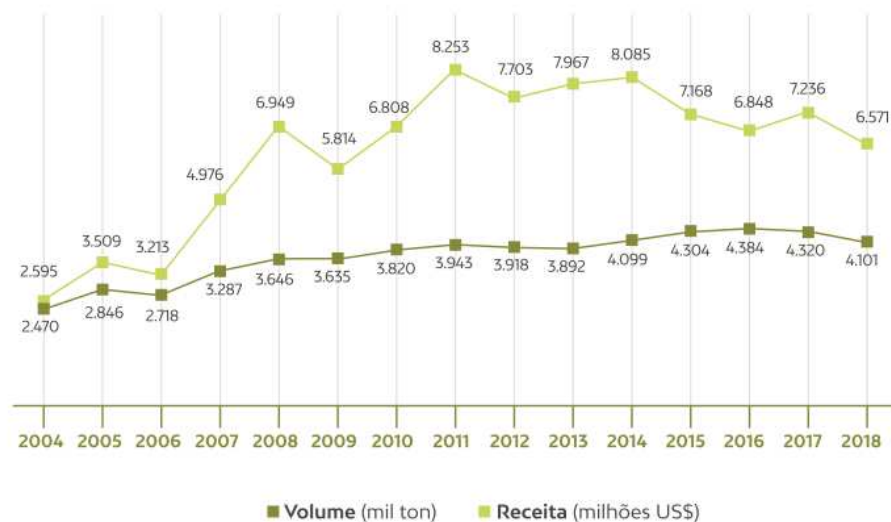
Os resultados de produção obtidos renderam ao Brasil a posição de segundo maior produtor de carne de frango do mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, este último com o total de 19,36 milhões de toneladas produzidas. As pesquisas reportadas pela Associação Brasileira de Proteína Animal (2019) mostram que a produção aviária no país ainda apresenta posição de destaque no cenário econômico mundial, ocupando a liderança no ranking de exportação com volumes superiores a 4,1 milhões de toneladas. A Figura 2 apresenta o cenário do volume exportado e receita obtida para as exportações realizadas.

Figura 1 - Produção anual de carne de frango (milhões ton)



Fonte: Associação Brasileira de Proteína Animal, 2019, p. 11.

Figura 2 - Exportações brasileiras de carne de frango

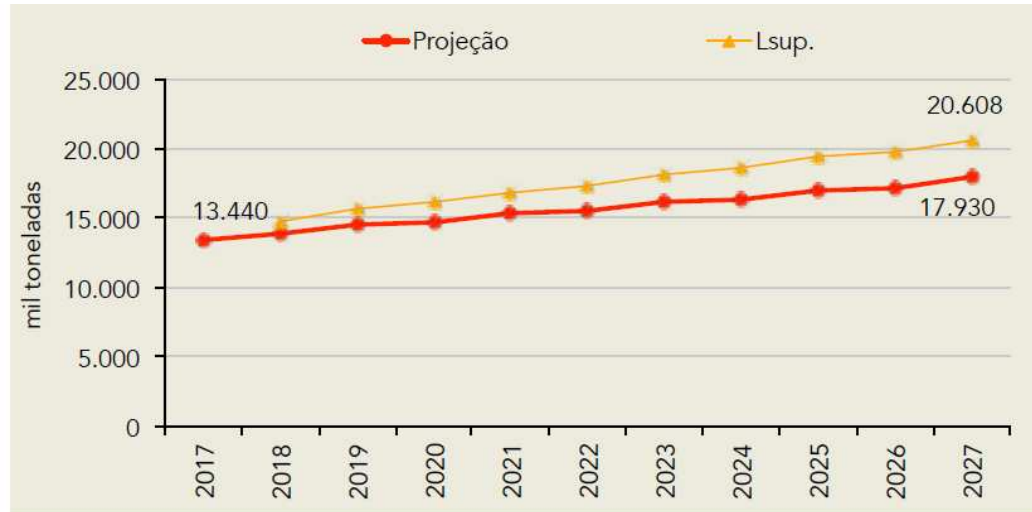


Fonte: Associação Brasileira de Proteína Animal, 2019, p. 16.

A partir da Figura 2, verifica-se um cenário estável de volume exportado nos últimos anos, sendo 66% representado pelos cortes de frango e 27% pelo frango inteiro. Aliado aos dados supracitados, estudos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) mostram que a carne de frango está entre as carnes que projetam maiores taxas de crescimento de produção no período de 2016/2017 a 2026/2027, com possibilidade de crescimento de 2,8 % ao ano (Figura 3), frente da carne suína e bovina, com perspectivas de crescimento de 2,5 %

e 2,1 % ao ano, respectivamente (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2017):

Figura 3 - Projeção de carne de frango no Brasil



Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2017, p, 66,

Ainda segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2017) , “o crescimento anual projetado para o consumo da carne de frango [...] significa um aumento de 29,5 % em seu consumo nos próximos 10 anos e, [...] supondo a população total projetada pelo IBGE em 219 milhões de pessoas, tem-se ao final das projeções um consumo de carne de 54,3 kg por habitante ao ano.” (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2017). Nesse sentido, tendo em vista o aumento da demanda projetada para a carne de frango, reforça-se a necessidade de garantia de um sistema industrial seguro e sustentável, principalmente no que tange à otimização e análise criteriosa das principais etapas do processamento de carcaças de frango relacionadas ao frio e conservação.

3.2 O abate e processamento de aves

Segundo Sant’anna (2008), a moderna avicultura brasileira começou a ser desenvolvida no início da segunda metade do século passado. Foi no interior de São Paulo que surgiram os primeiros estabelecimentos agrícolas, destinados principalmente à produção de ovos de consumo. A ascensão da atividade trouxe como decorrência natural o interesse também pela criação de frango de cortes, e foi no estado de Santa Catarina, especialmente na região de

Concórdia, que os criatórios de frango alcançaram rapidamente as dimensões de atividade comercial sólida, expandindo-se para outros estados.

De forma geral, o processamento de aves na indústria se inicia pela recepção das aves vivas obtidas de granjas próprias ou de parceiros criadores e transportadas em caixas vazadas e adequadamente sanitizadas em veículo apropriado. Os veículos transportadores de aves vivas são recepcionados após serem devidamente identificados na portaria do frigorífico e são encaminhados à balança onde são checados o lacre de segurança, o Boletim Sanitário, a Guia de Transporte de Aves (GTA) e a Ficha de Galpão,

Ao chegar na unidade de abate, os frangos devem permanecer em área coberta devidamente protegida dos ventos e da incidência direta dos raios solares, reservada ao seu descanso hídrico onde há ventiladores e umidificadores. Em unidades exportadoras, encerrado este período, as aves são levadas à plataforma de recepção, desamarra-se a carga e realiza-se a inspeção *ante-mortem* pelo Serviço de Inspeção Federal (SIF).

Após a liberação das aves, elas são retiradas das caixas plásticas e penduradas pelos pés na trilha aérea mecanizada, em ganchos de aço inox. As caixas então seguem para lavadores próprios, onde são higienizadas, sanitizadas e devolvidas ao caminhão previamente lavado.

As aves são atordoadas em tanque de insensibilização por eletronarcose sob imersão em água com corrente elétrica, frequência e amperagem apropriadamente reguladas conforme tamanho e peso médio das aves. Antes da entrada das aves na cuba de insensibilização, é importante que se haja também um aspersor de água voltado para as patas, com a finalidade de melhorar a condutividade da corrente elétrica pelo animal. Conforme apontado pela Portaria nº210/1998 do MAPA (BRASIL, 1998), em tempo inferior a 12 segundos após a insensibilização deve-se efetuar a sangria das aves (corte da veia jugular), podendo esta etapa ser automatizada ou não, no entanto que haja a garantia de que todas as aves sejam sangradas. Antes de qualquer outra operação, as aves sangradas passam por um tempo de sangria de no mínimo 3 minutos com o objetivo de se realizar uma sangria eficaz e completa (BRASIL, 1998). O sangue captado é enviado para a unidade de beneficiamento de produtos não comestíveis da indústria, para a fabricação de farinhas. De acordo com o Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal (RIISPOA), determinado pelo Decreto nº 9013/2017 do MAPA (BRASIL, 2017a), entende-se como unidade de beneficiamento de produtos não comestíveis o local do estabelecimento destinado à “recepção, à manipulação e ao processamento de matérias-primas e resíduos de animais destinados ao preparo exclusivo de produtos não utilizados na alimentação humana [...]” (BRASIL, 2017a).

As aves sangradas são conduzidas para a escalda com temperatura controlada e em seguida são direcionadas para as depenadeiras. Logo após, em unidades exportadoras, ocorre a pré-inspeção realizada pelo Serviço de Inspeção Federal (SIF) para detecção de anomalias ou doenças que possam comprometer a qualidade da carne, e, caso aprovadas pelo SIF, as carcaças seguem para o corte da cabeça e pés. As penas assim como as cabeças e as partes impróprias para consumo constatadas pelo SIF durante a pré-inspeção são conduzidas para a unidade de beneficiamento de produtos não comestíveis. Os pés, por sua vez, são conduzidos para o tanque de escalda de pés e seguem para o pré-resfriamento em chiller contínuo, tipo rosca sem fim, individuais, obedecendo o princípio de renovação de água contracorrente e com temperatura menor ou igual a 4 °C e com no máximo 5 ppm de cloro livre (BRASIL, 1998).

As carcaças que seguem na linha após pré-inspeção são transferidas automaticamente da nória da escaldagem para a área da evisceração, sendo inicialmente lavadas com água sob pressão, antes da evisceração, num volume não inferior à 1,5 litros por ave (BRASIL, 1998). Adentradas à sala, as carcaças são conduzidas automaticamente para as máquinas de oclusão da cloaca, abertura abdominal e eventração, com a exposição do pacote de vísceras, Em unidades exportadoras, as carcaças, assim como os seus miúdos correspondentes, seguem para a linha de inspeção *post-mortem* sob responsabilidade do SIF, onde devem constar esterilizadores e utensílios em quantidade suficiente para os trabalhos no local. As carcaças e as vísceras correspondentes são examinadas individualmente e o destino é dado de acordo com os critérios de inspeção descritos no Decreto nº 9013/2017 (BRASIL, 2017a) e executadas pela Inspeção Federal. As partes consideradas impróprias para consumo são encaminhadas através de chute pneumático para a unidade de beneficiamento de produtos não comestíveis para fabricação de farinha.

Os miúdos liberados pelo SIF seguem para a separação, podendo esta etapa ser automatizada ou não. Caso conste no programa produtivo da empresa, a moela deve seguir para uma sala de limpeza onde são retiradas as cutículas; o coração e o fígado, por sua vez, necessitam passar por revisão para retirada do pericárdio e vesícula biliar, respectivamente. Posteriormente, os miúdos são encaminhados para o sistema pré-resfriamento em *chiller* contínuo, tipo rosca sem fim, individuais, obedecendo o princípio de renovação de água contracorrente e com temperatura menor ou igual a 4 °C e com no máximo 5 ppm de cloro livre (BRASIL, 1998). O fluxograma abrangendo as principais etapas padrão do processo de produção da carcaça de frango pré-resfriada se encontra na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma do processo de abate de frangos

(continua)

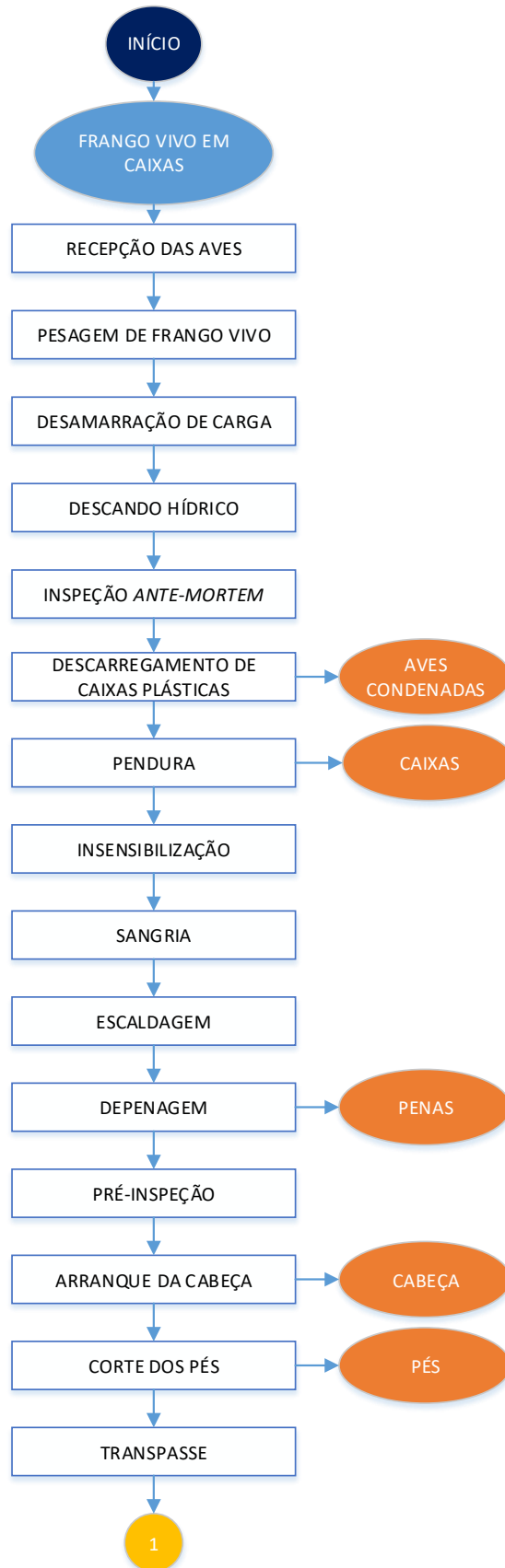
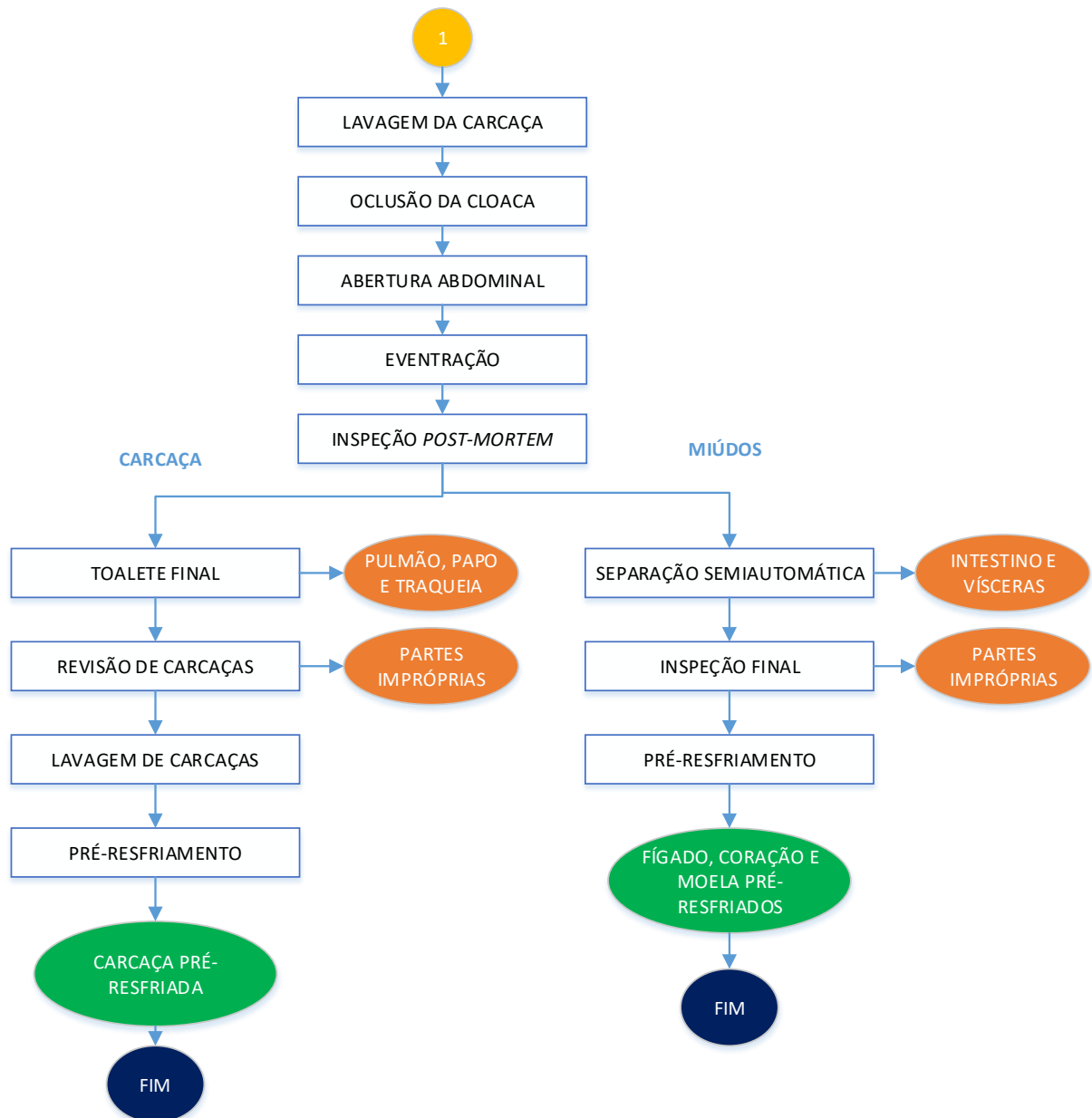


Figura 4 - Fluxograma do processo de abate de frangos

(conclusão)



As carcaças liberadas pelo SIF seguem para a toalete final (retirada de pulmão, papo e traqueia) em maquinários apropriados para estes fins, e em seguida para a área de revisão de carcaças. Neste local, as carcaças passam por pontos de inspeção onde é verificada a presença de contaminação gastrointestinal e/ou biliar, sendo este um dos pontos críticos para controle biológico do processo (BRASIL, 1998). As que ainda apresentarem algum tipo de contaminação devem ser transferidas para a linha de refile para a retirada das partes impróprias para consumo com auxílio de utensílios esterilizados em local apropriado com água na

temperatura mínima de 85 °C. Realizado o refile, as carcaças retornam para nória na qual, sem contaminação interna e/ou externa, são encaminhadas para o sistema de pré-resfriamento. No Brasil, a maior parte das agroindústrias adotam o sistema de imersão em *chiller*, tipo rosca sem fim, em série, obedecendo todos os princípios determinados pela Portaria nº 210/1998 (BRASIL, 1998). Finalizada esta etapa, as carcaças seguem para área de processamento e embalagem.

Com base nos produtos (carcaça de frango e miúdos) e subprodutos (partes não comestíveis, tais como penas e vísceras, e partes impróprias para consumo, tais como partes contaminadas) apresentados na Figura 4, a Tabela 1 sumariza, de forma global, o rendimento ponderado do processo de abate de frangos.

Tabela 1 - Rendimento ponderado do processo de abate de frangos

Cortes	Rendimento médio (%)
Frango vivo	100,0
Partes não comestíveis	12,6
Partes impróprias	1,0
Fígado	1,6
Moela	0,9
Coração	0,5
Carcaça de frango	83,4

Com base nos dados apresentados, verifica-se que a carcaça de frango representa, em média, apenas 83,4% do frango vivo encaminhado ao abatedouro, sendo o restante representado pelos miúdos (3%) e partes impróprias e não comestíveis (13,6%), estas últimas utilizadas como matéria-prima para a fabricação de alimentação animal.

Nos frigoríficos, o consumo de água nos tanques de pré-resfriamento de carcaça de frangos deve ser realizado numa taxa de consumo em relação ao número total de carcaças introduzidas no tanque. De acordo com a Portaria nº 210/1998 (BRASIL, 1998), as indústrias de processamento agrícola deve obedecer um limite máximo de consumo de água de 30 litros por carcaça (BRASIL, 1998), corroborando com dados obtidos por Northcutt e Jones (2004) que registraram, nos Estados Unidos, um consumo médio de água de 26 litros por carcaça para este processamento.

3.3 O sistema de pré-resfriamento de carcaças de frango

Conforme descrito pela Portaria nº 210/1998 do MAPA (BRASIL, 1998), define-se pré-resfriamento como um “processo de diminuição da temperatura das carcaças de aves, imediatamente após as etapas de evisceração e lavagem, podendo ser efetuado através de aspersão de água gelada; imersão em água por resfriadores contínuos; resfriamento por ar ou outros processos aprovados pelo Departamento de Inspeção de Produtos de Origem Animal (DIPOA).” (BRASIL, 1998).

De acordo com Martins et al, (2011), o resfriamento de carcaça de frango por ar forçado não é muito utilizado no Brasil uma vez que chega a vir a provocar a quebra de 3 a 4% na massa da carcaça por perda de água. Rodrigues (2013) investigou os processos de resfriamento por imersão em água e aspersão de água e ar forçado, avaliando-se a evolução temporal da temperatura do músculo peitoral, a variação da massa durante o resfriamento, a modelagem matemática do tempo de resfriamento e as análises termográficas de carcaças de frango submetidas aos processos em tela. Apesar dos resultados obtidos indicarem uma maior tendência de redução do tempo de resfriamento quando se utilizou um processo combinado de aspersão de água e ar forçado, houve também uma tendência à redução da massa da carcaça de frango, fato este não desejado pela maioria das unidades de processamento visto que afeta diretamente o rendimento final do processo.

Tendo em vista os fatores negativos quanto à perda de rendimento causado pelos processos tecnológicos de aspersão de água gelada e resfriamento por ar, o sistema de resfriamento de frangos por imersão tem sido amplamente utilizado na América do Norte e do Sul, principalmente nos maiores países produtores de carne de aves do mundo: Brasil e Estados Unidos. Em relação ao *chiller* de imersão em água, Mead (2004) e Huezo (2007) descrevem que este sistema pode ser classificado como fluxo contínuo ou batelada, sendo o último considerado impraticável em operações de larga escala devido ao fato de não suportar uma taxa de produção contínua. Também de acordo com os autores, os *chillers* de imersão de fluxo contínuo geralmente envolvem múltiplos estágios, são passíveis de fornecer um movimento contínuo das carcaças nas quais, ao serem removidas da noréa de transporte e adentrarem o tanque, são lentamente empurradas através da água por pás rotativas com taxas de resfriamento de 2 a 6 vezes mais rápidas que os resfriadores estáticos. A Figura 5 apresenta a configuração industrial do equipamento de pré-resfriamento em questão.

Figura 5 - Chiller de imersão em água para carcaças de frango



Fonte: Frinox, 2018

Segundo Mead (2004) e Huezó (2007), durante o processo de resfriamento por imersão, a água não apenas extrai calor, mas também remove sólidos (pele, gordura, etc.) incluindo micro-organismos da carcaça. Para controlar o nível de contaminação, os regulamentos determinam parâmetros para dosagem controlada de cloro e incorporação contínua de água potável para manter uma taxa de renovação mínima durante todo o período produtivo.

Sobre as dimensões, o tamanho do *chiller* varia de acordo com a disponibilidade de espaço físico na planta industrial, bem como com a necessidade de resfriamento de frangos dada pela velocidade da linha de abate. A fim de favorecer a diminuição de temperatura, ao longo do equipamento podem existir pontos de distribuição de gelo, gerado em salas especialmente projetadas, os quais são alimentados em um ou mais pontos ou até estar ausente em alguns tanques. De acordo com Carciofi (2005), o gelo, com menor massa específica que a água, permanece na parte superior do *chiller* formando uma camada que recobre a superfície do meio de resfriamento. A baixa agitação deste meio não facilita que todo o gelo se misture à água e seja fundido. Em algumas unidades industriais, é também observado em alguns equipamentos o encamisamento do *chiller*, sendo a camisa preenchida por fluidos refrigerantes como o etileno-glicol ou a amônia, ou a recirculação de água gelada através de *rechillers*.

Além do fluxo adicional de gelo, o resfriamento por imersão ainda pode conter em seus equipamentos um sistema de injeção de ar, industrialmente denominado “borbulhamento”, cujo objetivo é promover uma maior agitação da água que pode resultar no aumento das velocidades de resfriamento e de absorção de água nas carcaças. Esse sistema é composto de entradas que

ficam na parte inferior dos tanques, acoplados a uma linha de ar comprimido, permitindo a entrada de ar. De acordo com o Decreto nº 9,013/2017/MAPA (BRASIL, 2017), estabelece-se que o ar comprimido deve ser “previamente tratado e seguir padrões pré-estabelecidos na legislação vigente” (BRASIL, 2017).

Em relação à temperatura, Petrak et al. (1999) e James et al. (2006) já diziam que um sistema que promove o rápido resfriamento das carcaças de frango a 7 °C reduz o crescimento bacteriano e auxilia a preservar a qualidade microbiológica da carne devido à redução da taxa de proliferação de micro-organismos deteriorantes e/ou patógenos. Isto se deve ao fato de que o abaixamento rápido da temperatura retarda as alterações físicas, químicas, biológicas e histológicas que ocorrem devido tanto a processos naturais da carne e quanto à ação de micro-organismos, mantendo assim a sua qualidade. Além da temperatura, Voidarou et al. (2007) mostram que o fluxo da água e a propulsão das carcaças em direções contrárias permitem que o *chiller* desenvolva um ambiente capaz de causar um grande estresse às células bacterianas, ajudando a diminuir a carga microbiana.

Em relação à influência do volume de água do sistema, Northcutt e Jones (2004) investigaram sua contribuição no controle sanitário das carcaças de frango durante o procedimento de resfriamento por imersão e concluíram que o uso tanto de pequenos ou grandes volumes de água, com a cloração determinada pela legislação, minimizou a contagem de aeróbios mesófilos, enterobactérias, *E. coli* e *Campylobacter*. Também segundo Northcutt e Jones (2004), é de suma importância ponderar todas as variáveis, uma vez que a redução dos micro-organismos devido ao aumento do consumo de água pode não ser suficiente para compensar os custos econômicos.

Sobre a influência na diminuição de patógenos, Huezo (2007) também analisou o efeito do método do resfriamento sobre o número e prevalência de *Escherichia coli*, coliformes, *Campylobacter* e *Salmonella* em carcaças de frango. Durante cada uma das repetições feitas, 60 frangos foram inoculados oralmente e intraclocamente com 1 mL de uma suspensão contendo aproximadamente 10^8 células mL^{-1} de *Campylobacter*. Após um dia, os frangos foram inoculados com 1 ml de uma suspensão contendo aproximadamente 10^8 células mL^{-1} de *Salmonella*. As carcaças foram processadas e resfriadas por ar seco ($3,5 \text{ m s}^{-1}$, $-1,1 \text{ }^\circ\text{C}$, 150 min) ou por imersão em água gelada ($0,6 \text{ }^\circ\text{C}$, 50 min). No geral, ambos os métodos de resfriamento reduziram significativamente os níveis de bactérias nas carcaças, e nenhuma diferença no número de bactérias foi observada entre os dois métodos de resfriamento. Ambos os métodos de resfriamento obtiveram uma redução decimal da população microbiana entre 0,9 a 1,0 log, equivalentes a uma redução média de 90% da contagem de micro-organismos iniciais.

A partir de todas as constatações, Blevins (2017) afirma que as unidades processadoras devem se concentrar em reduzir a contaminação microbiana antes do sistema de resfriamento, bem como a recontaminação pós-resfriamento. Mais pesquisas são necessárias no que diz respeito aos primeiros parâmetros de processamento e manejo e aos efeitos microbiológicos gerais que podem ocorrer posteriormente ao período de pós-resfriamento.

De acordo com Carciofi (2005), outros fatores que podem dificultar uma maior eficiência do processo é a irregularidade da matéria-prima com relação à massa e às dimensões das carcaças, uma vez que as aves abatidas pelos frigoríficos são originárias de várias granjas, possuem sexos diferentes, apresentam diferenças genéticas e de ambiente. Embora exista um grande esforço para minimizar a variabilidade no tamanho das carcaças, em um mesmo turno podem ocorrer muitas mudanças de lote, acarretando variações importantes na massa média dos frangos. Todos estes fatores influenciam na transferência de calor e na absorção de água final obtidos após o sistema de pré-resfriamento.

Sant'anna (2008) analisou a influência das principais variáveis em *chiller* industrial sob imersão em água e gelo durante a rotina normal de um abatedouro. Monitorou-se a massa e a temperatura das carcaças no início e no final do resfriamento, o tempo total de resfriamento, a vazão de ar comprimido injetado no sistema e as temperaturas no início e do fim dos tanques. A análise estatística dos dados obtida pelo autor mostra que a absorção de água pela carcaça de frango é influenciada significativamente (em um intervalo de confiança de 90%) pela massa inicial da carcaça, pela vazão de ar injetado no sistema e pela temperatura no final do *chiller*. Já para a temperatura final da carcaça de frango, os parâmetros significativos (nível de confiança de 95%) do processo foram massa inicial da carcaça, o tempo total de resfriamento, a vazão de ar comprimido e a temperatura do *chiller* (tanto no início quanto no final do tanque).

Outro aspecto importante a se destacar diz respeito aos custos operacionais e energéticos presentes nos métodos de resfriamento de carcaças de frango utilizados na indústria. Segundo James et al. (2006), quando somente custos energéticos são considerados, o custo do resfriamento imerso com água fria em contra fluxo é 1/5 do método por ar forçado (método onde as carcaças são resfriadas somente através da passagem por câmara com ar em baixas temperaturas a determinada velocidade tal que aumente o coeficiente convectivo de transferência de calor da carcaça com o meio). Entretanto, quando os custos com a água utilizada na produção e as águas residuais são incluídos, os custos operacionais do processo imerso são 50 % maiores do que para os demais processos tecnológicos, como o sistema em ar forçado. Nesse sentido, é importante confrontar o cenário de disponibilidade dos recursos

disponíveis com os principais parâmetros do processo a fim de se obter sistemas cada vez mais otimizados.

3.4 Normas e legislações pertinentes para a segurança de alimentos

No processo industrial brasileiro de abate de aves, a Portaria nº 210/1998 (BRASIL, 1998) estabelece que a “temperatura das carcaças deve ser igual ou inferior a 7 °C no final da etapa de pré-resfriamento, tolerando-se temperatura até 10 °C desde que encaminhadas imediatamente ao congelamento.” (BRASIL, 1998). Por outro lado, o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) exige que as carcaças de frango sejam resfriadas a 4 °C ou menos em 4, 6 ou 8 horas para carcaças com peso inferior a 4 libras, 4 a 8 libras e mais de 8 libras, respectivamente (YOUNG; SMITH, 2004), assim como regulamentações da Europa e da República Popular da China, estas últimas sem requisitos de tempo de imersão. Em todos casos, a temperatura interna deve ser medida na seção intramuscular, uma vez que foi identificada como a parte da carne que possui a menor velocidade de resfriamento. Para que as agroindústrias avícolas brasileiras possuam conformidade em seus processos de pré-resfriamento, algumas variáveis devem ser acompanhadas com base nos valores máximos permitidos pela legislação vigente, mostrados pelo

Quadro 1.

Sabe-se que, enquanto imersas no *pré-chiller* de resfriamento, as carcaças de frango irão perder calor por convecção para o meio, fazendo com que a taxa de transferência de calor torne-se cada vez menor devido à redução da temperatura da superfície da ave e, por conseguinte, diminuição da diferença de temperatura entre os meios (CARCIOFI, 2005). Nesse sentido, a Portaria nº 210/1998 (BRASIL, 1998) preconiza que as carcaças sejam destinadas a um tanque onde, para garantir a continuidade do processo de resfriamento, a temperatura da água deve ser, obrigatoriamente, inferior àquela do tanque anterior.

Quadro 1 - Parâmetros para controle do sistema de pré-resfriamento de carcaças de frango em resfriadores contínuos tipo rosca sem fim

Parâmetro	Descrição
Renovação de água gelada	Deverá ser constante durante os trabalhos e em sentido contrário à movimentação das carcaças (contracorrente), na proporção mínima de 1,5 litros por carcaça no primeiro estágio e 1,0 litro por carcaça no último estágio, para carcaças com peso não superior a 2,5 kg. Se existirem diversos <i>chillers</i> , a entrada e saída de água utilizada em cada tanque deve ser regulada de modo a diminuir progressivamente no sentido de movimento das carcaças. A água utilizada para encher os tanques ou estágios dos resfriadores por imersão pela primeira vez, não deve ser incluída nos cálculos destas quantidades. Todavia, o gelo adicionado ao sistema de pré-resfriamento por imersão deve ser considerado nos cálculos das quantidades definidas para renovação constante de água no sistema.
Recirculação de água	O reaproveitamento de água nos resfriadores contínuos por imersão poderá ser permitido desde que venha a apresentar novamente os padrões de potabilidade exigidos, após adequado tratamento.
Temperatura da água residente	A temperatura da água residente, medida nos pontos de entrada e saída das carcaças não deve ser superior a 16 °C e 4 °C, respectivamente, no primeiro e último estágio, observando-se o tempo máximo de permanência no <i>pré-chiller</i> de 30 minutos.
Temperatura da água do processo	A temperatura não deve ser superior a 4 °C.
Teor de absorção	O teor de absorção de água nas carcaças de frango submetidas ao pré-resfriamento não deve exceder 8 % de seus pesos após gotejamento. O gotejamento é destinado ao escoamento da água da carcaça decorrente da operação de pré-resfriamento. O gotejamento deverá ser realizado imediatamente após o pré-resfriamento, em equipamento de material inoxidável, dispendo de calha coletora de água de gotejamento, suspensa e disposta ao longo do transportador.
Higienização	Cada tanque do sistema de pré-resfriadores contínuos por imersão deve ser completamente esvaziado, limpo e desinfetado pelo menos nos intervalos dedicados à higienização pré-operacional.
Equipamentos de mensuração	Esse sistema obrigatoriamente deve dispor de equipamentos de mensuração que permitam o controle e registro constante da temperatura da água do tanque; nos pontos de entrada e saída as carcaças; do volume de água renovada no primeiro e último estágio do sistema (hidrômetro ou similar).
Teor de cloro livre	A água de renovação do sistema por imersão poderá ser hiperclorada, permitindo-se no máximo 5 ppm de cloro livre.

Fonte: Brasil, 1998; Brasil, 2019b.

De acordo com o

Quadro 1, nota-se também a usualidade da adição de cloro nos *chillers*, sendo o seu principal objetivo a intervenção contra agentes patogênicos. Para eficácia deste tratamento,

(UKIDWE, 2017) diz que o pH da água deve ser mantido entre 6,5 e 7 para garantia da eficácia antimicrobiana.

Em relação à taxa de renovação de água nas unidades industriais, seu valor é mensurado pelas leituras iniciais e finais dos hidrômetros correspondentes de cada *chiller*, juntamente com a quantidade de gelo adicional inserido em cada sistema, e o número de carcaças abatidas no intervalo de tempo da leitura. Para o consumo de gelo recomenda-se 0,25 a 0,34 kg de gelo por kg de carcaça (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Nos frigoríficos, é observado um consumo obrigatório de água nos tanques de pré-resfriamento de carcaça de frangos, o qual deve ser realizado numa taxa de consumo em relação ao número total de carcaças introduzidas no tanque. De acordo com a Portaria nº 210/1998 (BRASIL, 1998), os abatedouros frigoríficos devem obedecer um limite máximo de consumo de água de 30 litros por carcaça. Também de acordo com Brasil (1998), no sistema de pré-resfriamento por aspersão ou imersão por resfriadores contínuos, a água utilizada deve apresentar os padrões de potabilidade previstos em legislação, não sendo permitida a recirculação da mesma. O reaproveitamento da água nos pré-resfriadores contínuos por imersão só poderá ser permitido desde que venha a apresentar novamente os padrões de potabilidade exigidos, após adequado tratamento.

Devido às inúmeras variáveis do processo, nota-se a existência de diversos fatores que possam vir a afetar a temperatura das carcaças durante o pré-resfriamento. A temperatura e vazão da água de renovação dos resfriadores; o tempo de permanência das carcaças no *chiller*; a injeção de ar no sistema (borbulhamento); a taxa de absorção de água e a temperatura ambiente da sala de pré-resfriamento são alguns dos principais parâmetros críticos citados por diversos autores (CARCIOFI, 2005; KLASSEN, 2008; SANT'ANNA, 2008). De acordo com Klassen et al. (2009), a massa inicial e o sexo da ave; a velocidade de abate; a lavagem final das carcaças após evisceração e revisão; a temperatura inicial do frango no sistema e os pontos de adição e temperatura do gelo em conjunto com as variáveis ambientais, como temperatura e umidade do ar, e as variáveis do projeto, como espessuras e materiais de isolamento, também contribuem para o resultado final obtido. Para que o processo industrial seja efetivo, o sistema de controle da temperatura em carcaças de aves submetidas ao pré-resfriamento por imersão deve ser eficiente, sem margem a qualquer prejuízo na qualidade do produto final.

3.5 Parâmetros microbiológicos

A contaminação microbiológica de produtos de origem animal em abatedouros frigoríficos está intimamente associada à disponibilidade, a abundância e a qualidade do alimento durante manipulação e processamento. De acordo com Silva (2003), em condições favoráveis de crescimento, os micro-organismos podem alterar as características físicas e químicas da carne e causar a sua deterioração, podendo ser responsáveis por intoxicações e infecções alimentares.

Um dos principais fatores que afetam a estabilidade microbiana dos alimentos durante o processamento é a temperatura, cuja variação modifica a dinâmica do crescimento microbiano (LONGHI, 2012). Nesse sentido, tem-se previamente determinadas algumas etapas após o abate das aves a fim de auxílio na redução da contagem de micro-organismos na carcaça. De acordo com Backes (2013), dentre estas etapas destaca-se o processo de escaldagem; as lavagens realizadas após a retirada das penas das aves e após a evisceração e o sistema de pré-resfriamento.

Sabe-se que uma série de micro-organismos está correlacionada com o processamento de carnes simultaneamente, uma vez que o atual sistema de criação de frangos permite o contato direto das aves com suas fezes e outros materiais contaminados do criadouro. Assim, Backes (2013) afirma ser natural a presença de espécies de micro-organismos na pele e penas das aves, sendo esta contaminação considerada como microbiota natural desde que não afete a saúde animal.

Segundo Hayes (1995), para a inspeção rotineira de alimentos tem-se a prática de análise de bactérias cuja presença indica a possibilidade da presença de bactérias patogênicas e/ou produtoras de toxinfecções alimentares, denominadas micro-organismos indicadores.

Micro-organismos indicadores são grupos ou espécies de micro-organismos que, quando presentes em um alimento ou em um processo, podem fornecer informações sobre a ocorrência de contaminação fecal ou sobre a provável presença de patógenos/toxinas, além de poderem indicar condições sanitárias inadequadas durante o processamento, produção ou armazenamento (SILVA, 2003). Segundo a *International Commission on Microbiological Specifications for Foods* (ICMSF), estes micro-organismos podem ser alocados em grupo onde não oferece risco direto à saúde tal como contagem padrão de mesófilos e contagem de bolores e leveduras; ou em grupo com risco baixo ou indireto à saúde, representado pela contagem de coliformes totais, coliformes fecais, enterococos, enterobactérias totais e/ou *E. coli*, por

exemplo. Nesse sentido, a segurança e qualidade dos alimentos, inclusive da carne *in natura* e dos insumos utilizados, pode ser estimada pela contagem de micro-organismos aeróbios mesófilos, enterobactérias e *Escherichia coli*, grupos considerados como indicadores.

Acerca das bactérias mesófilas, Franco e Landgraf (2004) citam que estas constituem um grupo capaz de se multiplicar entre 10 °C e 45 °C, sendo 30 °C a temperatura ideal. Tal grupo tem sido um dos indicadores microbiológicos de qualidade dos alimentos mais comumente utilizados visto que inclui a maioria dos contaminantes dos alimentos de origem animal.

Em relação às enterobactérias, estas são pertencentes ao grupo dos coliformes fecais, restringindo-se aos membros capazes de fermentar lactose com produção de gás em 24 a 48 horas, 44,5 a 45,5 °C. (Silva et al., 1997). Quando efetuada esta análise, busca-se a determinação de coliformes de origem gastrointestinal, porém sabe-se que cepas de *Enterobacter* incluídas neste grupo também podem apresentar origem não fecal (água, solo, vegetais). Como forma de determinar bactérias reconhecidamente de origem fecal, faz-se uso da análise para o gênero *Escherichia coli*, sendo esta bactéria o melhor indicador de contaminação fecal até o momento (Silva et al., 1997). Sua presença em alimentos crus pode ocorrer devido à falta de higiene pessoal dos manipuladores, falhas no processo de evisceração das carcaças de frango (de forma a romper o trato gastrointestinal), baixa efetividade na cloração do sistema de pré-resfriamento; águas poluídas e esgoto.

Com base nas exigências normativas nacionais (Resolução nº 331/2019 complementada pela Instrução Normativa nº 60/2019 da ANVISA), em relação aos micro-organismos indicadores, os únicos padrões definidos para carne de aves *in natura* são para *E. coli* e aeróbios mesófilos, com contagem máxima estabelecida em $5 \cdot 10^3$ UFC g⁻¹ e 10^6 UFC g⁻¹, respectivamente, considerando um plano de amostragem de três classes (BRASIL, 2019a).

Para validação dos resultados microbiológicos dos processos associados à redução microbiológica dos alimentos, a Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos (ABIHPEC) introduziu o conceito de Redução Decimal (RD) da população microbiana ocorrida ao longo do tempo de contato do inóculo com a amostra, dada pela seguinte fórmula:

$$RD = \log \frac{N_0}{N_t} \quad (1)$$

Onde RD é a Redução Decimal, N_0 a contagem média inicial do micro-organismo alvo em UFC g^{-1} e N_t a contagem média final obtida a partir de um tempo de contato pré-estabelecido com a amostra em UFC g^{-1} . Uma vez calculada a RD , é possível obter a Porcentagem de Redução (PR) através da equação:

$$PR = 100 \left(1 - \frac{1}{10^{RD}} \right) \quad (2)$$

Para fins científicos, entretanto, considera-se a Redução Decimal para designar a redução de população microbiana, onde RD igual a 1 equivale a 90% de PR , RD igual a 2 equivale a 99% de PR e assim sucessivamente (ABIHPEC, 2019).

Nos trabalhos já desenvolvidos, Svobodová et al. (2012), a partir do cálculo da variação na contagem microbiológica em diferentes etapas do processo de abate de frangos, observaram redução de 1 log UFC g^{-1} na contagem de mesófilos aeróbios e 2 log UFC g^{-1} na contagem de *E. coli* após as etapas de lavagem e resfriamento por imersão das carcaças. Todavia, segundo Northcutt et al. (2003), é importante ressaltar que as contagens de coliformes totais e mesófilos aeróbios podem apresentar elevadas variações entre estabelecimentos. Isso ocorre principalmente devido a diferença dos lotes abatidos, submetidos a diferentes manejos pré-abate.

3.6 Recursos materiais e energéticos no setor industrial

A água é um elemento essencial para a manutenção da vida. Além da sua importante função no organismo dos seres vivos, pode-se observar ainda diversas funções da água no processo produtivo, tais como matéria-prima e reagentes; solventes de substâncias sólidas, líquidas e gasosas; lavagem e retenção de materiais contidos em misturas; veículo de suspensão; e operações envolvendo transmissão de calor. A demanda de água na indústria reflete o tipo de produto ou serviço que está sendo produzido e os processos industriais associados, assim como tecnologias empregadas, boas práticas e maturidade da gestão (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2017).

De acordo com o *World Water Assessment Programme* (WWAP), o uso da água aumenta em âmbito mundial, em função do crescimento populacional, do desenvolvimento

econômico e das mudanças nos padrões de consumo. Segundo dados da Agência Nacional das Águas (ANA), nacionalmente, os setores mais expressivos em 2017, totalizando cerca de 60% do valor da produção industrial total, foram: alimentos e bebidas (21 %), derivados de petróleo e biocombustíveis (11 %), químicos (10 %), veículos automotores (9 %) e metalurgia (6 %). Para consideração do consumo de recursos hídricos, a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) apontou que, dentre as empresas, o grupo “abate e fabricação de produtos de carne” está entre os cinco principais responsáveis por 65 % da demanda de retirada para irrigação no País e 83 % da demanda de consumo (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2017).

Dados do *World Water Assessment Programme* (2018) apontam que a demanda mundial para a produção agrícola e energética (principalmente alimentos e eletricidade), ambas atividades que envolvem uso intensivo de água, deve crescer por volta de 60 % e 80 %, respectivamente, até 2025. Sob as práticas de gestão predominantes, o *World Water Assessment Programme* (2018) diz que esses fatores, associados aos sistemas alimentares, respondem por 70 % da estimada perda da biodiversidade terrestre até 2050. Todavia, esses impactos podem ser amplamente evitados se a intensificação da produção tiver como base uma intensificação ecológica que envolva o aperfeiçoamento dos serviços ecossistêmicos para reduzir os insumos externos.

Problemas com o fornecimento de água doce e com a qualidade da água são de importância imediata e fundamental. Com a diminuição de oferta de água nos mananciais superficiais e subterrâneos, torna-se importante buscar meios para a conservação e minimização do seu consumo (CASANI; ROUHANY; KNØCHEL, 2005). Do mesmo modo, as nações devem exercer um gerenciamento mais eficiente desse recurso, introduzir a reciclagem e prevenir a poluição (GERLOFF, 2008). De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação/ *World Health Organization* (FAO/WHO), “a escassez futura de água tenderá a limitar o crescimento na agricultura e indústria e poderá colocar em risco a saúde, a nutrição e o desenvolvimento econômico.” (FAO/WHO, 2003).

Segundo a Agência Nacional das Águas (2017), a preocupação com a eficiência no uso da água vem ocupando lugar de destaque nas estratégias competitivas das indústrias nacionais, especialmente daquelas que utilizam este recurso mais intensivamente, como o setor de carne. Dentre os principais meios de se obter resultados frente à diminuição de escassez hídrica, empresas vem adotando táticas de reaproveitamento de água industrial. De acordo com Casani, Rouhany e Knøchel (2005), a recirculação de água tomou corpo na década de 1970, fazendo

com que em países como o Japão e Alemanha Ocidental, o consumo de água industrial não tenha crescido, mesmo com o aumento no número de indústrias. Os autores também expõem que, com esta técnica, as indústrias siderúrgicas americanas que consumiam 280 toneladas de água para cada tonelada de aço fabricado, hoje utilizam apenas 14 toneladas de água, sendo o restante proveniente de recirculação. Logo, deve-se considerar o reuso de água como parte de uma atividade mais abrangente, que é o uso racional da água, o qual compreende também o controle de perdas e desperdícios, e a minimização da produção de efluentes (GERLOFF, 2008).

Quanto ao uso de águas residuárias em indústrias alimentícias, a Portaria n° 326/1997/SVS/MS (BRASIL, 1997), da Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde, estabelece que água recirculada, para ser reutilizada dentro de um estabelecimento, deve ser tratada e mantida em condições tais que seu uso não represente um risco para a saúde. Por outro lado, a água recirculada que não tenha recebido tratamento posterior pode ser utilizada nas condições em que o seu emprego não constitua um risco para saúde e nem contamine a matéria-prima nem o produto final (BRASIL, 1997).

Em relação às indústrias de abate e processamento de frangos, principalmente no que diz respeito aos sistemas de pré-resfriamento, Riella e Gerllof (2009) asseguraram a viabilidade técnica de se reutilizar a água do *chiller* com reintrodução direta da água descartada pelo sistema de resfriamento de carcaças de um frigorífico com velocidade de linha de aproximadamente 16 mil kg de carcaça por hora, temperatura do *pré-chiller* e *chiller* de 5,24 °C e 2,8 °C, respectivamente, e temperatura final da carcaça de 3,0 °C. As etapas do processo de tratamento das águas residuárias envolvem o emprego de uma micropeneira, seguido de um tratamento coagulação-floculação para atendimento aos padrões físico-químicos e um tratamento com lâmpada ultravioleta para atendimento aos padrões microbiológicos associado à adição de cloro suficiente para atender aos requisitos normativos e promover o efeito residual germicida.

A água de descarte dos *chillers* de pré-resfriamento por imersão também foi objeto de estudo de Teixeira (2014). A autora afirma que a utilização desta água em processos que exigem sua passagem em um trocador de calor torna-se inviável sem que antes seja feita a separação dos resíduos. Para um abatedouro com capacidade de abate de 172,380 aves por dia e peso médio de 2,6 kg, esta separação foi obtida utilizando uma peneira rotativa com capacidade de 25 m³ por hora, uma malha de 0,5 mm e um sistema autolimpante, com acionamento automático conforme necessidade (TEIXEIRA, 2014).

De acordo com Riella e Gerllof (2009), nota-se que as indústrias já estão comprometidas com processos de redução de custos com uso da água e de energia. Como já estão sendo criados meios legais de responsabilizá-las pelo consumo de água acima da disponibilidade natural, cabe aos engenheiros e empresários se preocuparem com o uso indiscriminado da água e da energia empregada.

3.6.1 Análise de recursos materiais e energéticos em sistemas de pré-resfriamento de carcaças de frango por imersão

A caracterização dos parâmetros do processo de transferência de calor em sistemas de pré-resfriamento de carcaças de frango tem sido estudada ao longo de muitos anos. De acordo com Klassen (2008), o objetivo comum destes estudos é desenvolver um método simples de predição, que requeira uma quantidade mínima de dados. Entretanto, são raros os trabalhos publicados modelando o resfriamento de carcaças de frango, principalmente devido a uma geometria não definida e da sua não homogeneidade, caracterizada pela presença de cartilagem, ossos, pele, músculo, entre outras partes inerentes da carcaça.

Para um conjunto de *chillers* em série, uma boa aproximação do gasto energético necessário para resfriar as carcaças de frango até temperaturas aceitáveis previstas em legislação dar-se-á com base em conceitos fundamentais da calorimetria. Segundo Sanchez e Bona (2014), a remoção do calor sensível da carcaça de frango ocorrerá por meio do fluxo de água gelada (calor sensível da água) e da quantidade de gelo (calor latente de fusão) adicionado ao sistema, e a carga térmica deverá atender as variações ocorridas durante o processo (velocidade de abate e peso das carcaças). Para o balanço energético, estudos efetuados por Passarelli (2017) consideram que, para um sistema de pré-resfriamento de carcaças de frango operando em regime permanente, a estimativa da carga térmica requerida pela fonte fria para o pré-resfriamento (\dot{q}_{req}) pode ser dada como:

$$\dot{q}_{req} = \dot{q}_{sistema} + \dot{q}_{ar\ comp} + \dot{q}_{cond} \quad (3)$$

Em que \dot{q}_{cond} é a taxa térmica fornecida ao meio pelas carcaças de frango, $\dot{q}_{ar\ comp}$ a taxa térmica transferida pelo sistema de borbulhamento (ar comprimido) e $\dot{q}_{sistema}$ a taxa térmica transferida pelo sistema de resfriamento, em kJ h^{-1} .

Para a mensuração da quantidade de calor transferida pela carcaça, e a considerando como um meio sólido, com propriedades uniformes e constantes e com baixa resistência térmica a condução interna (de modo que a temperatura em qualquer ponto da carcaça pode ser considerada uniforme) tem-se que:

$$\dot{q}_{cond} = \dot{m}c_p(T_e - T_s) \quad (4)$$

Em que \dot{m} se refere à vazão mássica da carcaça, em kg h^{-1} , c_p o calor específico da carcaça de frango em $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e T_e e T_s a temperatura de entrada e saída da carcaça do resfriador em estudo, respectivamente, em $^\circ\text{C}$. Neves Filho (1978) diz que, para modelagens considerando parâmetros constantes, uma boa aproximação para c_p é o valor de $3,34 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. A vazão mássica de carcaças, por sua vez, pode ser calculada através do volume de abate, v_{abate} , em carcaças h^{-1} , e pelo peso médio da carcaça (em kg carcaça^{-1}), \bar{p} , dado por:

$$\dot{m} = v_{abate}\bar{p} \quad (5)$$

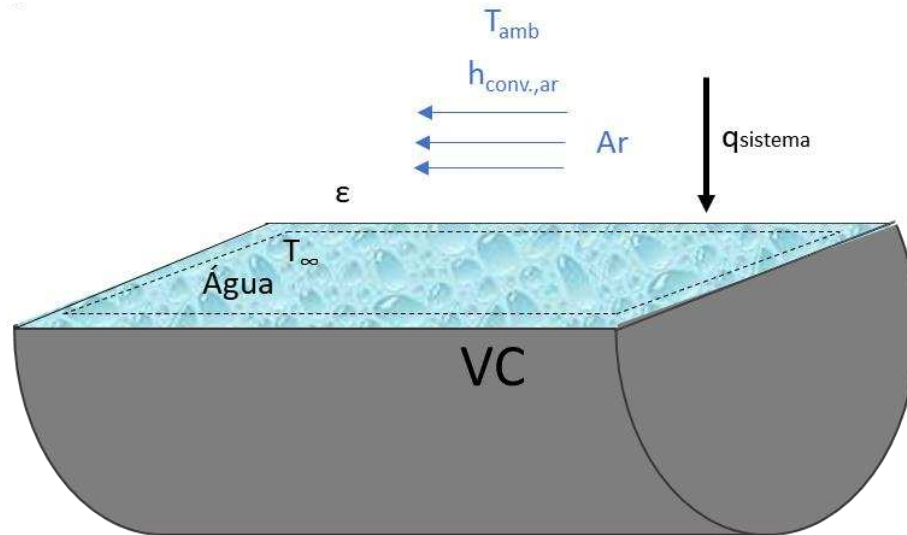
Para predição da energia térmica transferida pelo sistema de borbulhamento ($\dot{q}_{ar\ comp}$), considera-se que:

$$\dot{q}_{ar\ comp} = \dot{v}_{ar}\rho_{ar}h_{ar} \quad (6)$$

Onde \dot{v}_{ar} é a vazão de ar comprimido no sistema em $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$; ρ_{ar} e h_{ar} a densidade e a entalpia do ar comprimido em kg m^{-3} e kJ kg^{-1} , respectivamente, de acordo com a temperatura e pressão de descarga dos compressores utilizados.

A carga térmica do sistema ($\dot{q}_{sistema}$), por sua vez, pode ser obtida através de um balanço de energia em cada resfriador, conforme representado pela Figura 6:

Figura 6 - Desenho esquemático para balanço de energia no resfriador



Para o volume de controle (VC) representado na Figura 6, tem-se que $\dot{q}_{sistema}$ poderá ser expresso por:

$$\dot{q}_{sistema} = UA(T_{amb} - T_{\infty}) \quad (7)$$

Onde U é o coeficiente global de transferência de calor em $\text{kW m}^{-2} \text{K}^{-1}$, A a área superficial do resfriador em m^2 , T_{amb} a temperatura ambiente e T_{∞} a temperatura da água residente no *chiller*, em Kelvin. Em situações de transferência de calor conforme desenho esquemático na Figura 6, o conceito de coeficiente global de transferência de calor (U) é apresentado como uma maneira de sistematizar as diferentes resistências térmicas equivalentes existentes em um processo de troca de calor entre diferentes correntes de fluido e superfícies divisoras. Considerando que este sistema (resfriador e meio) se encontrem em regime permanente, com propriedades constantes, e sistema unidimensional, o coeficiente global de transferência de calor pode ser obtido pela seguinte equação:

$$UA = \frac{1}{R_{tot}} \quad (8)$$

Onde R_{tot} representa a resistência térmica total do volume de controle em K kW^{-1} . Estabelecendo-se que:

- a resistência à transferência de calor por condução nas paredes dos resfriadores seja desprezível devido às suas pequenas espessuras (aproximadamente 1 cm) e alta condutividade térmica do aço inox;
- as resistências de contato são desprezíveis;
- o sistema de borbulho assim como a entrada de água de recirculação promovem uma mistura perfeita da água dentro do resfriador de modo que a temperatura seja constante e igual à T_{∞} no seu interior, assim como a inexistência de gradiente de temperatura entre a água e a superfície interna, fazendo com que a superfície interna do resfriador encontra-se mantida a quase a mesma temperatura que T_{∞} ;
- a transferência de calor tanto por radiação quanto por convecção ocorrem predominantemente na superfície dos resfriadores devido *layout* da sala;

Logo, a energia transferida do sistema para a água no tanque pode ser considerada como consequência do fluxo de calor convectivo e radiativo na superfície do *chiller* em contato com o ar, em um sistema unidimensional, dada por:

$$R_{tot} = \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{conv,ar}A'}} + \frac{1}{\frac{1}{h_{rad}A'}} \right)^{-1} \quad (9)$$

Onde $h_{conv,ar}$ é o coeficiente de transferência de calor convectivo do ar, h_{rad} o coeficiente de transferência de calor por radiação, ambos em $\text{kW m}^2 \text{K}^{-1}$ e A' a área de troca térmica, em m^2 .

De acordo com Incropera et al, (2008), h_{rad} pode ser representado como:

$$h_{rad} = \sigma \varepsilon (T_{amb} + T_{\infty})(T_{amb}^2 + T_{\infty}^2) \quad (10)$$

Em que σ representa a constante de Stefan-Boltzmann ($5,676 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^2 \text{K}^{-4}$); ε a emissividade da superfície da água e T_{amb} e T_{∞} são a temperatura ambiente e a temperatura da água no *chiller* em Kelvin, respectivamente.

Uma vez que o movimento do ar na sala de pré-resfriamento é ocasionado somente por forças de empuxo no seu interior (convecção natural), de acordo com Incropera et al. (2008),

para o adequado cálculo do coeficiente de transferência de calor convectivo, tem-se a seguinte correlação empírica para o cálculo de $h_{conv,ar}$:

$$\overline{Nu}_L = \frac{h_{conv,ar}L}{k} = C Ra_L^n \quad (11)$$

Onde \overline{Nu}_L é o número de Nusselt, L a razão entre a área superficial e o perímetro do volume de controle considerado, em metros, e k a condutividade térmica do ar em $W\ m^{-2}\ K^{-1}$. Na outra parcela, tem-se o número de Rayleigh (Ra_L) e C e n como constantes da equação. Considerando que a transferência de calor convectivo se dá predominantemente na superfície horizontal plana do resfriador, o valor de Ra_L pode ser obtido por:

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (12)$$

Em que g é a aceleração local devida à gravidade em $m\ s^{-2}$, T_s e T_∞ a temperatura absoluta da superfície do resfriador e a temperatura ambiente, respectivamente; L a razão entre a área superficial e perímetro da superfície do resfriador, em metros, β o coeficiente de expansão volumétrica térmica, no qual, considerando o ar como um gás ideal, corresponderá ao inverso de T_s ; ν a viscosidade cinemática e α a difusividade térmica, ambas em $m^2\ s^{-1}$. Todas as variáveis são mensuradas nas condições de temperatura e pressão do filme, obtido pela média dos valores de T_s e T_∞ .

De acordo com a literatura, adota-se, para o cálculo de \overline{Nu}_L , o valor de n igual à $1/4$ para escoamentos laminares. A partir da equação 11 e conforme Figura 6, considera-se, para escoamentos movidos na superfície superior de uma placa fria, que (INCROPERA et al., 2008):

$$\overline{Nu}_L = 0,27 Ra_L^{1/4} \quad (10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}) \quad (13)$$

Logo, o valor do coeficiente de calor convectivo do ar pode ser obtido através do cálculo das equações 11, 12 e 13. Após calculada a carga térmica do sistema e estimada a carga térmica requerida pela fonte fria, tem-se que a variação de temperatura total requerida pela água de renovação ($\Delta T_{req(renov)}$) é igual a:

$$\Delta T_{req(renov)} = \frac{\dot{q}_{req}}{m_{\acute{a}gua} cp_{\acute{a}gua}} \quad (14)$$

Onde a $m_{\acute{a}gua}$ será igual à vazão total de renovação de água no sistema em kg h^{-1} e $cp_{\acute{a}gua}$ o calor específico da água nas condições de temperatura e pressão de trabalho, em $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Todavia, em sistemas industriais de resfriamento de carcaças, apenas a água de renovação não consegue suprir a demanda energética das fontes quentes. Considerando que a variação de temperatura que a água de renovação consegue suprir, $\Delta T_{sup(renov)}$ é igual à diferença entre a temperatura máxima do *chiller* em análise e a temperatura da água de renovação de, a demanda energética da fonte fria adicional a ser inserida no sistema (Q_{adic}), em kJ h^{-1} , será:

$$Q_{adic} = m_{\acute{a}gua} cp_{\acute{a}gua} (\Delta T_{req(renov)} - \Delta T_{sup(renov)}) \quad (15)$$

Desta forma, a vazão de gelo (m_{gelo}), em kg h^{-1} , a ser adicionada no sistema de pré-resfriamento será igual à:

$$m_{gelo} = \frac{Q_{adic}}{\lambda_{fusão}} \quad (16)$$

Sendo $\lambda_{fusão}$ o calor latente de fusão do gelo em kJ kg^{-1} . O entendimento e conhecimento das grandezas correspondentes aos insumos utilizados para o alcance da temperatura intramuscular das carcaças de frango são de suma importância, podendo estes serem afetados pelos mais variados fatores característicos dos próprios equipamentos utilizados (volume, potência, etc) quanto da carcaça a ser resfriada (peso médio, temperatura inicial, densidade, etc). Logo, torna-se imprescindível a atuação sobre o comportamento da transferência simultânea de calor e massa para a melhoria do processo de resfriamento no setor frigorífico.

3.7 Exergia

Para uma identificação assertiva das perdas de qualidade de energia em um processo ou do uso ineficiente dos insumos, torna-se necessária, além da análise baseada na quantificação energética (Primeira Lei da Termodinâmica), a quantificação exérgica (Segunda Lei da Termodinâmica) envolvida no sistema uma vez que para cada tipo de transferência de energia há uma transferência de exergia correspondente. De acordo com Fábrega (2010), “a exergia é definida como a quantidade máxima de trabalho que um sistema pode desenvolver quando é trazido para um estado de equilíbrio termodinâmico com o ambiente (estado de referência)”. Logo, verifica-se que a exergia não representa o trabalho teórico que um equipamento fornecerá após instalado, mas sim “um limite superior da quantidade de trabalho que um dispositivo irá fornecer sem violar nenhuma lei da termodinâmica” (FÁBREGA, 2010).

De acordo com os pressupostos da Segunda Lei da Termodinâmica, tem-se que todos os processos reais são irreversíveis, o que implica em não conservação da grandeza exergia. Nesse sentido, a exergia destruída representa a real degradação de energia e que não pode ser identificada através de um balanço energético. Conforme abordado por Fábrega (2010), a principal função da análise exérgica é encontrar as causas das perdas de qualidade da energia dos processos térmicos e estimar a sua magnitude.

Segundo Moran et al, (2007), a exergia pode ser desmembrada em componentes física, química, potencial e cinética. A exergia física corresponde ao máximo trabalho teórico que pode ser obtido de um sistema ao sair de seu estado inicial e atingir um estado de equilíbrio mecânico e térmico com o ambiente em condições específicas. As componentes cinética e potencial estão relacionadas à posição e à movimentação do sistema e a exergia química é considerada para casos em que haja reações químicas ou mudanças de composição. Na maioria dos trabalhos desenvolvidos na literatura em sistema de refrigeração, considera-se apenas a componente física da exergia, visto que o processo em estudo não apresenta movimento nem mudança de posição com relação ao ambiente e nem apresenta reações químicas, mudanças de composição e variação de temperatura e pressão. Logo, a exergia (E_x), em kJ kg^{-1} , é representada como sendo:

$$E_x = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (17)$$

Em que h e s correspondem à entalpia e à entropia da corrente nas condições de operação em kJ kg^{-1} e $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$, respectivamente; e T_0 , h_0 e s_0 correspondem às condições de temperatura absoluta, entalpia e entropia nas condições do estado de referência do ambiente.

Para análise de um volume de controle específico (VC), tem-se que o balanço exerético completo em relação ao tempo é dado por:

$$\frac{dE_x}{dt} = \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) Q_j - \left(W_{VC} - P_0 \frac{dV_{VC}}{dt}\right) + \left(\sum_{i=1}^k m_i E_{xi}\right)_e - \left(\sum_{i=1}^k m_i E_{xi}\right)_s - E_{xD} \quad (18)$$

Na qual, segundo Fábrega (2010):

- A 1ª parcela $\frac{dE_x}{dt}$ se refere à taxa de variação da exergia com o tempo;
- A 2ª parcela $\sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) Q_j$ é igual ao somatório da transferência de exergia associada com a transferência de calor (Q_j) com o tempo de n fontes de calor disponíveis em um ponto j na superfície do volume de controle;
- A 3ª parcela $\left(W_{VC} - P_0 \frac{dV_{VC}}{dt}\right)$ representa o fluxo de transferência de exergia relacionado ao trabalho e à taxa de alteração do volume com o tempo, respectivamente;
- A 4ª parcela $\left(\sum_{i=1}^k m_i E_{xi}\right)_e$ se refere ao somatório de exergia relacionado ao fluxo de massa na entrada (m_{ie}) do sistema de k fluxos presentes;
- A 5ª parcela $\left(\sum_{i=1}^k m_i E_{xi}\right)_s$ se refere ao somatório de exergia relacionado ao fluxo de massa na saída (m_{is}) do sistema de k fluxos presentes;
- A 6ª e última parcela, E_{xD} , está associada à taxa de exergia destruída devido às irreversibilidades do sistema.

Ao considerar processos operando em estado estacionário, e com trabalho do eixo desprezível, a quantidade de exergia destruída (E_{xD}), em kJ h^{-1} , pode ser calculada pela equação:

$$E_{xD} = \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_j} Q_j\right) - (W_{VC}) + \left(\sum_{i=1}^m m_i E_{xi}\right)_e - \left(\sum_{i=1}^m m_i E_{xi}\right)_s \quad (19)$$

A perda de exergia, ou irreversibilidade, fornece uma medida quantitativa geral da distribuição de ineficiências do processo, sendo o balanço exerético em tela aplicável para

análise individual dos componentes ou para o sistema de pré-resfriamento como um todo. A importância da sua análise se dá devido à informação do quanto de potencial de trabalho útil fornecido como uma entrada para o sistema sob consideração, foi consumido/perdido no processo.

Segundo Kotas (1995), outra variável importante para análise de sistemas térmicos é a eficiência exérgica (ε), visto que promove a indicação do quanto um componente se aproxima da operação reversível. A eficiência exérgica pode ser dada por:

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_{prod}}{\dot{E}_{comb}} \quad (20)$$

Onde \dot{E}_{comb} corresponde à exergia atribuída ao combustível e \dot{E}_{prod} à exergia atribuída aos produtos de um sistema ou subsistema. Nesse sentido, para compressores e trocadores de calor, a eficiência energética pode ser também representada, respectivamente, por (FÁBREGA, 2010):

$$\varepsilon_{comp} = \frac{(\sum_{i=1}^m \dot{m}_i Ex_i)_e - (\sum_{i=1}^m \dot{m}_i Ex_i)_s}{\dot{W}_i} \quad (21)$$

$$\varepsilon_{TC} = \frac{(\dot{m}_s Ex_s - \dot{m}_e Ex_e)_{corrente\ fria}}{(\dot{m}_e Ex_e - \dot{m}_s Ex_s)_{corrente\ quente}} \quad (22)$$

Importante ressaltar que as eficiências são mais significativas quando calculadas pela análise exérgica ao invés da análise energética, por representarem melhor a proximidade a um processo real.

De acordo com Zisopoulos et al. (2017), o número de publicações da indústria de alimentos relacionado com estudos exérgicos em relação ao número total de publicações ainda é pequeno, indicando a necessidade de identificar questões de pesquisas relevantes que possam associar melhor a exergia à ciência e tecnologia de alimentos. A maioria das publicações relacionadas aos processos alimentares que usam a exergia concentram-se em tecnologias de secagem (66%), seguidas pelos processos de aquecimento/pasteurização (6%).

Entre os estudos na área de produtos de origem animal, Tiwari et al. (2009) desenvolveram uma expressão analítica para o cálculo da eficiência exérgica durante secagem de camarão em estufa sob convecção natural e forçada, demonstrando que as eficiências no

âmbito da exergia foram menores do que as eficiências energéticas correspondentes, conforme esperado.

Ainda acerca o grupo de pescados, Quijera et al. (2013) apresentaram um procedimento metodológico para a análise de diferentes opções de integração de calor de uma tecnologia solar térmica e de bomba de calor em um processo de conserva de atum. A análise de exergia foi aplicada no contexto de temperaturas baixas e médias, onde o processo exige grandes quantidades de água quente e pressão média de vapor. A análise exérgica desenvolvida permitiu quantificar a variação pela qual a qualidade de energia sofre enquanto é usada no processo. A variável, em combinação com variáveis econômicas, forneceu um poderoso procedimento para análise da integração de calor mais favorável e auxílio nas tomadas de decisões tecnológicas.

Com relação à indústria de lácteos, Erbay et al. (2014) utilizaram dados de eficiência de exergia para otimização do processo de secagem do pó de queijo branco produzido usando um secador por *spray* em escala piloto. As condições operacionais ideais foram encontradas com uma temperatura de secagem na entrada de 174 °C, pressão de atomização de 354 kPa e uma temperatura de secagem na saída de 68 °C, obtendo uma eficiência exérgica de 4,81%.

No âmbito de carnes, Liu et al. (2008) desenvolveram um modelo matemático para análise de perda de exergia das etapas de um processo de liofilização (processo de desidratação onde o produto é congelado sob vácuo e o gelo formado, sublimado) para carne bovina. Os resultados mostraram que as perdas de exergia do processo de secagem podem ser notavelmente reduzidas aumentando a temperatura da fonte de resfriamento do condensador de vapor, desde que as condições da dinâmica de secagem sejam satisfeitas durante a secagem.

Verifica-se, portanto, que o método da análise de exergia é particularmente apropriado para maximizar o objetivo de um uso mais eficiente de energia, nas quais estas informações podem ser utilizadas no projeto de sistemas térmicos, mas também na indicação de esforços para a redução de fontes de ineficiências em sistemas já construídos e na avaliação do custo de sistemas (FÁBREGA, 2010). No presente trabalho, será realizada a análise exérgica do *layout* de sistema de pré-resfriamento utilizado para produzir carcaças de frango resfriadas, procurando identificar destruições exérgicas inerentes de cada componente do processo, analisando-se procedimentos de redução das perdas de exergia provenientes das transformações de energia do sistema.

3.8 Análise Exergoeconômica

Uma vez que a exergia é a única base racional para a avaliação dos custos monetários de um sistema com as fontes de ineficiências termodinâmicas, foi elaborado, por Tsatsaronis (1993), o conceito de exergoeconomia. A exergoeconomia é a área da engenharia que combina apropriadamente, ao nível dos componentes de um sistema, cálculos termodinâmicos baseados na análise exérgica com princípios econômicos, de maneira a obter um sistema que cumpra sua função a um baixo custo e com uma eficiência tal que se possa economizar energia.

Na determinação do fluxo de custo exergoeconômico, a equação de balanço será igual a zero uma vez que este custo já corresponde à exergia mais a destruição devido às irreversibilidades. O custo exergoeconômico de um fluxo, por sua vez, é formado por uma primeira parcela que corresponde ao custo monetário da exergia de entrada necessária para produzir tal fluxo aliado aos custos originários do próprio processo produtivo (capital, operação e manutenção) dado pelo fator exergoeconômico Z , e por uma segunda parcela correspondente ao custo exergoeconômico dos produtos, em US\$ h⁻¹:

$$\dot{C}_{comb} + Z = \dot{C}_{prod} \quad (23)$$

No qual o custo total das correntes de exergia de saída é igual ao gasto total para obter estas correntes. Assim, o balanço de custos para um sistema com fluxos de massa, transferência de calor e realização de trabalho também pode ser expresso por;

$$\sum_i \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{q,k} + Z_k = \sum_e \dot{C}_{s,k} + \dot{C}_{W,k} \quad (24)$$

Onde o custo exergoeconômico C_i (US\$ h⁻¹) é dado por:

$$C_i = c_i E_{xi} \dot{m}_{xi} \quad (25)$$

Em que c_i é o custo exergoeconômico específico, em US\$ kJ⁻¹, E_{xi} a exergia da corrente e \dot{m}_{xi} a sua vazão mássica em kJ kg⁻¹ e kg h⁻¹, respectivamente. Conforme apresentado, os custos exérgico (E_{xi}) e exergoeconômico (C) são quantidades conservativas, como

consequência de suas definições, e pode-se, portanto, escrever uma equação de balanço para cada unidade do sistema. Conforme realizado por Fábrega (2010), para sistemas existentes, em que o custo de capital de investimento e o capital de manutenção e operação são zero, o fator exergoeconômico é zero.

Na existência de um número de correntes exergéticas maior do que o número de equipamentos e não conhecimento dos seus custos monetários associados, repute-se a necessidade de adoção de métodos exergoeconômicos para a associação dos custos de um sistema térmico com a sua vizinhança e fonte de irreversibilidades. Diversos métodos exergoeconômicos são estudados e aplicados, tais como o método SPECO (*Specific Exergy Costing*), proposto por Lazarreto e Tsatsaronis (2002), e o método da Teoria do Custo Exergético (TCE), proposto por Lozano et al, (1993), os quais promovem a alocação de custos e a determinação de equações auxiliares estabelecidas em cada metodologia em questão.

Na indústria frigorífica e de alimentos em geral, tem-se verificado o aumento de estudos relacionados à avaliação exergoeconômica dos sistemas de geração de energia. Dentre os trabalhos desenvolvidos, Takaki (2006) analisou a possibilidade de utilização de gás natural como combustível em uma planta de um frigorífico bovino em substituição aos combustíveis como a lenha e o óleo. Foram realizadas avaliações de desempenho a partir de análises energéticas e exergéticas para as configurações propostas, assim como uma análise exergoeconômica através da Teoria do Custo Exergético. As análises permitiram verificar a configuração que proporcionaria menor investimento líquido anual para atender as necessidades de abate do frigorífico em questão, mostrando que, entre as plantas de refrigeração, o sistema de compressão é mais viável do que o sistema por absorção para a aplicação em frigoríficos, além de verificar a viabilidade da utilização de gás natural como combustível.

Silva (2009) comparou sistemas energéticos agropecuários através da contabilidade em energia, termoeconomia e análise econômico financeira. As configurações analisadas foram um sistema de geração de energia de uma usina autônoma; um motorgerador alimentado com biogás produzido em um biodigestor de dejetos bovinos e um sistema motorgerador alimentado com biogás produzido em um biodigestor de dejetos suínos. Verificou-se que ao integrar os biosistemas, utilizando suas biomassas residuais com insumo de geração de eletricidade, o custo da eletricidade gerada é reduzido.

Carvalho (2010) avaliou o potencial de uma planta de cogeração para refrigeração (absorção água-amônia) através de testes experimentais e análise exergoeconômica utilizando

diferentes potências elétricas, pressões na caldeira e temperaturas de solução na saída do chiller. A termoeconomia permitiu analisar melhores arranjos das propriedades físicas, em que, no geral, maiores pressões na caldeira elevaram a capacidade de refrigeração.

Mendes (2012) desenvolveu modelos matemáticos para simulação dos principais equipamentos de um sistema de refrigeração, de forma que seja possível aplicar o diagnóstico termodinâmico e termoeconômico para obtenção do índice de desempenho dos sistemas e dos equipamentos individuais, de forma a determinar as possíveis consequências de anomalias operacionais.

Medeiros Neto (2018) apresentou um estudo comparativo das metodologias exergoeconômicas da Teoria do Custo Exergético (TCE) e o Custo Exergético Específico (SPECO) na análise de um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito em série e, a partir dos resultados obtidos, foi feita uma análise das diferenças e peculiaridades de ambos, no qual o último método se apresentou mais adequado devido maior clareza na alocação de custos do insumo e produtos no ciclo, como também melhor tratamento dos resíduos oriundos dos equipamentos dissipativos. De acordo com estudo apontado pelo pesquisador, devido à dificuldade de alocar custos provenientes de equipamentos dissipativos em sistemas de refrigeração, a metodologia TCE tem um maior custo exergético unitário e monetário em relação ao método SPECO, sendo este último com capacidade de melhor análise econômica.

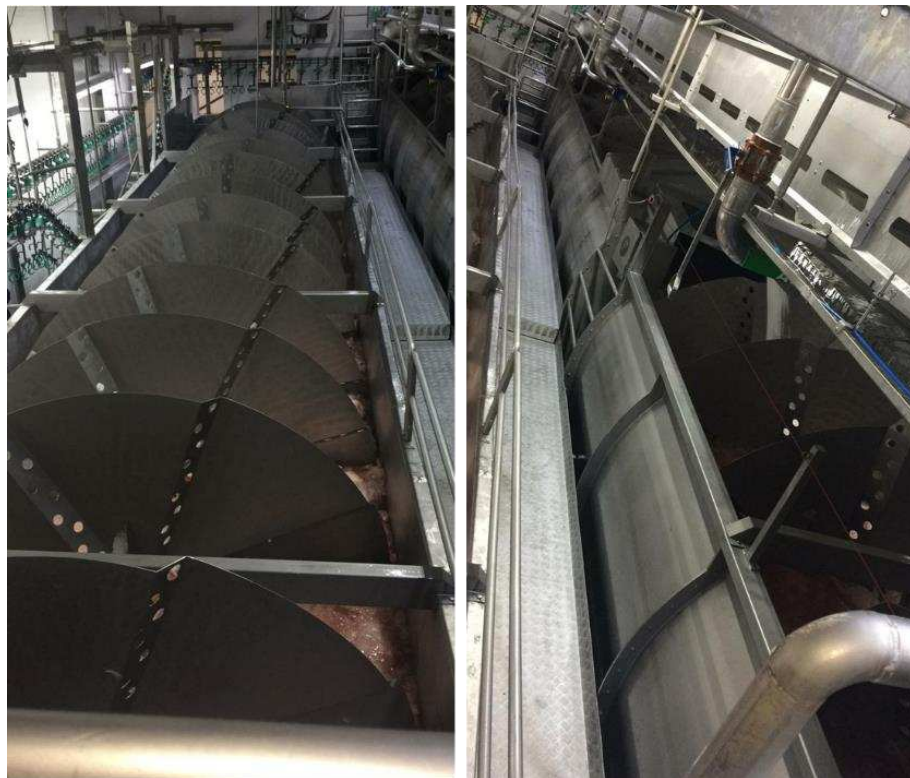
Maran et al. (2019) desenvolveram um *software* que efetua uma análise exergoeconômica sobre diferentes tipos de culturas agrícolas geradoras de biocombustíveis (bioetanol de primeira geração e produção de biodiesel a partir de soja), no qual recebe informações sobre a plantação da cultura escolhida e tipo de processo a ser analisado, retornando como resultado a eficiência exergética e o custo exergoeconômico, parâmetros estes de suma relevância para comparação de diferentes biocombustíveis provenientes de biomassas distintas.

Com base na literatura levantada, constata-se a existência de um contingente significativo de pesquisadores e empresas envolvidas no assunto na expectativa de melhorar sua tecnologia, reduzir custos e aumentar o desempenho de sistemas térmicos em geral, sendo a exergoeconomia fator imprescindível para o alcance destes objetivos.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o estudo e comparação das variáveis e parâmetros envolvidos para a segurança dos alimentos e para os balanços de massa e energia do sistema de pré-resfriamento sob imersão em água, utilizar-se-ão dados amostrais em escala industrial de um abatedouro frigorífico da Pif Paf Alimentos situado em Visconde do Rio Branco, Minas Gerais. Atualmente, a unidade abate cerca de 158,200 aves por dia, contando com uma sala de pré-resfriamento de carcaças constituída de 1 (um) *pré-chiller* e 2 (dois) *chillers* de resfriamento interligados em série com capacidade total de 113,51 m³ (Figura 7):

Figura 7 - Sala de pré-resfriamento de carcaças da empresa estudada



Conforme apresentado na Figura 7, a fim de melhor aproveitamento de espaço o sistema de resfriadores em série foi construído em forma de “U”, no qual à direita da imagem em questão se encontram o *pré-chiller* e o *chiller* fase 1 e à esquerda o *chiller* fase 2. A fim de melhor entendimento do fluxo no processo de pré-resfriamento de carcaças no *layout* em questão, o APÊNDICE A apresenta o fluxograma do sistema de *chillers* de imersão em água.

Para auxílio na obtenção dos equipamentos de controle e coleta dos parâmetros experimentais, contou-se com o apoio da equipe técnica especializada da Produção e Garantia

da Qualidade da Pif Paf Alimentos S.A. O estudo também contou com o financiamento integral, por parte da empresa em questão, para a execução dos ensaios microbiológicos e emissão de relatórios de ensaio em laboratório interno credenciado.

O tratamento, simulação e análise de dados foram realizados com auxílio do software EES®, no Laboratório de Simulação Numérica e Fenômenos de Transporte (LabSim) do Departamento de Química da Universidade Federal de Viçosa.

Em suma, o trabalho apresentado se concentrou em 3 vertentes:

- 1) A primeira vertente, que se apresenta no item 4.1, diz respeito à coleta de dados experimentais e simulação numérica para determinação do balanço de massa e energia no *layout* analisado, de forma a mensurar os gastos com recursos materiais (água e gelo) e energéticos nos sistemas. Para validação da sua efetividade, também foi analisado, no item 4.1.1, o atendimento normativo de dois principais parâmetros de processo para a carcaça de frango: o teor de absorção de água e a variação de temperatura após o pré-resfriamento;
- 2) A segunda vertente presente no item 4.2 se concentra na análise exérgica e exergoeconômica para cada volume de controle no *layout* estudado (trocadores de calor e turbinas), a fim de se avaliar o desempenho termodinâmico e custos de operação dadas as irreversibilidades nos equipamentos e as magnitudes das perdas termodinâmicas;
- 3) Por fim, a terceira vertente descrita no item 4.3 se baseia nas coletas de amostras de água (residente e de renovação) dos resfriadores e de carcaças de frango (antes e após os sistemas estudados) para análise da qualidade dos insumos e da efetividade na redução microbiana, respectivamente. Tal etapa se faz importante para validação microbiológica do *layout* utilizado frente a segurança alimentar.

4.1 Balanço de massa e energia no sistema de pré-resfriamento de carcaças de frango

4.1.1 Análise de absorção de água e temperatura para a carcaça de frango

Para verificação do teor de absorção de água no sistema de pré-resfriamento em estudo, amostras de 3 carcaças foram pesadas individualmente antes de serem imersas no *pré-chiller* e retiradas para nova pesagem após percurso de todos os *chillers* de resfriamento. Utilizou-se balanças digitais rotineiramente utilizadas para os controles da indústria (marca Alfa

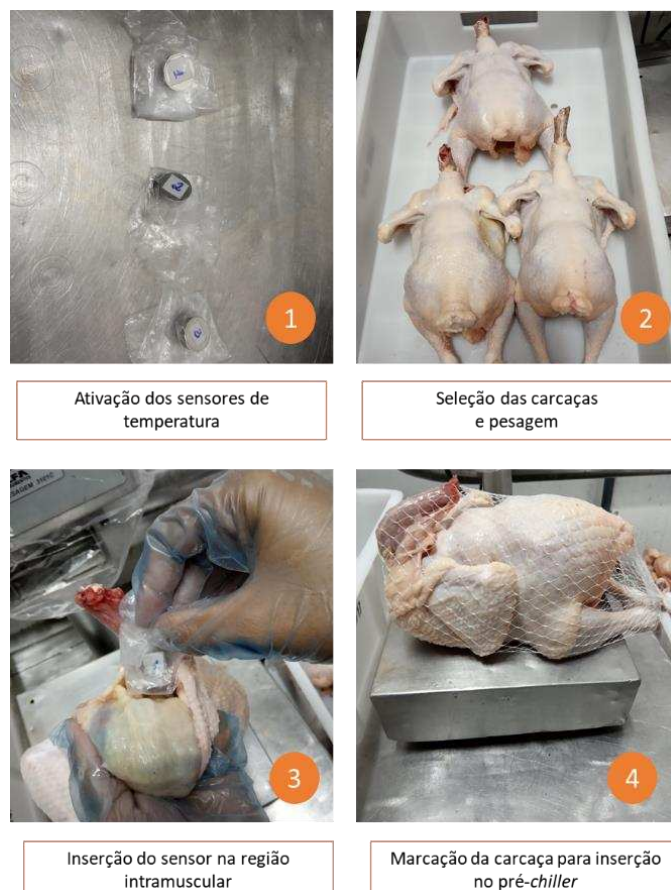
Instrumentos, modelo 3101C e resolução de 0,001 kg), as quais se encontravam devidamente calibradas pelo setor de metrologia da empresa. Foram mensuradas absorções de água nas carcaças durante 15 dias de produção, nos dois turnos produtivos, obtendo-se 90 dados de processo para análise. Considerando que haja somente absorção de água durante o processo de pré-resfriamento, a fração mássica de água (W_A) na carcaça foi obtida pela seguinte equação:

$$W_A = \frac{m_a - m_{a0}}{m_{a0}} \quad (26)$$

Onde m_{a0} e m_a representam o peso inicial e final da carcaça em kg, respectivamente.

A coleta dos dados experimentais para análise de variação da temperatura da carcaça de frango se deu pela inclusão de 1 registrador de temperatura do modelo *Ibutton* devidamente calibrado (marca Maxim, com resolução de 0,001 °C e leitura entre -30 a 200 °C) na região intramuscular de cada uma das carcaças. A Figura 8 apresenta, de forma sucinta, as etapas supracitadas:

Figura 8 - Etapas para análise de temperatura e absorção de água nas carcaças de frango



As temperaturas foram registradas a cada 5 minutos, durante todo o percurso por cada sistema de pré-resfriamento em estudo.

Finalizadas as coletas de dados experimentais, foram avaliados, para cada *layout*:

- O comportamento da absorção de água média diária obtida dado o tempo total de pré-resfriamento;
- O perfil de temperatura média intramuscular das carcaças durante o processo de resfriamento,

Tais análises tiveram como objetivo validar a efetividade do atendimento normativo previsto na Portaria nº 210/1998 (BRASIL, 1998) e monitorado pelo SIF continuamente no processo produtivo. Desta forma, foi inspecionado se o sistema de funcionamento analisado garante um teor máximo de absorção de água pelas carcaças de 8% dos seus respectivos pesos iniciais, assim como uma temperatura máxima de 7 °C ao final da passagem pelos resfriadores em série. Os dados médios obtidos diretamente (variação de temperatura e tempo de retenção) também foram utilizados como variáveis do processo para determinação do balanço de massa e energia de cada processo, etapa esta abordada no item 4.1.2. A incerteza dos instrumentos de controle de processo foram obtidas com o setor de metrologia da empresa.

4.1.2 Consumo de água e gelo nos resfriadores

Concomitante ao período de coleta de dados para as carcaças de frango, foram coletados dados de temperatura ambiente e temperatura da água residente e água de renovação de cada um dos 3 resfriadores, utilizando termômetro de espeto (marca Akso, resolução de 0,1 °C, exatidão de 1 °C e leitura entre -50 a 200 °C) devidamente calibrado pelo setor de metrologia da empresa. A coleta foi realizada em ambos os turnos produtivos por profissional do setor da Garantia de Qualidade da empresa, a cada 2 horas, durante 15 dias de produção, para determinação dos parâmetros médios de temperatura do sistema para o cálculo dos balanços mássicos e energéticos demandados. Dados de vazão de ar comprimido e especificações de parâmetros de equipamentos (turbinas e trocadores de calor) foram informados pelo setor de Engenharia também para auxílio na simulação de dados.

Para realização dos cálculos e, análise de dados, foi utilizado o software EES®, devido à sua simplicidade de execução e ao seu banco de dados com propriedades termodinâmicas disponíveis para os fluidos trabalhados neste estudo.

Foram avaliados, a partir dos dados coletados e dos dados simulados:

- A média de quantidade de gelo gasta em cada resfriador;
- A média de quantidade de água gasta em cada resfriador;
- O gasto energético total para do *layout*.

Para obtenção das variáveis supracitadas, considerou-se, para efeito de cálculo, as premissas estabelecidas pela Portaria nº 210/1998 do MAPA. De acordo com a legislação, a proporção mínima total de água de renovação e gelo deverá obedecer a uma vazão mínima de $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ carcaça}^{-1}$ no primeiro estágio (*pré-chiller*) e $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ carcaça}^{-1}$ no último estágio (*chiller* fase 1 e 2). Logo, as vazões mássicas de água e gelo na entrada de cada estágio também serão dadas pelas seguintes equações:

$$\dot{m}_{CA1} + \dot{m}_{CG1} = 1,5 \cdot 10^{-3} v_{abate} \quad (27)$$

$$\dot{m}_{CA2} + \dot{m}_{CG2} = 1,0 \cdot 10^{-3} v_{abate} \quad (28)$$

$$\dot{m}_{CA3} + \dot{m}_{CG3} = 1,0 \cdot 10^{-3} v_{abate} \quad (29)$$

Onde \dot{m}_{CA1} e \dot{m}_{CG1} , \dot{m}_{CA2} e \dot{m}_{CG2} , \dot{m}_{CA3} e \dot{m}_{CG3} se referem à vazão de água de renovação e gelo no *pré-chiller*, *chiller* fase 1 e *chiller* fase 2, respectivamente, e v_{abate} à velocidade da linha de abate, em carcaças h^{-1} .

A importância da análise das variáveis obtidas se dá pela quantificação dos gastos com recursos materiais (água e gelo) e energéticos nos sistemas, de forma a auxiliar na melhor estratégia de eficiência do processo.

4.2 Análise exérgica e exergoeconômica

A análise exérgica e exergoeconômica consistiram-se na identificação dos desempenhos do *layout* com base na 2ª Lei da Termodinâmica. A análise permitiu comparar os equipamentos, de forma a determinar qual componente necessita ser otimizado para melhorar o desempenho econômico de todo o sistema.

No presente trabalho foi considerada apenas a componente física da exergia, visto que o sistema em estudo não apresenta movimento nem mudança de posição com relação ao ambiente e nem apresenta reações químicas. Para cada componente do sistema foi aplicado um volume de controle e em seguida foi identificado as equações que representam as quantidades exergéticas.

Neste trabalho, também foi considerado que o processo se encontra operando em estado estacionário, de modo que os termos relacionados à variação com o tempo são nulos, O termo de transferência de exergia associada a transferência de trabalho (W_{VC}) está presente apenas no balanço exergético das turbinas de geração de ar comprimido. No mesmo sentido, foi considerado que todas as perdas de energia devido à transferência de calor entre o sistema e o ambiente são insignificativas, Como estado de referência, foi adotada a temperatura $T_0 = 25\text{ °C}$ e pressão $P_0 = 100\text{ kPa}$ para os cálculos das entalpias e entropias de referência para cada corrente. Caso a corrente esteja em equilíbrio com suas vizinhanças, a sua exergia correspondente foi estabelecida como zero.

Com relação ao estudo aplicado para obtenção dos custos exergéticos específicos para a carcaça de frango, foi utilizado como base custos de utilidades previamente conhecidos pela empresa para realização dos balanços. O código computacional que foi desenvolvido na plataforma EES, analisa os aspectos energéticos e exergéticos do sistema. No tocante ao estudo energético, foram obtidos os fluxos de calor de cada equipamento e as propriedades termodinâmicas. Nesta análise, determinou-se a exergia, as irreversibilidades e os custos monetários para a carcaça de frango em cada volume de controle considerado.

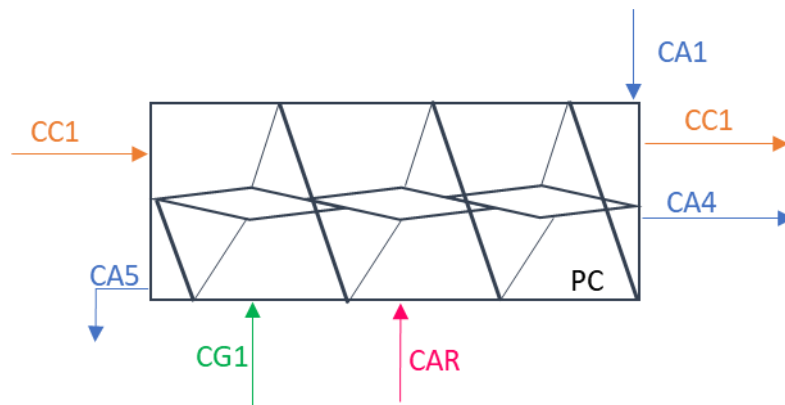
4.2.1 Análise exergética

Esta seção estabelece os valores de exergia de cada corrente e os balanços exergéticos para cada uma das unidades do sistema de pré-resfriamento de carcaças de frango instalado na empresa em questão, sendo elas: *pré-chiller*, *chiller* fase 1, *chiller* fase 2, trocador de calor da fábrica de gelo, trocador de calor para a água de renovação e turbina de ar comprimido.

4.2.1.1 Pré-chiller

A Figura 9 apresenta o volume de controle considerado para o pré-chiller de resfriamento de carcaças, com base no APÊNDICE A – Fluxograma do processo de resfriamento de carcaças de frango:

Figura 9 - Volume de controle para o pré-chiller



As correntes CA1, CA4 e CA5 representam a entrada e saídas de água de renovação; as correntes CG1 e CAR representam a entrada de gelo e ar comprimido, respectivamente, e CC1, o fluxo realizado pelas carcaças de frango. As equações que regem a exergia de cada corrente (Ex) são:

$$Ex_{CA1} = (h_{CA1} - h_{A'0}) - T_0(s_{CA1} - s_{A'0}) \quad (30)$$

$$Ex_{CA4} = 0 \quad (31)$$

$$Ex_{CA5} = (h_{CA5} - h_{A'0}) - T_0(s_{CA5} - s_{A'0}) \quad (32)$$

$$Ex_{CAR} = (h_{CAR} - h_{CAR'0}) - T_0(s_{CAR} - s_{CAR'0}) \quad (33)$$

$$Ex_{CG1} = (h_{CG1} - h_{G'0}) - T_0(s_{CG1} - s_{G'0}) \quad (34)$$

$$\dot{Ex}_{PC} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{PC}}\right) Q_{requeridoPC} \quad (35)$$

Onde \dot{Ex}_{PC} representa a exergia relacionada ao calor total que deve ser removido para o resfriamento da carcaça de frango no pré-chiller, em kJ h^{-1} . Considerando que seja desprezível

a passagem de água de um resfriador para outro, não há exergia relacionada à corrente de água CA4.

A equação do balanço de exergia no volume de controle analisado é representada por:

$$\dot{m}_{CA1}Ex_{CA1} + \dot{m}_{CG1}Ex_{CG1} + \dot{m}_{AR}Ex_{AR} + \dot{E}x_{PC} = (\dot{m}_{CA1} + \dot{m}_{CG1})Ex_{CA5} + \dot{E}x_{D1} \quad (36)$$

Onde \dot{m}_{CA1} , \dot{m}_{CG1} e \dot{m}_{AR} são a vazão mássica de água, gelo e ar comprimido em kg h^{-1} , respectivamente, e $\dot{E}x_{D1}$ se refere à exergia destruída no pré-chiller, em kJ h^{-1} . Conforme exposto na equação 18, ao considerar a fusão de todo o gelo do sistema após a troca de calor com o sistema, a massa final de água que sairá do sistema será igual à soma de \dot{m}_{CA1} e \dot{m}_{CG1} .

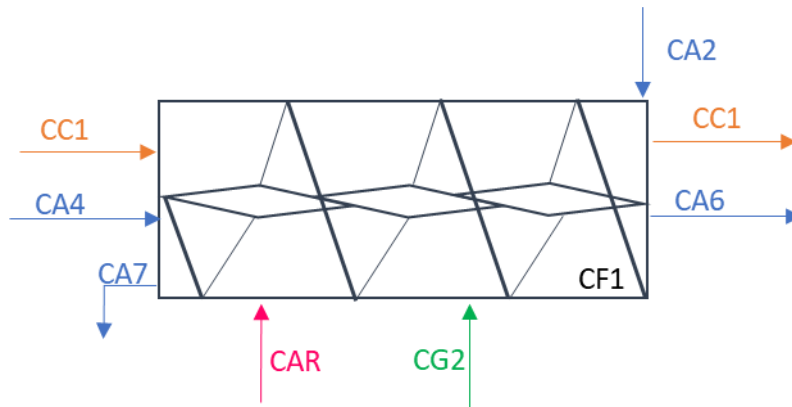
Para o volume de controle em questão, a eficiência exergética será:

$$\varepsilon_{PC} = \left(\frac{(\dot{m}_{CA1} + \dot{m}_{CG1})Ex_{CA5} - (\dot{m}_{CA1}Ex_{CA1} + \dot{m}_{CG1}Ex_{CG1})}{\dot{E}x_{PC} + \dot{m}_{AR}Ex_{AR}} \right) 100 \quad (37)$$

4.2.1.2 Chiller fase 1

A Figura 10 apresenta o volume de controle considerado para o chiller fase 1 de resfriamento de carcaças, com base no APÊNDICE A:

Figura 10 - Volume de controle para o chiller fase 1



As correntes CA2, CA4, CA6 e CA7 representam a entrada e saídas de água de renovação; as correntes CG2 e CAR representam a entrada de gelo e ar comprimido,

respectivamente, e CC1, o fluxo realizado pelas carcaças de frango. As equações que regem a exergia de cada corrente (Ex) são:

$$Ex_{CA2} = (h_{CA2} - h_{A'0}) - T_0(s_{CA2} - s_{A'0}) \quad (38)$$

$$Ex_{CA4} = Ex_{CA6} = 0 \quad (39)$$

$$Ex_{CA7} = (h_{CA7} - h_{A'0}) - T_0(s_{CA7} - s_{A'0}) \quad (40)$$

$$Ex_{CAR} = (h_{CAR} - h_{CAR'0}) - T_0(s_{CAR} - s_{CAR'0}) \quad (41)$$

$$Ex_{CG2} = (h_{CG2} - h_{G'0}) - T_0(s_{CG2} - s_{G'0}) \quad (42)$$

$$Ex_{CF1} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{CF1}}\right) Q_{requeridoCF1} \quad (43)$$

Onde Ex_{CF1} representa a exergia relacionada ao calor total que deve ser removido para o resfriamento da carcaça de frango no *chiller* fase 1, em kJ h^{-1} . Considerando que seja desprezível a passagem de água de um resfriador para outro, não há exergia relacionada às correntes de água CA4 e CA5.

A equação do balanço de exergia no volume de controle analisado é representada por:

$$\dot{m}_{CA2}Ex_{CA2} + \dot{m}_{CG2}Ex_{CG2} + \dot{m}_{AR}Ex_{AR} + \dot{Ex}_{CF1} = (\dot{m}_{CA2} + \dot{m}_{CG2})Ex_{CA7} + \dot{Ex}_{D2} \quad (44)$$

Onde \dot{m}_{CA2} , \dot{m}_{CG2} e \dot{m}_{AR} são a vazão mássica de água, gelo e ar comprimido em kg h^{-1} , respectivamente, e \dot{Ex}_{D2} se refere à exergia destruída no *chiller* fase 1, em kJ h^{-1} . Conforme exposto na equação 18, ao considerar a fusão de todo o gelo do sistema após a troca de calor com o sistema, a massa final de água que sairá do sistema será igual à soma de \dot{m}_{CA2} e \dot{m}_{CG2} .

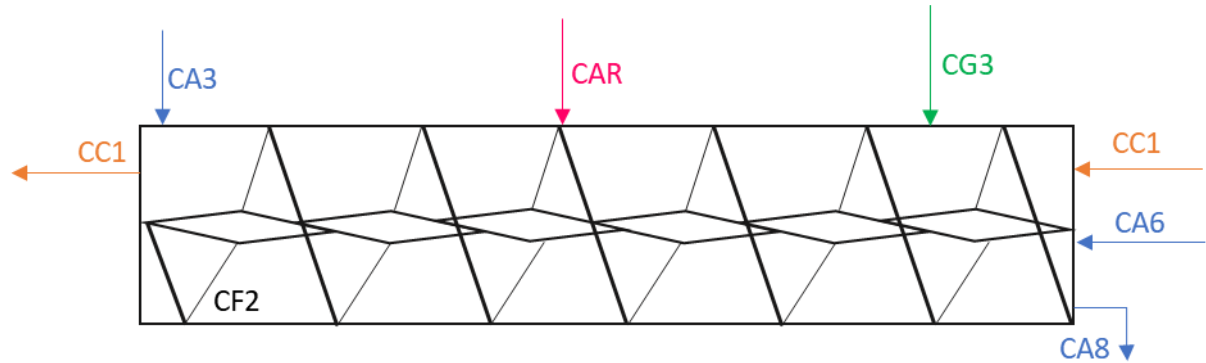
Para o volume de controle em questão, a eficiência exergética será:

$$\varepsilon_{CF1} = \left(\frac{(\dot{m}_{CA2} + \dot{m}_{CG2})Ex_{CA7} - (\dot{m}_{CA2}Ex_{CA2} + \dot{m}_{CG2}Ex_{CG2})}{\dot{Ex}_{CF1} + \dot{m}_{AR}Ex_{AR}} \right) 100 \quad (45)$$

4.2.1.3 Chiller fase 2

A Figura 11 apresenta o volume de controle considerado para o *chiller* fase 2 de resfriamento de carcaças, com base no APÊNDICE A:

Figura 11 - Volume de controle para o *chiller* fase 2



As correntes CA3, CA6 e CA8 representam a entrada e saídas de água de renovação; as correntes CG3 e CAR representam a entrada de gelo e ar comprimido, respectivamente, e CC1, o fluxo realizado pelas carcaças de frango. As equações que regem a exergia de cada corrente (Ex) são:

$$Ex_{CA3} = (h_{CA3} - h_{A'0}) - T_0(s_{CA3} - s_{A'0}) \quad (46)$$

$$Ex_{CA6} = 0 \quad (47)$$

$$Ex_{CA8} = (h_{CA8} - h_{A'0}) - T_0(s_{CA8} - s_{A'0}) \quad (48)$$

$$Ex_{CAR} = (h_{CAR} - h_{CAR'0}) - T_0(s_{CAR} - s_{CAR'0}) \quad (49)$$

$$Ex_{CG3} = (h_{CG3} - h_{G'0}) - T_0(s_{CG3} - s_{G'0}) \quad (50)$$

$$Ex_{CF2} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{CF2}}\right) Q_{requeridoCF2} \quad (51)$$

Onde Ex_{CF2} representa a exergia relacionada ao calor total que deve ser removido para o resfriamento da carcaça de frango no *chiller* fase 2, em kJ h^{-1} . Considerando que seja desprezível a passagem de água de um resfriador para outro, não há exergia relacionada à corrente de água CA6.

A equação do balanço de exergia no volume de controle analisado é representada por:

$$\dot{m}_{CA3}Ex_{CA3} + \dot{m}_{CG3}Ex_{CG3} + \dot{m}_{AR}Ex_{AR} + \dot{E}x_{CF2} = (\dot{m}_{CA3} + \dot{m}_{CG3})Ex_{CA8} + \dot{E}x_{D3} \quad (52)$$

Onde \dot{m}_{CA3} , \dot{m}_{CG3} e \dot{m}_{AR} são a vazão mássica de água, gelo e ar comprimido em kg h^{-1} , respectivamente, e $\dot{E}x_{D3}$ se refere à exergia destruída no *chiller* fase 2, em kJ h^{-1} . Conforme exposto na equação 18, ao considerar a fusão de todo o gelo do sistema após a troca de calor com o sistema, a massa final de água que sairá do sistema será igual à soma de \dot{m}_{CA3} e \dot{m}_{CG3} .

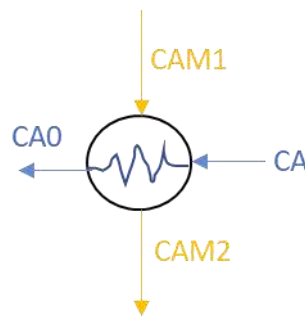
Para o volume de controle em questão, a eficiência exergética será:

$$\varepsilon_{CF2} = \left(\frac{(\dot{m}_{CA3} + \dot{m}_{CG3})Ex_{CA8} - (\dot{m}_{CA3}Ex_{CA3} + \dot{m}_{CG3}Ex_{CG3})}{\dot{E}x_{CF2} + \dot{m}_{AR}Ex_{AR}} \right) 100 \quad (53)$$

4.2.1.4 Trocador de calor – água de renovação

A Figura 13 apresenta o volume de controle considerado para o trocador de calor da água de renovação, com base no APÊNDICE A:

Figura 12 - Volume de controle para o trocador de calor da água de renovação



As correntes CA e CA0 representam a entrada e saída de água, e CAM1 e CAM2, o fluxo de entrada e saída de amônia. As equações que regem a exergia de cada corrente (Ex) são:

$$Ex_{CA} = 0 \quad (54)$$

$$Ex_{CA0} = (h_{CA0} - h_{A'0}) - T_0(s_{CA0} - s_{A'0}) \quad (55)$$

$$Ex_{CAM1} = (h_{CAM1} - h_{AM'0}) - T_0(s_{CAM1} - s_{AM'0}) \quad (56)$$

$$Ex_{CAM2} = (h_{CAM2} - h_{AM'0}) - T_0(s_{CAM2} - s_{AM'0}) \quad (57)$$

Considerando que a água de entrada no sistema esteja à mesma pressão e temperatura de referência (25 °C e 100 kPa), não há exergia relacionada à corrente de água CA. A equação do balanço do sistema é representada por:

$$\dot{m}_{CAM1} Ex_{CAM1} = \dot{m}_{CA0} Ex_{CA0} + \dot{m}_{AM2} Ex_{AM2} + \dot{E}x_{DA} \quad (58)$$

Onde \dot{m}_{CAM1} , \dot{m}_{CAM2} e \dot{m}_{CA0} são a vazão mássica de amônia e água em kg h⁻¹, respectivamente, e $\dot{E}x_{DA}$ se refere à exergia destruída no trocador de calor em questão, em kJ h⁻¹.

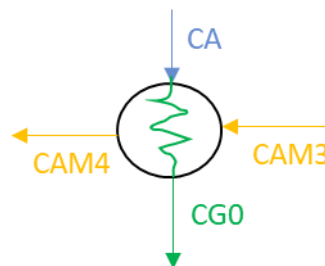
Para o volume de controle em questão, a eficiência exergética será:

$$\varepsilon_A = \left(\frac{\dot{m}_{CAM1} Ex_{CAM1} - \dot{m}_{AM2} Ex_{AM2}}{\dot{m}_{CA0} Ex_{CA0}} \right) 100 \quad (59)$$

4.2.1.5 Trocador de calor – fábrica de gelo

A Figura 12 apresenta o volume de controle considerado para o trocador de calor da fábrica de gelo, com base no APÊNDICE A:

Figura 13 - Volume de controle para o trocador de calor da fábrica de gelo



As correntes CA e CGO representam a entrada de água e saída de gelo, respectivamente, e CAM3 e CAM4, o fluxo de entrada e saída de amônia. As equações que regem a exergia de cada corrente (Ex) são:

$$Ex_{CA} = 0 \quad (60)$$

$$Ex_{CG0} = (h_{G0} - h_{G'0}) - T_0(s_{G0} - s_{G'0}) = Ex_{CG1} = Ex_{CG2} = Ex_{CG3} \quad (61)$$

$$Ex_{CAM3} = (h_{CAM3} - h_{AM'0}) - T_0(s_{CAM3} - s_{AM'0}) \quad (62)$$

$$Ex_{CAM4} = (h_{CAM4} - h_{AM'0}) - T_0(s_{CAM4} - s_{AM'0}) \quad (63)$$

Considerando que a diferença de temperatura e pressão de entrada de gelo nos resfriadores e na saída do trocador de calor é desprezível, tem-se:

$$Ex_{CG0} = Ex_{CG1} = Ex_{CG2} = Ex_{CG3} \quad (64)$$

A equação do balanço de exergia para o volume de controle analisado é representada por:

$$\dot{m}_{CAM3} Ex_{CAM3} = \dot{m}_{CG0} Ex_{CG0} + \dot{m}_{AM4} Ex_{AM4} + \dot{E}x_{DG} \quad (65)$$

Onde \dot{m}_{CAM3} , \dot{m}_{CAM4} e \dot{m}_{CG0} são a vazão mássica de amônia e gelo em kg h⁻¹, respectivamente, e $\dot{E}x_{DG}$ se refere à exergia destruída no trocador de calor em questão, em kJ h⁻¹.

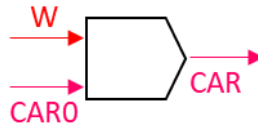
Para o volume de controle em questão, a eficiência exergética será:

$$\varepsilon_G = \left(\frac{\dot{m}_{CAM3} Ex_{CAM3} - \dot{m}_{AM4} Ex_{AM4}}{\dot{m}_{CG0} Ex_{CG0}} \right) 100 \quad (66)$$

4.2.1.6 Sistema de ar comprimido

A Figura 14 apresenta o volume de controle considerado para a turbina de ar comprimido, com base no APÊNDICE A:

Figura 14 - Volume de controle para o sistema de ar comprimido



As correntes CAR0 e CAR representam a entrada e saída de ar e ar comprimido, respectivamente, e W o trabalho da turbina. As equações que regem a exergia de cada corrente (Ex) são:

$$Ex_{CAR0} = 0 \quad (67)$$

$$Ex_{CAR} = (h_{CAR} - h_{CAR'0}) - T_0(s_{CAR} - s_{CAR'0}) \quad (68)$$

Considerando que o ar de entrada no sistema esteja à mesma pressão e temperatura de referência (25 °C e 100 kPa), não há exergia relacionada à corrente de ar CAR0. A equação do balanço do sistema é representada por:

$$W = \dot{m}_{AR} Ex_{AR} + \dot{E}x_{DAR} \quad (69)$$

Onde \dot{m}_{AR} é a vazão mássica de ar em kg h⁻¹ e $\dot{E}x_{DAR}$ a exergia destruída na turbina, em kJ h⁻¹.

Para o volume de controle em questão, a eficiência exergética será:

$$\varepsilon_{AR} = \left(\frac{\dot{m}_{AR} Ex_{AR}}{W} \right) 100 \quad (70)$$

4.2.2 Análise exergoeconômica

A realização da análise exergoeconômica para o estudo em questão teve como principal objetivo de estabelecer os custos de produção da carcaça de frango pré-resfriada em cada estágio. Para sua determinação, a Tabela 2 apresenta os custos de utilidades conhecidos pela empresa em questão com base nos valores médios praticados no ano de 2019 e taxa de câmbio de 4,21 R\$ US\$⁻¹:

Tabela 2 – Custos de utilidades

Parâmetro	Descrição	Valor
C_{ETA}	Custo de recebimento de água tratada	0,21 US\$ m ⁻³
C_{ETE}	Custo para tratamento da água residuária	0,49 US\$ m ⁻³
C_G	Custo de fabricação do gelo	6,83 US\$ m ⁻³
C_E	Custo da energia elétrica	0,12 US\$ kWh ⁻¹

Os custos de recebimento de água tratada (C_{ETA}) e tratamento de água residuária (C_{ETE}) foram obtidos tendo como base o volume total de produtos químicos utilizados para tratamento e energia elétrica envolvida por metro cúbico de água. O custo de fabricação de gelo (C_G) foi determinado com base na energia elétrica total necessária para o trabalho das máquinas de gelo e o custo da energia elétrica (C_E), por sua vez, foi obtido com base nos valores médios mensais de compra de energia praticados no ano de 2019 pela empresa em estudo.

Para sistemas existentes, em que o custo de capital de investimento e o capital de manutenção e operação são zero, o fator exergoeconômico (Z) é zero, tomando a equação 20 de balanço de custos tem-se, para o pré-chiller, chiller fase 1 e chiller fase 2, respectivamente:

$$C_{ETA}\dot{V}_{CA1} + C_G\dot{V}_{CG1} + C_{AR} + c_{C1}Ex_{PC} = C_{ETE}(\dot{V}_{CA1} + \dot{V}_{CG1}) \quad (71)$$

$$C_{ETA}\dot{V}_{CA2} + C_G\dot{V}_{CG2} + C_{AR} + c_{C2}Ex_{CF1} = C_{ETE}(\dot{V}_{CA2} + \dot{V}_{CG2}) \quad (72)$$

$$C_{ETA}\dot{V}_{CA3} + C_G\dot{V}_{CG3} + C_{AR} + c_{C3}Ex_{CF2} = C_{ETE}(\dot{V}_{CA3} + \dot{V}_{CG3}) \quad (73)$$

Onde \dot{V}_{CA1} , \dot{V}_{CA2} e \dot{V}_{CA3} são as vazões volumétricas de água, em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$; \dot{V}_{CG1} , \dot{V}_{CG2} e \dot{V}_{CG3} as vazões volumétricas de água, em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, e c_{C1} , c_{C2} e c_{C3} os custos exergoeconômicos específicos (em US\$ kJ^{-1}) para a produção de carcaça de frango pré-resfriada em cada estágio. A determinação do fluxo de custo exergoeconômico para o ar comprimido (C_{AR}) em US\$ h^{-1} foi realizada com base no balanço de custos na turbina, dado por:

$$C_{AR} = \frac{C_E W}{3600} \quad (74)$$

Em que W se refere ao trabalho realizado pela turbina, em kJ h^{-1} .

4.3 Avaliação microbiológica para a segurança alimentar

Para o *layout* do sistema de pré-resfriamento de carcaça de frango em estudo, serão coletadas amostras para análise de contagem total de micro-organismos mesófilos, *E. coli* e enterobactérias, sob frequência quinzenal em cada turno de produção, nos pontos de renovação de água e na água residente de cada resfriador. Do mesmo modo, sob frequência quinzenal e em cada turno de produção, serão coletadas amostras para análise de micro-organismos mesófilos aeróbios, mesófilos anaeróbios, *E. coli* e enterobactérias para 5 (cinco) carcaças antes da entrada no pré-*chiller* e 5 (cinco) carcaças após saída no último estágio de resfriamento. A Tabela 3 apresenta a metodologia utilizada pelo laboratório interno da empresa para obtenção da contagem de unidades formadoras de colônia por grama (UFC g^{-1}) para cada micro-organismo apresentado.

Tabela 3 – Metodologias utilizadas pelo laboratório de microbiologia

Micro-organismo	Metodologia
<i>Escherichia coli</i>	<i>Petrifilm</i> AOAC 998.08 - 2016
Enterobactérias	<i>Petrifilm</i> AOAC 2003.01 - 2016
Mesófilos aeróbios/anaeróbios	<i>Petrifilm</i> AOAC 990.12 - 2016

Fonte: Latimer, 2016

Em posse dos resultados obtidos pra a água, os valores serão comparados entre si e com os padrões internos da empresa e/ou padrões estabelecidos pela legislação vigente a fim de verificar a qualidade microbiológica dos sistemas. Por sua vez, os parâmetros avaliados para as carcaças serão analisados quanto à redução decimal logarítmica resultante (RD) de cada conjunto de coletas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta etapa do trabalho está dividida em 3 seções, conforme apresentadas a seguir. A primeira seção diz respeito aos resultados obtidos acerca do balanço de massa e energia no sistema de pré-resfriamento de carcaças de frango por imersão em água na agroindústria em estudo. A segunda seção apresenta os valores de exergia, eficiência exergética e custos exergoeconômicos calculados do sistema, apresentando as principais irreversibilidades do processo. Por fim, a terceira e última seção mostra os dados microbiológicos do processo, confrontando-os com os parâmetros de processo obtidos nas seções anteriores e análise do atendimento à segurança alimentar.

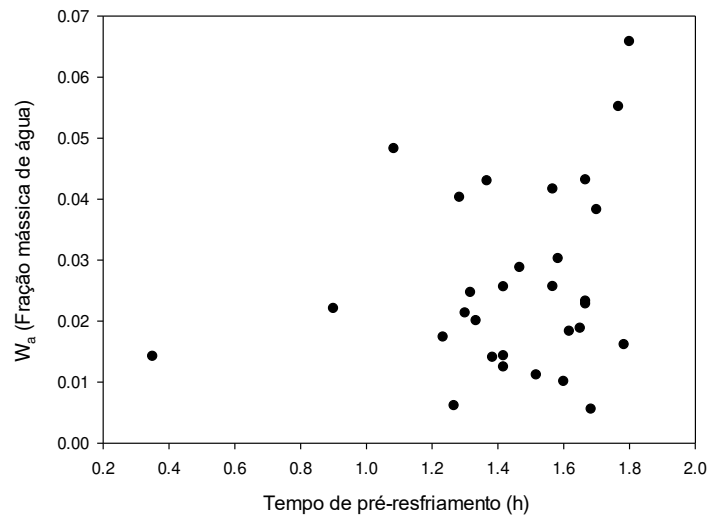
5.1 Balanço de massa e energia no sistema

5.1.1 Análise de absorção e temperatura da carcaça de frango

Para obtenção da fração mássica final de água na carcaça de frango, calculou-se razão entre o peso final de água da carcaça na saída do último resfriador pelo peso inicial da carcaça anterior à entrada no pré-chiller de 90 carcaças aleatórias submetidas ao processo de resfriamento na empresa em questão. Os dados tabelados se encontram no APÊNDICE B. O comportamento da absorção média diária obtida é apresentado na Figura 15.

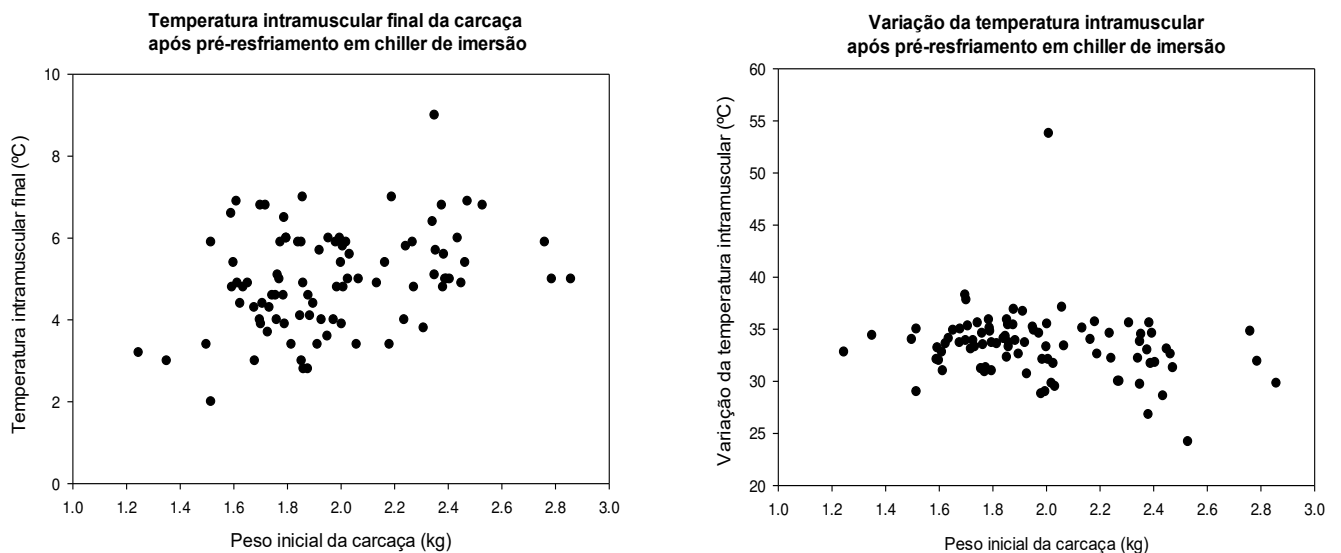
Na Figura 15, a fração mássica (W_A) diz respeito ao teor de água absorvida pela carcaça durante percurso pelo sistema de pré-resfriamento. Com base nos dados obtidos e considerando um tempo total médio de resfriamento de $(1,44 \pm 0,21)$ horas (período máximo de retenção nos chillers fase 1 e 2, a saber, de 2 horas, conforme programa de autocontrole da empresa) e condições ambientais praticadas dentro do preconizado em legislação vigente, verifica-se elevada oscilação dos resultados entre a faixa de 0,01 e 0,05 para W_A , com valor médio em porcentagem para absorção de $(2,700 \pm 1,200)$ %, respectivamente. A justificativa para tal variabilidade tem como base a irregularidade da carcaça de frango com relação à sua massa e dimensão, na qual, conforme abordado por Carciofi (2005), é um dos principais fatores para tal desuniformidade em sistemas reais.

Figura 15 - Fração mássica final de água na carcaça após o pré-resfriamento



Acerca da faixa máxima de aceitação para absorção, constata-se que os resultados condizem com os valores médios observados em *chillers* industriais de 3 a 5% com base na literatura, além do atendimento ao máximo valor de 8% determinado pela legislação brasileira através da Portaria nº 210/1998 do MAPA. Considerando o peso médio da carcaça de $(1,97 \pm 0,22)$ kg e o tempo total de processo conforme supracitado, os dados da temperatura intramuscular das carcaças e a variação de temperatura intramuscular inicial e final durante o processo de resfriamento é apresentado pela Figura 16.

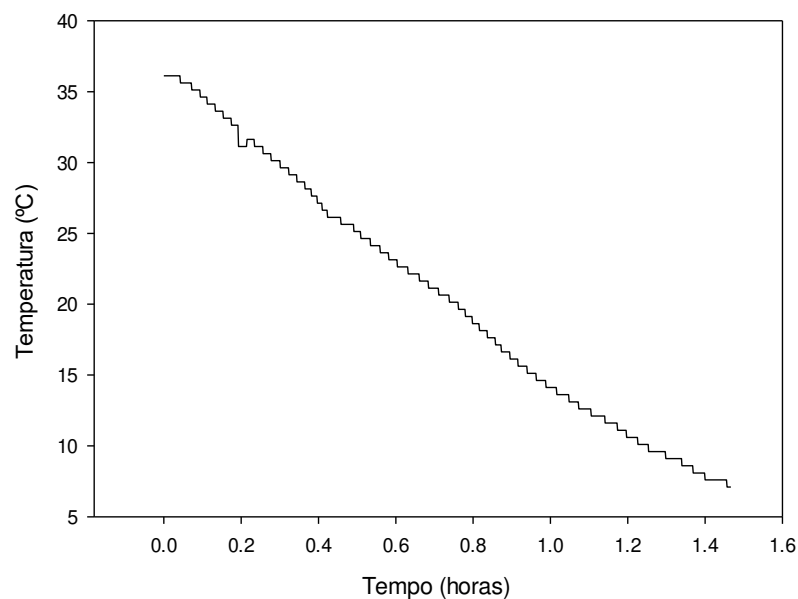
Figura 16 - Temperatura da carcaça no sistema de pré-resfriamento



Os dados mostram que, apesar da dispersão dos dados obtidos para a temperatura intramuscular das carcaças avaliadas ao final do sistema de pré-resfriamento, a variação de temperatura total, ou seja, a diferença entre a temperatura inicial e final da carcaça, apresentou similaridade no comportamento. Tal resultado confirma a alta dependência das dimensões e peso da carcaça de frango na obtenção dos parâmetros de controle do processo e busca da melhor estratégia de operação dos resfriadores.

Para a amostragem avaliada, os dados da evolução temporal média do sensor de temperatura inseridos na musculatura peitoral das carcaças são apresentados pela Figura 17.

Figura 17 - Perfil da temperatura da carcaça de frango no sistema de pré-resfriamento



Tal resultado está coerente com os estudos prévios de Carciofi (2005), Rodrigues (2013), e Ukidwe (2017), no qual o perfil de redução de temperatura evidencia um mecanismo de transferência de calor convectivo promovido pela movimentação do meio de resfriamento. Conforme também apresentado por Rodrigues (2013), nesta análise, demonstra-se quantitativamente a importância da intensidade da agitação da água do processo para a garantia de um resfriamento mais eficaz da carcaça de frango.

Com base no tempo de retenção obtido no pré-chiller, chiller fase 1 e chiller fase 2 de (30 ± 5) min, (20 ± 6) min e (100 ± 17) min, respectivamente, e de acordo com a Figura 17, as temperaturas intramusculares na entrada e saída de cada resfriador são apresentadas conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Temperatura médias de entrada e saída da carcaça nos resfriadores

Parâmetros	Pré-chiller	Chiller fase 1	Chiller fase 2
Entrada (°C)	38,260 ± 1,050	21,380 ± 1,050	13,620 ± 1,050
Saída (°C)	21,380 ± 1,050	13,620 ± 1,050	5,830 ± 1,050

Logo, tendo em vista a amostragem realizada para o sistema em questão, tem-se a obtenção de uma temperatura intramuscular média final no processo de $(5,830 \pm 1,050)$ °C, valor este aceitável dentro do atendimento à temperatura máxima de 7 °C na saída do pré-resfriamento conforme legislação vigente.

O conhecimento da dimensão e correntes de processo dos resfriadores para alcance dos padrões médios reais observados também é de suma importância para o estudo do processo em tela. A Tabela 5 apresenta os valores dos dados médios coletados como entrada de dados para o sistema:

Tabela 5 – Parâmetros médios para os resfriadores

Parâmetros	Pré-chiller	Chiller fase 1	Chiller fase 2
Água residente (°C)	12,5 ± 0,9	3,9 ± 0,9	1,9 ± 0,9
Água de renovação (°C)	2,9 ± 0,9	3,6 ± 0,9	2,7 ± 0,9
Comprimento (m)	9,50 ± 0,05	9,50 ± 0,05	18,00 ± 0,05
Diâmetro (m)	2,60 ± 0,05	2,60 ± 0,05	2,50 ± 0,05
Volume (m³)	25,20 ± 1,10	25,20 ± 1,10	44,20 ± 1,10
Área de troca térmica (m²)	68,79 ± 0,65	68,79 ± 0,65	120,60 ± 0,65

Para efeito de cálculo, tanto o volume quanto a área superficial de troca térmica foram obtidos considerando a geometria espacial dos resfriadores (semicilindro), com base na Figura 6.

A nível de comparação, verifica-se que todos os valores obtidos atendem ao previsto em normas vigentes, tais como a temperatura máxima da água residente de 16 °C para o pré-chiller e de 4 °C para os chillers fase 1 e 2, conforme Portaria nº 210/1998 do MAPA. Os dados coletados se encontram descritos no APÊNDICE C, no qual também se determinou a temperatura média da sala de pré-resfriamento igual $(16,5 \pm 0,9)$ °C.

5.1.2 Consumo de água e gelo nos resfriadores

A análise dos recursos materiais e energéticos envolvidos no sistema em estudo teve como base a modelagem matemática desenvolvida no item 3.6.1 desta dissertação, nas quais as propriedades físicas, tanto da carne de frango como do sistema de pré-resfriamento, foram obtidas tanto da literatura quanto experimentalmente.

Com base no APÊNDICE A, para o balanço mássico de água e gelo, além das correlações dadas no item 4.1.2, considerou-se também que não há uma quantidade significativa de água sendo transportada de um *chiller* para o outro, assim como que toda a água de renovação de entram no resfriador, saem com a mesma proporção de forma a mantê-lo sempre dentro do seu volume de água de trabalho. Logo:

$$\dot{m}_{CA4} = 0 \quad (75)$$

$$\dot{m}_{CA6} = 0 \quad (76)$$

$$\dot{m}_{CA5} = \dot{m}_{CA1} + \dot{m}_{CG1} \quad (77)$$

$$\dot{m}_{CA7} = \dot{m}_{CA2} + \dot{m}_{CG2} \quad (78)$$

$$\dot{m}_{CA8} = \dot{m}_{CA3} + \dot{m}_{CG3} \quad (79)$$

$$\dot{m}_{CA0} = \dot{m}_{CA1} + \dot{m}_{CA2} + \dot{m}_{CA3} \quad (80)$$

$$\dot{m}_{CG0} = \dot{m}_{CG1} + \dot{m}_{CG2} + \dot{m}_{CG3} \quad (81)$$

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por radiação, foi considerada a temperatura ambiente da sala e a temperatura residente dos resfriadores com base na Tabela 5, assim como a emissividade da superfície da água de 0,8 (INCROPERA et al, 2008). Para a transferência de calor por convecção natural do ar, as propriedades físico-químicas e termodinâmicas foram obtidas com base no banco de dados termodinâmicos do EES a partir da temperatura e pressão ambiente. A

Tabela 6 apresenta os valores obtidos para os coeficientes de transferência de calor por radiação e convectivo, e o coeficiente global de transferência de calor para o cálculo da quantidade de calor cedida pelo sistema aos resfriadores ($\dot{q}_{sistema}$). O memorial de cálculo para obtenção das variáveis se encontra no APÊNDICE D.

Tabela 6 – Parâmetros obtidos para o cálculo da quantidade de calor cedida pelo sistema

Parâmetros	Pré-chiller	Chiller fase 1	Chiller fase 2
h_{rad} (kW m ⁻² K ⁻¹)	4,32 10 ⁻³	4,13 10 ⁻³	4,09 10 ⁻³
h_{conv} (kW m ⁻² K ⁻¹)	0,887	1,184	1,223
U (kW m ⁻² K ⁻¹)	7,36 10 ⁻⁴	9,20 10 ⁻⁴	9,41 10 ⁻⁴

O valor do coeficiente global de transferência de calor (U) está intimamente relacionado com as dimensões dos resfriadores e propriedades físico-químicas dos fluidos nas pressões e temperaturas adotadas. Çengel e Ghajar (2012) consideram para U o valor de 1,38 10⁻² kW m⁻² K⁻¹ em seus trabalhos. Nesse sentido, constata-se a necessidade de avaliar a grandeza em tela a considerar particularidades de cada sistema de pré-resfriamento.

A quantidade de calor cedida pelo ar comprimido ($\dot{q}_{ar\ comp}$), a uma vazão de 450 m³ h⁻¹, temperatura de 40 °C e pressão de descarga de 100 kPa, foi determinada a partir dos valores de densidade e a entalpia específica do ar com base no banco de dados termodinâmicos do EES. Para o cálculo da quantidade de calor cedida pelas carcaças de frango, teve-se como base os valores de temperatura intramuscular da carcaça encontrados (Tabela 4) e o calor específico dado por Neves Filho (1978), no valor de 0,80 kcal kg⁻¹ °C⁻¹ e densidade de 1070 kg m⁻³. A Tabela 7 apresenta os valores obtidos para a vazão mássica das correntes e a Tabela 7, a quantidade média total de água de renovação, gelo e gasto energético obtidos pelo balanço de massa e energia em cada resfriador, a partir do software EES:

Tabela 7 – Parâmetros obtidos pelo balanço de massa e energia nos resfriadores

Parâmetros	Pré-chiller	Chiller fase 1	Chiller fase 2
Água de renovação (\dot{m}_{CAi}) _e (kg h ⁻¹)	1,28 10 ⁴	7,68 10 ³	7,76 10 ³
Gelo (\dot{m}_{CGi}) _e (kg h ⁻¹)	1,55 10 ³	1,92 10 ³	1,85 10 ³
$\dot{q}_{sistema}$ (kJ h ⁻¹)	7,37 10 ²	2,86 10 ³	5,95 10 ³
$\dot{q}_{ar\ comp}$ (kJ h ⁻¹)	1,57 10 ⁵	1,57 10 ⁵	1,57 10 ⁵
\dot{q}_{cond} (kJ h ⁻¹)	1,07 10 ⁶	4,91 10 ⁵	4,93 10 ⁵
\dot{q}_{req} (kJ h ⁻¹)	1,23 10 ⁶	6,51 10 ⁵	6,56 10 ⁵

Observou-se, nas condições de trabalho expostas do sistema de pré-resfriamento avaliado, a necessidade de uma vazão de água de renovação total de $2,83 \cdot 10^4 \text{ kg h}^{-1}$ e de uma vazão de gelo total $5,31 \cdot 10^3 \text{ kg h}^{-1}$. Tal resultado implica no consumo aproximado de água de renovação e gelo de $2,95 \text{ kg carcaça}^{-1}$ e $0,55 \text{ kg carcaça}^{-1}$, respectivamente, para uma velocidade de abate de 9600 aves h^{-1} . Tendo em vista a dificuldade na homogeneidade da matéria-prima nos abatedouros frigoríficos dadas as condições climáticas, de alimentação e transporte dos frangos de corte, as Figuras 18, 19 e 20 apresentam o comportamento quantitativo dos parâmetros de água de renovação e gelo total em função do peso inicial da carcaça, temperatura intramuscular e velocidade de abate:

Figura 18 - Peso inicial da carcaça *versus* demanda total de água e gelo

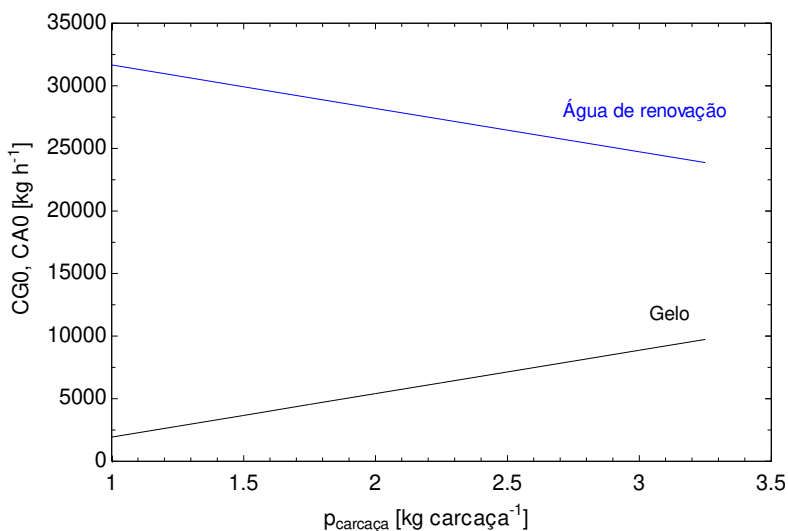


Figura 19 - Temperatura inicial da carcaça *versus* demanda total de água e gelo

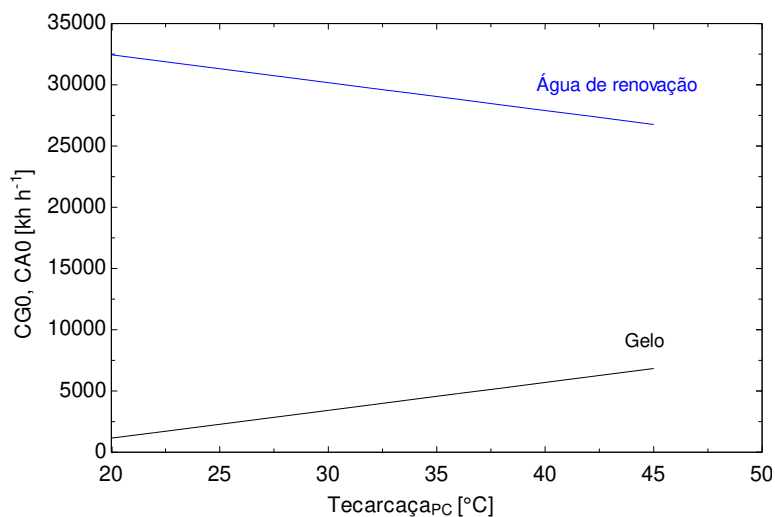
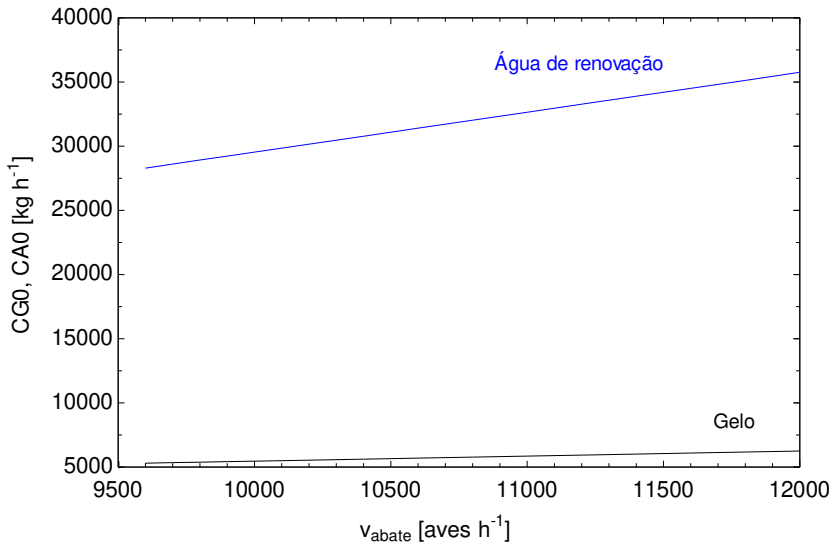


Figura 20 - Velocidade de abate *versus* demanda total de água e gelo



Com base na Figura 18, verifica-se que para um aumento do peso inicial da carcaça de frango de 1 a 3 kg, há uma necessidade de aumento da demanda de gelo total inserido nos resfriadores de $1,94 \cdot 10^3$ a $8,87 \cdot 10^3$ kg h^{-1} , associado a uma diminuição da quantidade demandada de água de renovação de $3,17 \cdot 10^4$ a $2,47 \cdot 10^4$ kg h^{-1} . Tal resultado é consequência da necessidade de manutenção do volume fixo dos resfriadores associado à uma saída de água contínua, de forma que o balanceamento das duas variáveis é necessário. A razão do requerimento de maior quantidade de gelo se deve ao fato do aumento da massa requerida para resfriamento. Uma vez que o gelo possui maior disponibilidade energética devido ao calor de fusão, uma maior quantia desta corrente é requerida.

Em relação ao aumento da temperatura intramuscular inicial da carcaça de frango de 20 °C a 45 °C, a Figura 19 mostra a necessidade de aumento da quantia total de gelo de $1,16 \cdot 10^3$ a $6,84 \cdot 10^3$ kg h^{-1} (20 a 45 °C), e de água de $3,24 \cdot 10^4$ a $2,68 \cdot 10^4$ kg h^{-1} , tendo como base os mesmos pressupostos expostos no parágrafo anterior. Em contrapartida, variando de 1 a 7 °C a temperatura final da carcaça e mantendo constante a temperatura de entrada de aproximadamente 38 °C, a variação observada para massa de água e gelo torna-se desprezível, permanecendo assim o valor de vazão de água de renovação total de $2,83 \cdot 10^4$ kg h^{-1} e vazão de gelo total de $5,3 \cdot 10^3$ kg h^{-1} devido à baixa contribuição da parcela de calor ligada à carcaça no *chiller* fase 2.

Para o acréscimo de velocidade da linha de abate de 9600 a 12000 aves h^{-1} mantendo os demais parâmetros de processo constantes, verifica-se a necessidade do aumento conjunto de vazão de água de renovação e gelo total em $2,83 \cdot 10^4$ a $3,57 \cdot 10^4$ kg h^{-1} , e $5,3 \cdot 10^3$ a $6,25 \cdot 10^3$ kg

h^{-1} , respectivamente. Todavia, para este último caso nota-se um aumento discreto em ambas as correntes, o que mostra a menor interferência da velocidade de abate em relação às características de peso e temperatura das carcaças de frango.

5.2 Análise exérgica e exergoeconômica

A

Tabela 8 apresenta os resultados de exergia das correntes e exergias destruídas obtidos através do *software* EES, tendo como base a modelagem matemática apresentada no item 4.2.

Tabela 8 – Exergias das correntes

Corrente	Ex (kJ h^{-1})	Corrente	Ex (kJ h^{-1})
Ex_{CA}	0	Ex_{CG3}	$2,47 \cdot 10^4$
Ex_{CA0}	$1,11 \cdot 10^5$	Ex_{CAM1}	$1,01 \cdot 10^3$
Ex_{CA1}	$4,65 \cdot 10^4$	Ex_{CAM2}	0
Ex_{CA2}	$2,59 \cdot 10^4$	Ex_{CAM3}	$1,04 \cdot 10^3$
Ex_{CA3}	$2,85 \cdot 10^4$	Ex_{CAM4}	0
Ex_{CA4}	0	Ex_{PC}	$5,22 \cdot 10^4$
Ex_{CA5}	$1,63 \cdot 10^4$	Ex_{CF1}	0
Ex_{CA6}	0	Ex_{CF2}	0
Ex_{CA7}	$3,14 \cdot 10^4$	W	$1,99 \cdot 10^4$
Ex_{CA8}	$3,78 \cdot 10^4$	Ex_{DAR}	$1,97 \cdot 10^4$
Ex_{AR0}	0	Ex_{DG}	0
Ex_{AR}	$1,84 \cdot 10^2$	Ex_{DA}	0
Ex_{CG0}	$2,47 \cdot 10^4$	Ex_{D1}	$8,98 \cdot 10^4$
$Ex_{CG(PC)}$	$7,22 \cdot 10^3$	Ex_{D2}	0
$Ex_{CG(CF1)}$	$8,93 \cdot 10^3$	Ex_{D3}	0
$Ex_{CG(CF2)}$	$8,60 \cdot 10^3$		

Sabendo que a perda de exergia é um indicador adequado do desempenho da conversão global de uma cadeia de conversão de energia, observa-se que, no sistema analisado, valores

significativos de exergias destruídas para a turbina de ar comprimido e pré-chiller (Ex_{DAR} e Ex_{D1}) e ausência de irreversibilidades dos trocadores de calor de água e gelo e chillers fase 1 e 2 (Ex_{DG} , Ex_{DA} , Ex_{D2} e Ex_{D3}). Tal resultado infere que algumas exergias disponíveis para utilização nas correntes do processo de pré-resfriamento em tela estão sendo desperdiçadas no meio devido à outras ineficiências de operação. Kotas (1995) menciona como causas mais comuns da destruição de exergia em processos de resfriamento o fluxo de calor que sai do sistema para o ambiente e da saída de massa com grande exergia do sistema para o ambiente sem reaproveitamento como trabalho mecânico e/ou como auxílio na redução da temperatura das carcaças do meio durante pré-resfriamento.

Acerca da eficiência exérgica dos equipamentos e custos exergoeconômicos, os valores obtidos pela modelagem matemática estão apresentadas na Tabela 9 e a Tabela 10, respectivamente.

Tabela 9 – Eficiência exérgica

Volume de controle	ϵ (%)
<i>Pré-chiller</i>	71,40
<i>Chiller fase 1</i>	44,28
<i>Chiller fase 2</i>	2,65
TC – Água de renovação	1,21
TC - Gelo	5,55
Turbina – Ar comprimido	0,93

Tabela 10 – Custo exergoeconômico específico para a carcaça de frango

Volume de controle	c (US\$ kJ^{-1})
<i>Pré-chiller</i>	$1,31 \cdot 10^{-4}$
<i>Chiller fase 1</i>	$1,31 \cdot 10^{-4}$
<i>Chiller fase 2</i>	$3,91 \cdot 10^{-4}$

De acordo com a Tabela 9, observa-se baixos valores de eficiência exérgica para o *chiller* fase 2, trocadores de calor de água de renovação e gelo e turbina de ar comprimido. Em relação aos resfriadores, estudo realizado por Passarelli (2017) mostra que a alternativa mais eficiente para aumento das eficiências exérgicas e consequente economia de energia é a

recirculação de água dos tanques em trocador de calor externo, de forma a aproveitar a elevada exergia disponível nas correntes de saída de água (Ex_{CA5} , Ex_{CA7} e Ex_{CA8}). Todavia, a recirculação aumenta a agitação da água nos tanques, sendo necessários cuidados especiais na higienização. Logo, torna-se necessário reavaliar o critério de cloro livre nos *chillers* e o acompanhamento microbiológico após higienização das tubulações de recirculação de água, uma vez que um mal procedimento de limpeza poderá ocasionar a formação de biofilmes de *Salmonella*. Ainda de acordo com Passarelli (2017), o encamisamento dos *chillers* representa uma opção inviável devido à falta de superfície necessária para troca térmica.

Para os trocadores de calor e turbina, por sua vez, o aumento da eficiência exérgica pode ser obtido através de ajustes na vazão de amônia e utilização de uma turbina com menor potência, respectivamente.

Considerando os resultados obtidos na Tabela 9 para os as exergias das carcaças de frango em cada estágio (Ex_{PC} , Ex_{CF1} e Ex_{CF2}) e seus os custos exergoeconômicos dados na Tabela 10, obtém-se taxas de custos de 6,83 US\$ h⁻¹ no pré-*chiller*, 1,05 US\$ h⁻¹ no *chiller* fase 1, 10,17 US\$ h⁻¹ no *chiller* fase 2, totalizando 18,05 US\$ h⁻¹ de custos exergoeconômicos relacionados ao resfriamento das carcaças de frango considerando o volume de abate de 9600 aves h⁻¹. Uma vez que o produto carrega as irreversibilidades dos componentes, quanto maior a eficiência alcançada com o componente, menor serão os custos pertinentes ao produto.

5.3 Avaliação microbiológica para a segurança alimentar

Os dados para avaliação microbiológica subdividem-se em 2 vertentes: processo e produto. A primeira seção apresenta a análise dos relatórios de ensaio recebidos para os pontos de renovação de água e água residente nos resfriadores, e a segunda seção mostra o perfil microbiológico da carcaça de frango submetida ao processo de pré-resfriamento no sistema em estudo.

5.3.1 Pontos de renovação de água e água residente dos *chillers*

Para o sistema de pré-resfriamento estudado, foram coletadas amostras para análise de contagem total de micro-organismos mesófilos, *Escherichia coli* e enterobactérias. Visto a

influência do teor de cloro livre e pH no perfil microbiológico do sistema, os seus valores médios no período analisado (janeiro a maio de 2019) também foram monitorados. Os padrões se encontram na Tabela 11:

Tabela 11 – Cloro livre e pH do gelo e água residente dos resfriadores

Parâmetros	Gelo	Pré-chiller	Chiller fase 1	Chiller fase 2
Cloro livre (ppm)	0,79 ± 0,32	2,37 ± 1,20	1,84 ± 1,00	2,47 ± 1,13
pH	7,49 ± 0,40	7,29 ± 0,33	7,38 ± 0,50	7,32 ± 0,37

Observa-se que os resultados obtidos para o teor de cloro livre se apresentam em conformidade com o valor máximo previsto pela Portaria nº 210/1998 do MAPA de 5 ppm para os resfriadores contínuos, e com o valor máximo de 2 ppm para o gelo conforme preconizado pela Portaria de Consolidação nº 5/2017 da ANVISA. Os valores de pH também vão de encontro à Portaria da ANVISA, uma vez que há a manutenção dos valores entre 6,0 a 9,5. Em relação ao teor de cloro livre nos resfriadores, verifica-se a necessidade de padronização dos valores em torno da quantidade máxima permitida de 5 ppm devido à sua forte influência na qualidade microbiológica da água e das carcaças de frango a serem resfriadas.

Tendo em base os parâmetros de processo do sistema de pré-resfriamento em estudo, os Gráficos 1, 2, 3 e 4 apresentam os resultados obtidos para contagem de mesófilos, contagem de enterobactérias e presença de *Escherichia coli* na água de renovação e água residente dos resfriadores no período de janeiro a maio de 2019.

Através dos gráficos obtidos, é notoriamente verificada a qualidade da água de renovação dos 3 resfriadores contidos no sistema de pré-resfriamento em estudo na qual apresentou, durante todo o período de análise, baixas contagens de mesófilos e enterobactérias e ausência de *E. coli*, validando a eficiência do processo de tratamento de água da empresa. Por outro lado, a água residente dos *chillers* merece atenção visto a presença e elevados valores para 100% dos micro-organismos relacionados.

Um dos principais reflexos destes últimos resultados podem ter como origem os procedimentos executados durante evisceração (ocasionadas por baixa eficiência operacional na retirada de contaminação gastrointestinal visível e/ou lavagem de carcaças, por exemplo); o manejo pré-abate onde, devido a presença de aves com grandes variações de peso, os maquinários não conseguem se manter ajustados de maneira eficaz, promovendo, assim, o rompimento de vísceras; as falhas no procedimento de higiene pré-operacional dos

equipamentos, entre outros. Apesar da complexidade envolvida, tal fato repercute-se na maior atenção quanto aos padrões de processo em cada etapa posterior ao sistema de pré-resfriamento para manutenção dos adequados padrões microbiológicos.

Gráfico 1 - Mesófilos aeróbios na água de renovação dos resfriadores

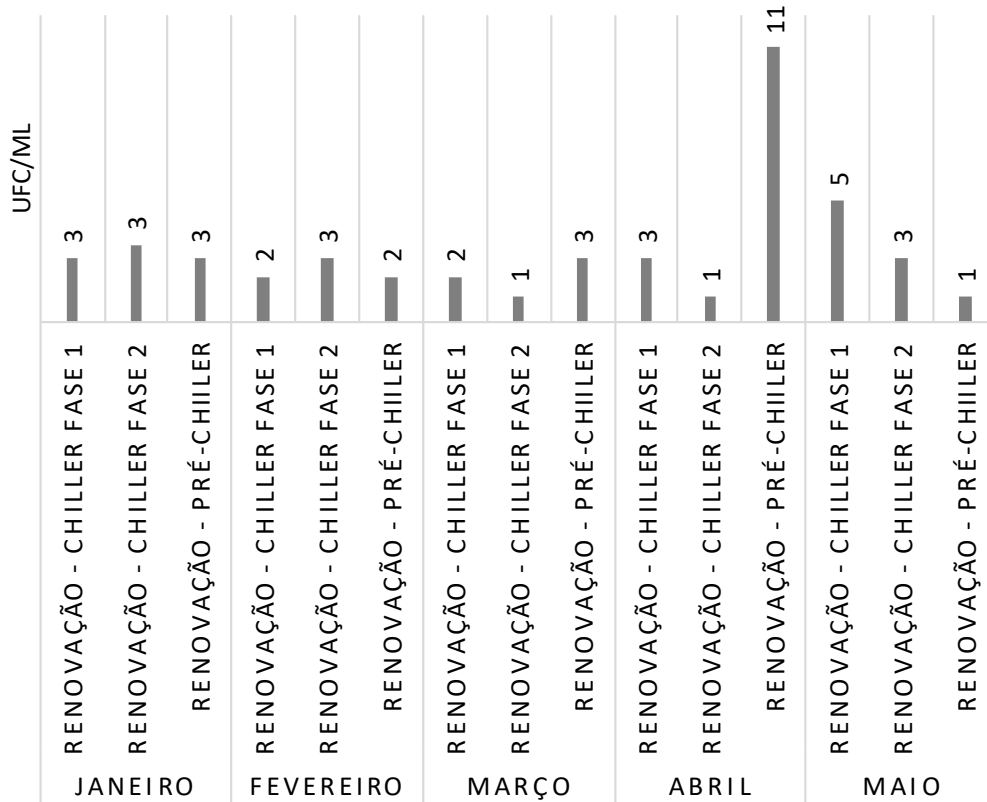


Gráfico 2 - Mesófilos aeróbios na água residente dos resfriadores

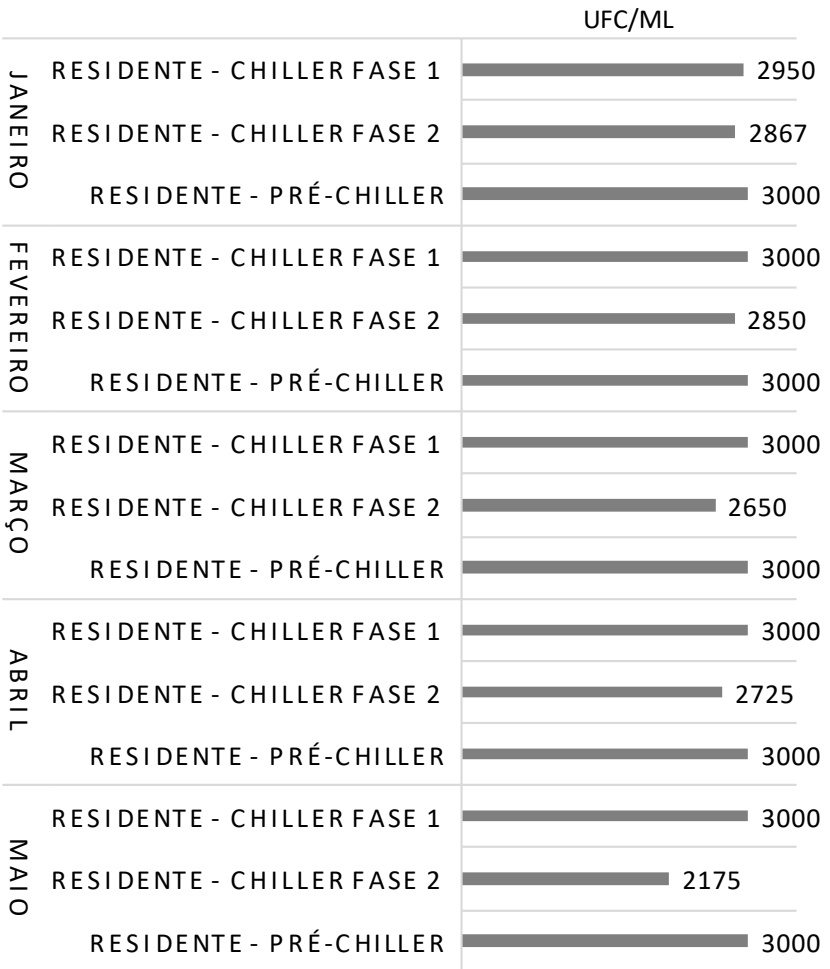


Gráfico 3 - Perfil de enterobactérias nos resfriadores

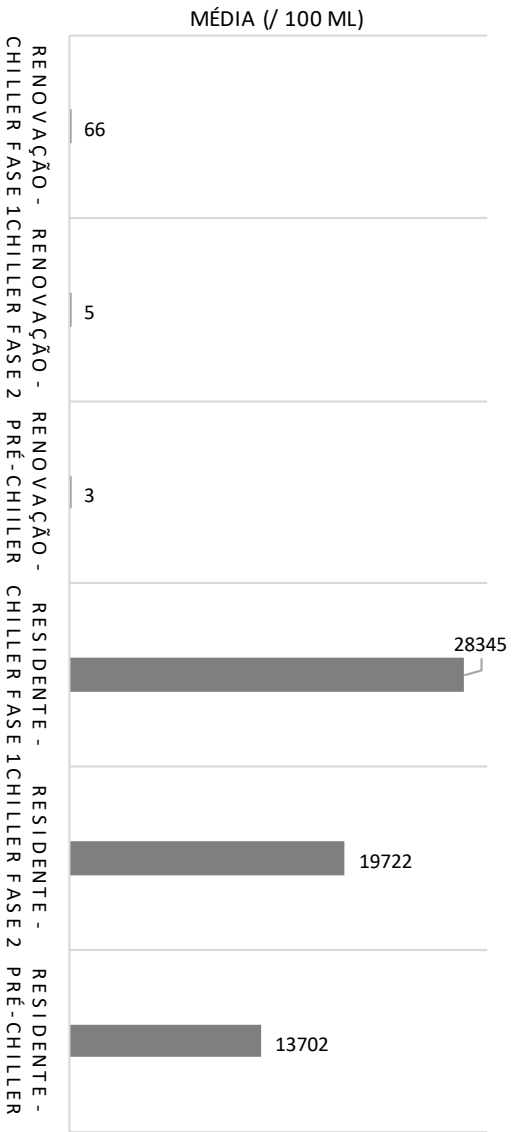
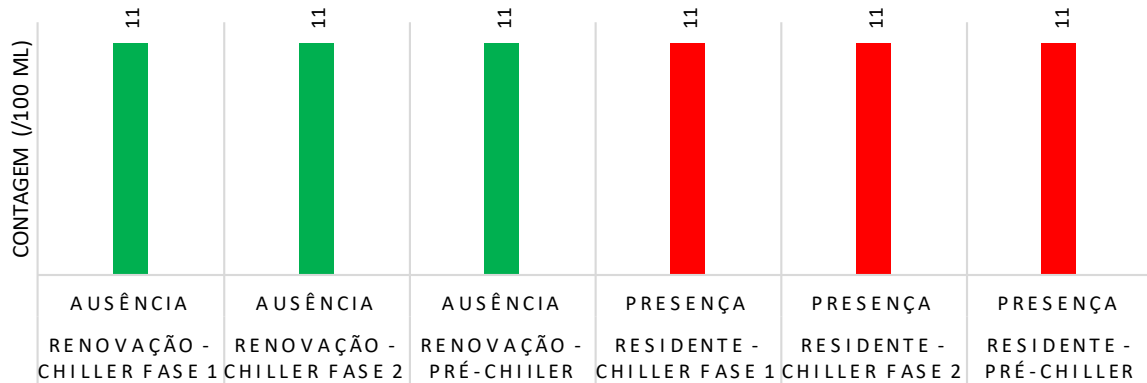


Gráfico 4 - Perfil de *Escherichia coli* nos resfriadores

5.3.2 Carcaça de frango antes e pós *chiller*

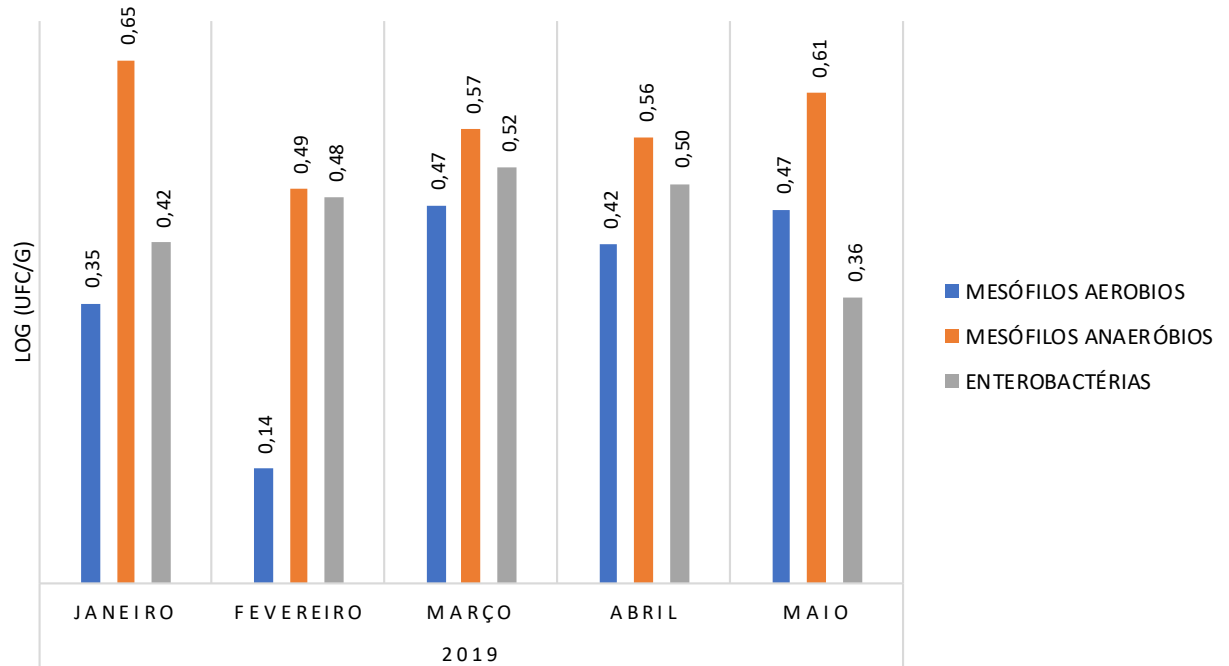
Para o *layout* do sistema de pré-resfriamento de carcaça de frango em questão, coletou-se também amostras para análise de micro-organismos mesófilos aeróbios, mesófilos anaeróbios, *E. coli* e enterobactérias nas carcaças de frango. Em relação aos micro-organismos mesófilos, a Tabela 13 apresenta a contagem média obtida antes e após o sistema de pré-resfriamento em estudo.

Tabela 12 – Contagem média de mesófilos aeróbios e anaeróbios em carcaças

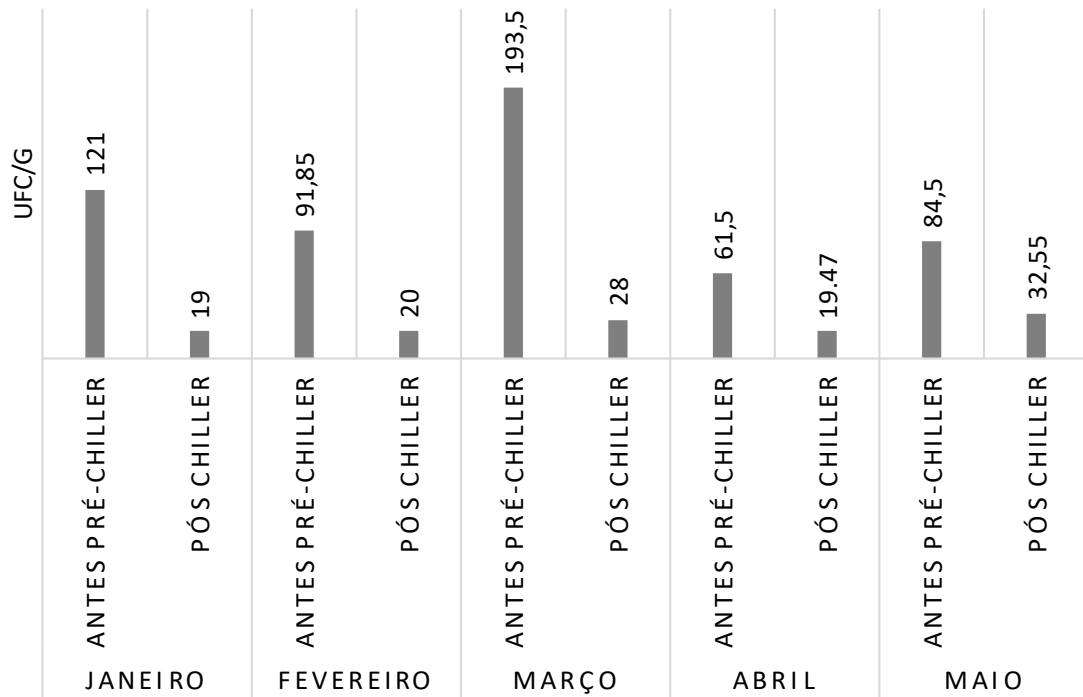
Localização	Mesófilos aeróbios (UFC g ⁻¹)	Mesófilos anaeróbios (UFC g ⁻¹)
Antes do pré-<i>chiller</i>	1,71 10 ⁴	1,50 10 ⁴
Após <i>chiller</i> fase 2	9,62 10 ³	4,11 10 ³

A partir do exposto, observa-se o pleno atendimento aos padrões estabelecidos pela Instrução Normativa nº 60/2019 para carne de frango, uma vez que todos os valores para mesófilos encontram-se abaixo de 10⁶ UFC g⁻¹. Ademais, verifica-se notável redução microbiológica após passagem pelo sistema de pré-resfriamento tendo em vista os parâmetros de teor de cloro livre praticados pela empresa. O perfil de redução decimal logarítmica resultante para mesófilos aeróbios, anaeróbios e enterobactérias nas carcaças de frango é apresentado no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Redução decimal em carcaças de frango submetidas ao pré-resfriamento em imersão em água



Conforme apresentado, todos os micro-organismos avaliados apresentaram decréscimo na contagem inicial, sendo o perfil de mesófilos aeróbios detectado com maior efetividade na redução (média de 0,58 log), seguidos das enterobactérias e mesófilos aeróbios (média 0,45 log e 0,37 log, respectivamente). Em relação à contagem de *E. coli*, o Gráfico 6 apresenta os resultados obtidos antes e após o sistema de pré-resfriamento.

Gráfico 6 - Perfil de *Escherichia coli* antes e após o sistema de pré-resfriamento

Levando-se também em consideração ao previsto na Instrução Normativa nº 60/2019, é verificado o atendimento à contagem máxima de $5 \cdot 10^3$ UFC g^{-1} de *E. coli* para a carne de frango em todos o período avaliado, aliado à expressiva redução após sistema de pré-resfriamento com água hiperclorada. Melhores resultados de redução microbiana podem ser obtidos mantendo-se a cloração da água dos resfriadores próxima ao valor máximo permitido de 5 ppm, aliado ao cumprimento da conformidade dos procedimentos sanitários operacionais anteriores à etapa de pré-resfriamento das carcaças de frango.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que tange à utilização dos recursos materiais e energéticos disponíveis, a análise da coleta de dados do sistema de pré-resfriamento demonstrou pleno atendimento quanto aos padrões normativos para a absorção de água e temperatura final da carcaça de frango, assim como proporcionou o acompanhamento do perfil de diminuição temperatura das carcaças durante passagem pelos resfriadores.

Em relação à obtenção da quantidade de gelo, água e energia demandadas, a modelagem matemática desenvolvida atendeu de forma satisfatória a obtenção dos parâmetros ora relacionados, no qual, com a utilização do *software* EES, foi possível prever o comportamento do valor total de água e gelo demandados quando da variação da temperatura/massa inicial da carcaça e velocidade da linha de abate, parâmetros estes verificados como principais influenciadores da relação dos recursos de utilidades envolvidas.

Quanto à eficiência do *layout*, a análise exérgica e exergoeconômica permitiram identificar partes do sistema onde ocorre maiores taxas de destruições de exérgia, de forma a auxiliar no melhor entendimento das alternativas para diminuição de tais ineficiências e dos custos relacionados com a diminuição de temperatura das carcaças de frango.

No que diz respeito à segurança alimentar e manutenção dos padrões microbiológicos, verifica-se que a contaminação por mesófilos, enterobactérias e *E. coli* em carcaças de frango sofreu importante redução após sua passagem pela etapa de pré-resfriamento, sendo decisiva para a aceitação dos lotes para comercialização apesar de constatada a necessidade de melhorias quanto à cloração e carga microbiológica da água residente. Em suma, o estudo desenvolvido para o *layout* da agroindústria estudada se mostrou adequado para atendimento dos parâmetros previstos na legislação vigente.

Como sugestão para trabalhos futuros, destaca-se a comparação entre sistemas de pré-resfriamento com e sem recirculação de água gelada quanto aos padrões materiais, energéticos, exérgicos, exergoeconômicos e microbiológicos envolvidos.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Água na indústria: uso e coeficientes técnicos**. Brasília: Agência Nacional das Águas, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE HIGIENE PESSOAL, PERFUMARIA E COSMÉTICOS. **Guia de Microbiologia**. Disponível em: <<https://abihpec.org.br/guia-microbiologia/files/assets/basic-html/page82.html>>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL. **Relatório anual 2019**. ABPA, p. 167, 2019.
- BACKES, R. G. **Utilização da lavagem de carcaças para redução microbiana após a evisceração de frangos de corte**. 2013. Dissertação (Pós-Graduação em Ciência Animal) – Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, 2013.
- BLEVINS, R. E. **Effects of pre-chiller temperature on the microbial ecology of whole bird carcass rinses**. 2017. 84 f. Thesis (Master of science in food science) - University of Arkansas, Fayetteville, 2017.
- BRASIL. Portaria n. 326, de 30 de julho de 1997. Aprova o Regulamento Técnico “Condições Higiênicas-Sanitárias e de Boas Práticas de Fabricação para Estabelecimentos Produtores/Industrializadores de Alimentos”. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 50, 1997.
- BRASIL. Portaria n. 210, de 10 de novembro de 1998. Aprova o regulamento técnico da inspeção tecnológica e higiênico-sanitária de carne de aves. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 46, 1998.
- BRASIL. Decreto n. 9013 de 29 de março de 2017. Regulamenta a Lei n. 1.283, de 18 de dezembro de 1950, e a Lei n. 7.889, de 23 de novembro de 1989, que dispõem sobre a inspeção industrial e sanitária de produtos de origem animal. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 105, 2017a.
- BRASIL. Portaria de Consolidação n.5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. **Ministério da Saúde**, Brasília, DF, p. 444, 2017b.
- BRASIL. Instrução Normativa n. 60, de 23 de dezembro de 2019 – Estabelece as listas de padrões microbiológicos para alimentos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ed 249, p. 133, 26 dez, 2019a.
- BRASIL. Portaria no 74, de 7 de maio de 2019. Altera a Portaria no 210, de 10 de novembro de 1998. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 1, 2019b.
- BRASIL. Resolução RDC n. 331, de 23 de dezembro de 2019 – Dispõe sobre os padrões microbiológicos de alimentos e sua aplicação. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 96, 26 dez, 2019c.

- CARCIOFI, B. A. M. **Estudo do resfriamento de carcaças de frango em chiller de imersão em água**. 2005. 110 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2005.
- CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Experimental results and modeling of poultry carcass cooling by water immersion. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, n. 2, p. 447–453, 2010.
- CARVALHO, A. N. **Análise experimental e exergoeconômica de um sistema compacto de cogeração a gás natural**. 2010. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.
- CASANI, S.; ROUHANY, M.; KNØCHEL, S. A discussion paper on challenges and limitations to water reuse and hygiene in the food industry. **Water Research**, v. 39, n. 6, p. 1134–1146, 2005.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa - uma abordagem prática**. 4. ed. New York: Mc Graw Hill, 2012.
- DINÇER, I. **Heat transfer in food cooling applications**. 1. ed. Washington: Taylor & Francis, 1997.
- FÁBREGA, F. DEM. **Otimização termoeconômica de sistemas de refrigeração do processo de produção de etileno e propileno**. 2010. 185 p. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2010.
- FAO/WHO. Joint FAO/WHO food standards programme. **Codex Alimentarius Comission**, p. 129, 2003.
- FRANCO, B. D. G. M; LANDGRAF, M. **Microbiologia dos alimentos**. 192 p. 1 ed. São Paulo: Editora Atheneu, 2004.
- FRINOX. **Chiller resfriador de aves**. Disponível em: <<http://frinox.ind.br/linhas-pt/aves>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- GERLOFF, J. **Reutilização de água de resfriamento de carcaças de frango**. 2008. 161 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.
- HAYES, P. R. **Food microbiology and hygiene**. 354 p. 2 ed. New York: Chapman and Hall, 1995.
- HUEZO, R. I. **Chilling of Broiler Carcasses: Microbiological and Quality Implications**. 2007. 149 p. Thesis (Master of science) - University of Georgia, Athens, 2007.
- INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P.; BERGMAN, T. **Fundamentos de transferência de calor e massa**, 6 ed, Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- JAMES, C. et al. The primary chilling of poultry carcasses-a review. **International Journal of Refrigeration**, v. 29, n. 6, p. 847–862, 2006.

KLASSEN, T. **Uso de redes neurais artificiais para modelagem da temperatura e da retenção de água no processo de resfriamento de carcaças de frango por imersão**. 2008. 69 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, 2008.

KLASSEN, T. et al. Modelagem do sistema de resfriamento por imersão de carcaças de frangos utilizando redes neurais artificiais. **Acta Scientiarum - Technology**, v. 31, n. 2, p. 201–205, 2009.

KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plant analysis**. 2. ed. Malabar, Florida: Krieger publishing company, 1995.

LATIMER, G.W. **Official methods of analysis of AOAC international**. v. 2, 20. ed, Washington: AOAC, 2016.

LAZARRETO, A.; TSATSARONIS, G. SPECOC: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. **Revista Energy**. v. 1, p. 1258-1289, 2002.

LIU, Y.; ZAO, Y.; FENG, X. Exergy analysis for a freeze-drying process. **Applied Thermal Engineering**, v. 8, n. 7, p. 675-690, 2008.

LOZANO, M. A.; VALERO, A.; SERRA, L. **Theory of exergetic cost and thermoeconomic optimization**. Zaragoza, Espanha: Publicação interna da Universidad de Zaragoza, 1993.

MARAN, J. P.L.; ANDRADE, C. M. G.; OLIVO, J. E. Software ExerGan – Análise preliminar de viabilidade termodinâmica e econômica de culturas agrícolas geradoras de biocombustíveis. **XI EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica**. 10 p. 2019.

MARTINS, T. D. et al. Modelagem da absorção de água por carcaças de frango durante o resfriamento por imersão. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 2011.

MATSUMURA, E. M. **Perspectivas para conservação e reúso de água na indústria de alimentos – estudo de uma unidade de processamento de frangos**. 2007. 250 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2007.

MEAD, G. C. **Poultry Meat Processing and Quality**. 1. ed. Washington: Woodhead Publishing Limited, 2004.

MEDEIROS NETO, J. L. **Análise comparativa das metodologias de estudo exergoeconômico para um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito**. 2018. 102 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PA, 2018.

MENDES, T. **Diagnóstico aplicado a um sistema de refrigeração por compressão a vapor**. 2012. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2012.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Projeções do Agronegócio - Brasil 2015/16 a 2015/26**. 8 ed. Brasília: 2017.

MORAN, M. J; SHAPIRO, H. N; BOETTNER, D. D; BAILEY, M. B. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

NAGEL, G. M. **Salmonella and campylobacter reduction and quality characteristics of poultry carcasses treated with various antimicrobials in a finishing chiller**. 2012. 91 p. Thesis (Master of science) - Auburn University, Alabama, 2012.

NEVES FILHO, L. DE C. **Estudo de algumas variáveis no resfriamento contínuo por imersão de frango**. 1978. 185 p. Dissertação (Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1978.

NORTHCUTT, J. K.; et al. Effect of commercial bird washers on broiler carcass microbiological characteristics. **Journal Applied Poultry Research**, v.12, p.435–438, 2003.

NORTHCUTT, J. K.; JONES, D. R. A survey of water use and common industry practices in commercial broiler processing facilities. **Journal of Applied Poultry Research**, v. 13, n. 1, p. 48–54, 2004.

PASSARELLI, G. L. **Resfriamento das carcaças de frango por imersão em água gelada. Avicultura Industrial**. 2017. Disponível em: <<https://www.aviculturaindustrial.com.br/imprensa/resfriamento-das-carcacas-de-frango-por-imersao-em-agua-gelada-por-geraldo-lobes/20170517-171652-K170>>. Acesso em: 19 jun. 2018.

PETRAK, T. et al. Bacteriological comparison of parallel and counter flow water chilling of poultry meat. **Meat science**, v. 53, n. 4, p. 269-271, 1999.

PIZATO, S.; CORTEZ-VEGA, W. R.; PRENTICE, S. Quality assessment of cooked chicken breast meat at different storage temperatures. **International Food Research Journal**, v. 22, n. 1, p. 143–154, 2015.

QUIJERA, J. A.; GARCÍA, A.; ALRIOLS, M. G.; LABIDI, J. Heat integration options based on pinch and exergy analyses of a thermosolar and heat pump in a fish tinning industrial process. **Energy**, v. 55, p. 464-474, 2013.

RAY, B. **Fundamental food microbiology**. 516 p. Boca Raton: CRC Press, 1996.

RIELLA, H. G.; GERLLOF, J. Descarga zero nos tanques de pré-resfriamento. **I Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais**, v. 1, p. 543–549, 2009.

RODRIGUES, L. G. G. **Resfriamento de carcaças de frango por imersão em água e ar forçado**. 2013. 119 p. Tese (Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.

ROWE, E. **Initial investigation of ice slurry as an alternate chiller medium in poultry processing**. 2016. 93 p. Thesis (Master of Science in mechanical engineering) - Georgia Institute of Technology, Athens, 2016.

SANT'ANNA, V. **Análise dos fatores que afetam a temperatura e absorção de água de carcaças de frango em chiller industrial**. 2008. 54 p. Monografia (Engenharia de alimentos) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.

SILVA, C. C. **A atribuição de custos em sistemas energéticos agropecuários: uma análise em emergia, termoeconomia e economia.** 2009. 174 P. Tese (Dissertação em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.

SILVA, M. C. **Avaliação da qualidade microbiológica de alimentos com a utilização de metodologias convencionais e do sistema simplate.** 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2003.

SILVA, N.; JUNQUEIRA, V. C. A.; SILVEIRA, N. F. A. **Manual de métodos de análise microbiológica de alimentos.** 259 p. São Paulo, Varela, 1997.

SVOBODOVÁ, I.; et al. Microbiological quality of broiler carcasses during slaughter processing. **Acta Veterinária Brno**, v.81, p.037-042, 2012.

TAKAKI, A. T. **Análise do aproveitamento do gás natural em plantas de cogeração e trigeração de energia em indústrias frigoríficas.** 2006. 159 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, SP, 2006.

TEIXEIRA, G. S. **Aproveitamento de energia da água dos chillers.** 2014. 44 p. Monografia (Especialização em eficiência energética aplicada aos processos produtivos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.

TIWARI, G. N.; DAS, T.; CHEN, R. C.; BARNWAL, P. Energy and exergy analyses of greenhouse fish drying. **International Journal of Exergy**, v. 6, p. 620-636, 2009.

TSATSARONIS, G. **Thermoeconomics analysis and optimization of energy systems.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 19, p. 227-257, 1993.

UKIDWE, M. S. **Development and validation of heat and mass transfer model for immersion chilling of chicken carcasses.** 2017. 108 p. Thesis (Master of science) - University of Georgia, Athens, 2017.

VIANA, J. C. **Aspectos do resfriamento de carcaças de frango na indústria (uma revisão).** 2016. 42 p. Monografia (Faculdade de agronomia e medicina veterinária) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

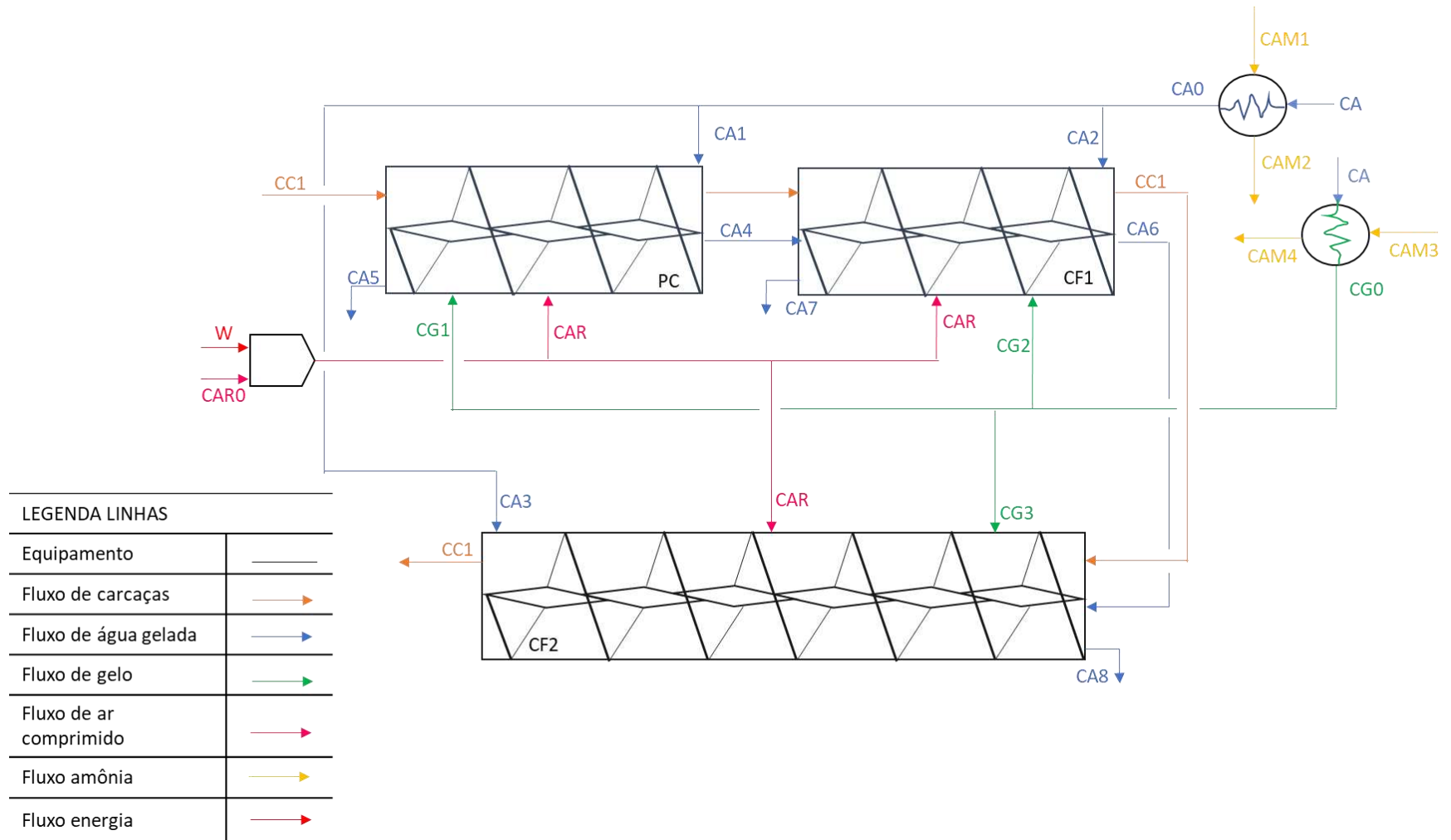
VOIDAROU, C. et al. Aerobic and anaerobic microbiology of the immersion chilling procedure during poultry processing. **Poultry Science**, v. 86, n. 6, p. 1218–1222, 2007.

WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2018: Soluções baseadas na Natureza para a gestão da água - Fato e dados. **UNESCO**, p. 1–12, 2018.

YOUNG, L. L.; SMITH, D. P. Moisture retention by water- and air-chilled chicken broilers during processing and cutup operations. **Poultry Science**, v. 83, n. 1, p. 119–122, 2004.

ZISOPOULOS, F. K.; ROSSIER-MIRANDA, F. J.; GOOT, A. J.; BOOM, R. M. The use of exergetic indicators in the food industry – A review. **Food science and nutrition**, v. 57, n. 1, p. 197-211, 2017.

APÊNDICE A - Fluxograma do processo de resfriamento de carcaças de frango



APÊNDICE B – Dados coletados para análise de absorção e variação de temperatura das carcaças de frango

(continua)

DATA	HORA	Hora de entrada no pré-chiller (horas)	Hora de saída no chiller fase 2 (horas)	CARÇAÇA 1						CARÇAÇA 2						CARÇAÇA 3					
				Peso i (kg)	Peso f (kg)	W (kg/kg)	Ti (°C)	Tf (°C)	ΔT (°C)	Peso i (kg)	Peso f (kg)	W (kg/kg)	Ti (°C)	Tf (°C)	ΔT (°C)	Peso i (kg)	Peso f (kg)	W (kg/kg)	Ti (°C)	Tf (°C)	ΔT (°C)
14/05/19	07:34	8,13	9,43	2,190	2,250	0,0274	39,600	7,000	32,600	2,349	2,375	0,0111	38,700	9,000	29,700	2,389	2,450	0,0255	36,700	5,000	31,700
14/05/19	14:31	14,67	16,25	2,058	2,147	0,0432	40,500	3,400	37,100	2,384	2,435	0,0214	41,200	5,600	35,600	2,376	2,438	0,0261	39,800	6,800	33,000
15/05/19	07:37	7,77	9,53	2,353	2,405	0,0221	40,200	5,700	34,500	1,999	2,240	0,1206	38,700	5,400	33,300	2,449	2,505	0,0229	38,000	4,900	33,100
15/05/19	15:55	16,20	17,67	1,876	1,937	0,0325	38,200	2,800	35,400	2,026	2,062	0,0178	36,700	5,000	31,700	1,860	1,927	0,0360	36,500	2,800	33,700
16/05/19	08:33	8,80	10,17	1,927	1,975	0,0249	34,700	4,000	30,700	1,756	1,935	0,1019	35,800	4,600	31,200	1,859	1,863	0,0022	38,200	4,900	33,300
16/05/19	13:50	14,05	15,33	1,912	2,012	0,0523	40,100	3,400	36,700	1,920	1,982	0,0323	39,400	5,700	33,700	1,652	1,712	0,0363	39,800	4,900	34,900
17/05/19	07:43	8,10	9,75	1,980	2,015	0,0177	34,700	5,900	28,800	1,985	2,020	0,0176	36,900	4,800	32,100	2,032	2,075	0,0212	35,100	5,600	29,500
17/05/19	14:00	14,20	15,87	2,472	2,530	0,0235	38,200	6,900	31,300	1,884	1,975	0,0483	38,000	4,100	33,900	1,785	1,888	0,0577	40,500	4,600	35,900
20/05/19	08:12	8,42	10,08	1,796	1,830	0,0189	37,000	6,000	31,000	1,593	1,635	0,0264	38,000	4,800	33,200	1,774	1,815	0,0231	37,200	5,900	31,300
20/05/19	16:15	16,67	18,37	1,678	1,720	0,0250	38,000	3,000	35,000	1,790	1,854	0,0358	38,700	3,900	34,800	1,498	1,579	0,0541	37,400	3,400	34,000
21/05/19	08:04	8,23	9,75	2,242	2,260	0,0080	38,000	5,800	32,200	2,267	2,285	0,0079	35,900	5,900	30,000	1,995	2,030	0,0175	35,000	6,000	29,000
21/05/19	14:46	15,17	16,78	2,394	2,433	0,0163	39,600	5,000	34,600	1,852	1,898	0,0248	38,200	5,900	32,300	2,463	2,497	0,0138	38,000	5,400	32,600
22/05/19	07:53	8,12	9,50	2,760	2,785	0,0091	40,700	5,900	34,800	2,435	2,480	0,0185	34,600	6,000	28,600	2,528	2,565	0,0146	31,000	6,800	24,200
22/05/19	16:52	17,02	18,58	1,878	1,931	0,0282	41,500	4,600	36,900	1,701	1,774	0,0429	41,700	3,900	37,800	1,857	1,957	0,0539	42,400	7,000	35,400
23/05/19	07:55	8,15	9,75	2,019	2,035	0,0079	35,700	5,900	29,800	1,613	1,640	0,0167	35,900	4,900	31,000	1,770	1,780	0,0056	35,900	5,000	30,900
23/05/19	15:07	15,45	16,87	1,727	1,777	0,0290	37,600	3,700	33,900	1,815	1,850	0,0193	37,000	3,400	33,600	1,853	1,906	0,0286	38,900	3,000	35,900
24/05/19	07:53	8,05	9,83	2,134	2,190	0,0262	40,000	4,900	35,100	1,763	1,785	0,0125	38,600	5,100	33,500	2,164	2,185	0,0097	39,400	5,400	34,000
24/05/19	15:13	15,50	15,85	1,760	1,788	0,0159	38,600	4,000	34,600	1,847	1,874	0,0146	38,400	4,100	34,300	1,733	1,754	0,0121	37,600	4,300	33,300
27/05/19	07:50	8,13	9,03	1,840	1,870	0,0163	40,000	5,900	34,100	2,009	2,060	0,0254	58,600	4,800	53,800	1,796	1,840	0,0245	39,700	6,000	33,700
27/05/19	21:41	22,00	23,23	1,515	1,531	0,0106	37,000	2,000	35,000	1,350	1,379	0,0215	37,400	3,000	34,400	1,245	1,270	0,0201	36,000	3,200	32,800
28/05/19	14:56	15,25	16,92	1,599	1,625	0,0163	37,400	5,400	32,000	1,624	1,663	0,0240	38,000	4,400	33,600	2,066	2,127	0,0295	38,400	5,000	33,400

(conclusão)

DATA	HORA	Hora de entrada no pré-chiller (horas)	Hora de saída no chiller fase 2 (horas)	CARÇAÇA 1						CARÇAÇA 2						CARÇAÇA 3					
				Peso i (kg)	Peso f (kg)	W (kg/kg)	Ti (°C)	Tf (°C)	ΔT (°C)	Peso i (kg)	Peso f (kg)	W (kg/kg)	Ti (°C)	Tf (°C)	ΔT (°C)	Peso i (kg)	Peso f (kg)	W (kg/kg)	Ti (°C)	Tf (°C)	ΔT (°C)
29/05/19	08:09	8,33	9,67	1,635	1,659	0,0147	38,900	4,800	34,100	1,972	2,050	0,0396	38,600	4,000	34,600	2,006	2,018	0,0060	37,900	5,800	32,100
29/05/19	15:00	15,17	16,73	1,697	1,747	0,0295	42,300	4,000	38,300	1,707	1,746	0,0228	39,700	4,400	35,300	1,743	1,786	0,0247	40,200	4,600	35,600
30/05/19	08:36	8,75	10,17	2,381	2,406	0,0105	31,600	4,800	26,800	1,515	1,539	0,0158	34,900	5,900	29,000	2,342	2,368	0,0111	38,600	6,400	32,200
30/05/19	14:46	15,00	16,08	1,699	1,730	0,0182	40,700	6,800	33,900	1,788	1,880	0,0515	41,600	6,500	35,100	1,610	1,731	0,0752	39,700	6,900	32,800
31/05/19	09:50	10,15	11,83	2,858	2,869	0,0038	34,800	5,000	29,800	2,405	2,429	0,0100	36,800	5,000	31,800	2,786	2,794	0,0029	36,900	5,000	31,900
31/05/19	14:39	15,00	16,80	1,949	2,018	0,0354	38,800	3,600	35,200	2,308	2,536	0,0988	39,400	3,800	35,600	2,181	2,319	0,0633	39,100	3,400	35,700
01/06/19	07:44	7,92	9,33	2,349	2,358	0,0038	38,900	5,100	33,800	2,272	2,301	0,0128	34,800	4,800	30,000	1,896	1,946	0,0264	37,000	4,400	32,600
03/06/19	08:19	8,48	9,75	2,002	2,018	0,0080	39,400	3,900	35,500	2,236	2,242	0,0027	38,600	4,000	34,600	1,676	1,689	0,0078	38,000	4,300	33,700
03/06/19	14:00	14,48	15,80	1,590	1,627	0,0233	38,700	6,600	32,100	1,718	1,763	0,0262	39,900	6,800	33,100	1,953	2,001	0,0246	40,900	6,000	34,900

Legenda:

Peso i = peso inicial da carcaça

Peso f = peso final da carcaça

W = fração de água absorvida (Peso f / Peso i)

Ti = temperatura inicial da carcaça

Tf = temperatura final da carcaça

ΔT = variação de temperatura (Tf - Ti)

APÊNDICE C – Dados coletados para determinação dos parâmetros de processo na sala de pré-resfriamento

(continua)

DATA	HORA	Temp ambiente (°C)	Temperatura da água de renovação do pré-chiller (°C)	Temperatura do pré-chiller (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 1 (°C)	Temperatura do chiller fase 1 (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 2 (°C)	Temperatura do chiller fase 2 (°C)
10/05/2019	06:48	17,8	3,5	11,3	2,1	2,0	2,7	2,7
10/05/2019	08:27	17,6	3,6	12,1	3,3	2,3	2,6	3,3
10/05/2019	10:08	17,5	3,7	14,2	3,1	2,2	-	3,4
10/05/2019	11:51	18,0	3,4	16,0	3,0	2,5	-	2,3
10/05/2019	14:15	17,2	2,1	13,8	4,9	2,4	4,0	2,0
10/05/2019	16:20	16,9	2,4	14,8	3,0	2,1	3,1	1,8
10/05/2019	18:19	18,1	3,0	15,2	2,6	2,0	3,0	1,9
10/05/2019	22:10	16,2	2,0	15,3	2,9	1,8	2,9	1,4
13/05/2019	04:49	14,3	3,6	11,3	2,1	3,2	4,0	3,0
13/05/2019	06:50	14,4	3,7	10,8	2,6	3,0	3,8	2,2
13/05/2019	08:41	14,8	3,3	16,0	2,8	3,2	3,9	2,5
13/05/2019	10:21	16,2	3,0	17,0	7,8	13,3	3,6	2,4
13/05/2019	12:18	16,8	2,8	9,8	7,3	3,3	3,4	2,1
13/05/2019	14:22	19,6	2,0	14,0	5,0	2,3	2,0	1,9
13/05/2019	16:20	16,9	6,0	13,7	4,0	4,4	3,0	2,3
13/05/2019	20:25	17,2	2,1	11,4	4,4	2,8	3,0	1,1
13/05/2019	22:22	18,0	3,4	13,6	5,0	4,1	3,6	1,2
14/05/2019	04:55	22,0	2,8	12,3	6,7	7,0	2,2	2,0
14/05/2019	06:40	22,4	3,0	16	6,8	6,9	2,8	2,1
14/05/2019	08:31	20,2	3,3	14,7	5,6	5,0	2,6	2,0
14/05/2019	10:10	17,8	3,1	10,8	5,4	4,0	2,3	2,1
14/05/2019	12:18	21,7	3,0	11,4	5,0	4,3	2,0	2,2

(continua)

DATA	HORA	Temp ambiente (°C)	Temperatura da água de renovação do pré-chiller (°C)	Temperatura do pré-chiller (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 1 (°C)	Temperatura do chiller fase 1 (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 2 (°C)	Temperatura do chiller fase 2 (°C)
14/05/2019	14:27	18,7	3,3	15,6	6,0	8,3	3,0	2,4
14/05/2019	16:24	17,0	3,0	17,0	5,0	7,1	3,4	2,0
14/05/2019	18:21	19:12	2,9	14,6	4,7	6,9	3,1	1,8
14/05/2019	20:29	20,4	3,0	15,0	5,4	3,4	3,0	1,2
14/05/2019	22:22	18,2	4,0	14,8	6,0	5,6	4,0	2,6
15/05/2019	04:54	19,2	3,5	14	4,6	4,0	3,4	2,6
15/05/2019	05:51	19,7	3,6	13,8	4,7	4,3	3,5	2,8
15/05/2019	06:47	20,0	3,2	14	5,0	3,8	3,7	3,0
15/05/2019	08:33	19,8	3,3	13,6	4,3	3,2	3,3	3,0
15/05/2019	12:18	19,0	3,6	13,8	4,0	3,3	3,0	3,3
15/05/2019	14:26	17,0	3,0	12	4,4	4,7	3,0	1,3
15/05/2019	16:30	16,1	2,7	14,8	5,0	3,8	3,0	1,7
15/05/2019	18:35	17,0	3,0	13,4	4,6	7,7	3,0	1,6
15/05/2019	20:31	16,6	4,0	13,7	4,6	2,3	3,0	1,0
15/05/2019	22:27	17,7	3,0	13,8	4,0	4,3	3,0	1,7
16/05/2019	14:28	16,0	3,2	9,7	4,1	3,6	3,0	1,0
16/05/2019	16:30	17,8	4,0	16,2	4,0	3,8	2,0	1,1
16/05/2019	18:34	16,7	2,7	12,4	5,0	5,4	3,0	2,0
16/05/2019	20:31	16,4	2,4	3,6	4,4	1,7	2,4	2,0
16/05/2019	22:29	17,0	3,4	11,4	4,6	3,0	3,6	1,6
17/05/2019	14:29	17,0	2,7	11,7	4,3	2,0	3,0	2,6
17/05/2019	16:26	17,1	2,7	14,7	4,0	4,1	2,7	1,6
17/05/2019	18:30	15,0	2,0	12,0	3,6	2,8	2,4	2,7
17/05/2019	20:28	16,7	3,1	10,7	5,0	4,8	3,0	1,2

(continua)

DATA	HORA	Temp ambiente (°C)	Temperatura da água de renovação do pré-chiller (°C)	Temperatura do pré-chiller (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 1 (°C)	Temperatura do chiller fase 1 (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 2 (°C)	Temperatura do chiller fase 2 (°C)
17/05/2019	22:34	16,0	3,0	10,0	5,0	5,0	3,0	1,6
20/05/2019	04:40	13,8	3,1	12,0	3,3	2,2	3,6	2,0
20/05/2019	06:38	14,6	2,7	12,8	3,1	2,6	3,3	3,1
20/05/2019	08:36	16,7	2,6	12,7	3,2	2,8	3,1	3,3
20/05/2019	10:09	16,5	3,0	13,3	2,7	3,1	2,7	3,0
20/05/2019	12:18	14,3	3,3	13	2,6	3,0	3,3	3,0
20/05/2019	14:25	17,6	3,0	11	5,0	5,4	3,0	1,2
20/05/2019	16:31	17,8	3,0	14	6,1	4,7	3,0	1,7
20/05/2019	18:29	15,2	1,4	13,6	4,0	2,6	1,1	2,0
20/05/2019	20:34	15,0	2,6	8,7	4,0	2,6	3,0	1,4
20/05/2019	22:28	14,6	3,7	12,6	3,4	3,0	3,7	1,6
21/05/2019	04:41	13,8	3,6	13,5	2,6	2,1	2,0	3,0
21/05/2019	06:42	16,3	3,5	12,1	2,4	2,0	2,1	2,4
21/05/2019	08:35	14,5	3,3	14,5	2,0	2,2	2,3	2,0
21/05/2019	10:21	16,8	3,0	10,8	2,0	2,3	2,7	2,1
21/05/2019	14:30	18,0	3,0	11,3	4,6	4,4	4,0	2,0
21/05/2019	16:28	17,0	3,0	15,7	5,0	9,0	3,0	3,0
21/05/2019	18:24	18,0	3,4	13,8	5,0	7,5	3,0	2,0
21/05/2019	22:32	15,0	3,0	9,7	4,7	2,0	3,0	1,4
22/05/2019	04:56	13,6	3,3	2,8	-	2,0	3,1	2,1
22/05/2019	06:53	14,8	2,8	2,6	2,1	2,1	4,0	2,0
22/05/2019	08:48	15,6	2,4	2,4	0,0	2,2	3,3	2,3
22/05/2019	10:40	15,8	3,1	2,3	2,3	2,5	3,5	2,6
22/05/2019	12:19	18,3	3,0	2,0	-	2,3	3,6	2,1

(continua)

DATA	HORA	Temp ambiente (°C)	Temperatura da água de renovação do pré-chiller (°C)	Temperatura do pré-chiller (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 1 (°C)	Temperatura do chiller fase 1 (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 2 (°C)	Temperatura do chiller fase 2 (°C)
23/05/2019	05:28	14,3	2,3	13,2	2,1	1,9	3,4	3,4
23/05/2019	07:21	10,8	2,0	10,8	2,0	3,3	3,2	2,3
23/05/2019	08:18	16,8	4,0	14	3,7	3,5	-	2,9
23/05/2019	10:03	18,7	4,3	14,2	4,3	3,2	-	2,7
23/05/2019	12:00	21	5,3	14	5,1	4,0	-	3,2
23/05/2019	14:39	22	3,5	7,0	5,6	2,4	3,6	1,6
23/05/2019	16:34	16,7	2,4	13,7	5,7	3,7	3,0	2,0
23/05/2019	18:31	15,9	2,6	13,4	6,0	6,4	3,0	1,6
23/05/2019	22:28	14,6	3,4	9,0	4,0	3,8	3,4	2,0
23/05/2019	14:30	16,8	3,0	10,0	4,4	4,7	3,0	3,0
23/05/2019	16:40	16,9	3,0	10,3	4,3	3,0	3,0	1,7
23/05/2019	18:34	18,0	2,7	11,0	4,4	2,0	3,0	1,6
23/05/2019	22:36	16,0	5,0	12,7	5,0	3,0	5,0	1,7
24/05/2019	04:55	19,7	3,4	10,8	4,4	3,6	3,0	3,1
24/05/2019	06:48	18,5	3,2	11,4	4,3	4,4	2,9	3,0
24/05/2019	08:33	18,0	3,5	11,4	4,0	4,0	2,7	2,2
24/05/2019	10:11	16,3	3,0	12,5	3,3	2,3	2,6	2,3
24/05/2019	12:04	14,8	3,3	13,3	3,1	2,7	2,4	2,5
24/05/2019	14:36	16,4	3,0	9,4	4,0	3,6	3,0	2,4
24/05/2019	16:32	15,0	2,0	5,0	4,0	2,4	1,4	1,7
24/05/2019	18:30	16,0	3,0	1,2	4,3	2,9	2,5	1,1
24/05/2019	22:24	18,0	2,7	14,5	4,0	5,6	2,0	1,8
27/05/2019	04:51	14,3	2,1	10,0	1,9	2,3	2,2	2,0
27/05/2019	06:48	15,6	2,3	9,8	2,2	2,0	2,0	2,1

(continua)

DATA	HORA	Temp ambiente (°C)	Temperatura da água de renovação do pré-chiller (°C)	Temperatura do pré-chiller (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 1 (°C)	Temperatura do chiller fase 1 (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 2 (°C)	Temperatura do chiller fase 2 (°C)
27/05/2019	08:40	14,2	3,3	12,0	2,3	1,8	2,3	2,0
27/05/2019	10:33	14,4	3,0	11,3	2,0	1,7	3,3	2,2
27/05/2019	12:19	14,7	3,0	11,0	7,0	2,0	5,9	2,6
27/05/2019	14:31	15,4	3,0	10,2	5,0	3,0	3,4	1,0
27/05/2019	16:35	15,7	3,0	3,8	6,0	2,0	4,0	2,1
27/05/2019	18:32	14,9	3,1	2,4	4,7	1,4	2,4	1,4
27/05/2019	22:32	15,0	3,6	2,6	4,0	1,0	2,6	1,6
28/05/2019	04:55	18,4	3,0	10,6	12,25	3,6	2,9	2,4
28/05/2019	06:47	17,6	3,2	10,4	12,25	3,3	2,7	2,2
28/05/2019	08:36	14,8	3,0	10,3	12,2	3,0	2,3	2,0
28/05/2019	10:31	15,3	2,8	11,3	11,75	3,3	2,1	2,2
28/05/2019	14:32	16,0	3,0	7,2	4,0	3,5	3,0	2,0
28/05/2019	16:30	16,0	3,0	11,0	4,0	3,0	3,0	2,0
28/05/2019	18:28	18,0	3,0	10,7	5,0	4,1	3,0	2,1
28/05/2019	22:31	17,0	12,6	12,6	6,0	4,7	3,4	2,0
28/05/2019	12:19	14,8	2,3	12,1	12,05	2,7	2,0	2,3
29/05/2019	04:53	14,6	2,3	10,8	2,1	2,0	2,6	2,1
29/05/2019	06:50	14,8	2,1	11,3	2,0	2,3	2,8	2,0
29/05/2019	8:35	18,6	3,9	12,3	2,1	3,4	2,0	2,3
29/05/2019	10:20	18,8	3,2	12,1	2,2	3,0	2,2	3,0
29/05/2019	12:13	18,0	3,4	13,0	2,4	3,3	2,8	3,3
29/05/2019	14:37	17,7	2,7	12,0	5,2	6,6	2,7	1,4
29/05/2019	16:34	16,7	3,0	12,0	6,0	3,8	3,0	2,4
29/05/2019	18:31	15,0	2,0	13,1	5,4	4,6	2,0	2,7

(continua)

DATA	HORA	Temp ambiente (°C)	Temperatura da água de renovação do pré-chiller (°C)	Temperatura do pré-chiller (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 1 (°C)	Temperatura do chiller fase 1 (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 2 (°C)	Temperatura do chiller fase 2 (°C)
29/05/2019	22:33	17,4	4,0	13,0	5,4	4,0	4,0	3,0
30/05/2019	04:58	14,8	2,1	10,8	2,3	1,8	2,0	2,1
30/05/2019	06:47	13,6	1,8	11,3	2,0	2,1	2,3	2,1
30/05/2019	08:46	12,8	1,9	10,5	1,8	2,1	2,7	2,0
30/05/2019	10:25	13,3	2,1	9,8	2,0	2,3	2,3	2,1
30/05/2019	12:13	19,4	2	13,4	1,9	2,0	2,7	2,0
30/05/2019	14:30	19,4	2,6	10,4	4,0	3,7	2,6	2,0
30/05/2019	16:29	18,0	2,4	11,0	4,6	3,0	2,6	1,6
30/05/2019	18:27	16,0	9,0	13,0	6,0	4,5	3,5	3,0
30/05/2019	20:25	14,0	3,0	9,7	5,0	3,0	3,0	1,2
30/05/2019	22:28	17,0	3,0	14,0	4,6	4,4	3,0	2,4
31/05/2019	04:59	13,8	2,2	12,2	1,8	2,0	2,0	1,9
31/05/2019	05:50	14,5	2,3	10,8	2,1	2,2	1,9	1,6
31/05/2019	06:53	14,7	2,1	11,4	2,0	2,3	1,8	2,1
31/05/2019	08:41	16,3	2,0	10,8	2,1	2,0	2,1	2,0
31/05/2019	10:19	18,3	1,8	11,4	2,3	2,1	2,0	1,9
31/05/2019	12:14	16,5	2,1	12,3	2,1	2,0	2,1	1,8
31/05/2019	14:34	16,1	3,2	9,0	5,0	3,6	3,2	3,2
31/05/2019	16:31	17,0	3,0	14,4	5,0	5,8	3,4	2,0
31/05/2019	18:29	17,9	6,4	14,0	9,0	3,7	6,0	2,0
31/05/2019	22:30	17,0	9,7	9,7	4,0	2,0	3,0	1,0
01/06/2019	04:58	13,6	2,0	10,6	2,0	3,3	2,7	2,0
01/06/2019	06:50	14,5	2,7	13,0	2,2	2,7	2,3	2,0
01/06/2019	08:41	14,8	2,3	13,4	2,8	2,2	2,1	2,2

(conclusão)

DATA	HORA	Temp ambiente (°C)	Temperatura da água de renovação do pré-chiller (°C)	Temperatura do pré-chiller (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 1 (°C)	Temperatura do chiller fase 1 (°C)	Temperatura da água de renovação do chiller fase 2 (°C)	Temperatura do chiller fase 2 (°C)
01/06/2019	10:24	14,6	2,1	12,0	2,1	2,0	2,3	2,0
01/06/2019	12:16	16,7	2,0	11,3	1,8	2,2	2,1	2,2
01/06/2019	14:32	16,3	3,0	11,7	5,0	4,0	3,4	2,0
01/06/2019	16:30	17,0	5,4	13,7	7,0	5,0	6,0	3,0
01/06/2019	18:28	16,4	4,0	14,0	6,4	4,9	3,7	2,1
01/06/2019	22:34	15,4	3,0	11,4	5,0	2,0	3,0	1,6
03/06/2019	04:00	14,3	2,7	2,0	2,3	1,9	2,3	2,0
03/06/2019	06:00	12,6	2,3	2,2	2,5	1,8	2,0	2,1
03/06/2019	08:00	14,8	2,5	2,1	2,3	1,6	1,9	2,0
03/06/2019	10:00	13,5	2,0	1,3	2,2	2,0	2,5	2,2
03/06/2019	12:00	13,8	2,1	1,8	2,0	2,1	2,2	2,0
03/06/2019	14:30	16,4	2,4	12,0	5,0	4,0	3,0	2,0
03/06/2019	16:28	17,7	3,2	10,0	4,0	7,0	4,0	3,3
03/06/2019	18:29	15,7	3,0	12,0	5,0	5,1	3,0	2,0
03/06/2019	22:36	15,6	3,0	12,0	5,0	4,0	3,0	1,4

APÊNDICE D – Memorial de cálculo EES

"BALANÇO DE ENERGIA - SISTEMA DE PRÉ-RESFRIAMENTO DE CARÇAÇAS DE FRANGO POR IMERSÃO EM ÁGUA"

"Dados - carcaça"

v_abate = 9600 [ave / h] "velocidade da linha de abate"
 p_carcaça = 1.97 [kg / ave] "peso médio da carcaça de frango - dado coletado"
 cp_carcaça = 0.80 [kcal / kg C] "calor específico da carcaça de acordo com Neves Filho (1978)"
 rho_carcaça = 1070 [kg/m³] "densidade da carcaça de acordo com Neves Filho (1978)"
 abs = 8 [%] "absorção máxima de água pela carcaça de acordo com a Portaria 210/98"
 CC1 = v_abate * p_carcaça "volume de abate em kg de frango por hora"

"Dados - ambiente"

T_sala = 16.51 [C] "temperatura ambiente da sala de pré-resfriamento - dados coletados"
 P_sala = 100 [kPa] "pressão atmosférica"

"Dados - água"

"Temperatura média da água residente"

T_PCresid = 12.47 [C] "pré-chiller - dados coletados na presença de água de renovação e gelo"
 T_CF1resid = 3.95 [C] "chiller fase 1 - dados coletados na presença de água de renovação e gelo"
 T_CF2resid = 1.95 [C] "chiller fase 2 - dados coletados na presença de água de renovação e gelo"

"Temperatura máx. da água residente"

T_PCmax = 16 [C] "pré-chiller - conforme Port. n 210/98"
 T_CF1max = 4 [C] "chiller fase 1 - conforme Port. n 210/98"
 T_CF2max = 4 [C] "chiller fase 2 - conforme Port. n 210/98"

"Temperatura média da água de renovação"

T_PCrenov = 2.88 [C] "pré-chiller - dados coletados"
 T_CF1renov = 3.63 [C] "chiller fase 1 - dados coletados"
 T_CF2renov = 2.70 [C] "chiller fase 2 - dados coletados"

"Dados - resfriadores"

"PRÉ-CHILLER"

largura_PC = 9.5 [m]
 raio_PC = 1.3 [m]
 volume_PC = (pi# * ((raio_PC)^2) * largura_PC) / 2 "volume de um meio cilindro oco, em m³"
 C_A1 + C_G1 = 0.0015 * v_abate "dados em m³/h, considerando a vazão mínima de água de 1,5 litros por carcaça para renovação conforme Port. n 210/98"
 m_A1 = C_A1 * Density(Water, T=T_PCrenov, P=P_sala) "vazão de água no pré-chiller em kg/h"
 t_PC = 30/60 "tempo máximo de retenção no resfriador em horas"
 T_carcaça_PC = 38.26 [C] "temperatura média de entrada da carcaça no pré-chiller - dados coletados"
 T_scarcaça_PC = 21.38 [C] "temperatura média de saída da carcaça no pré-chiller - dados coletados"

"CHILLER FASE 1"

largura_CF1 = 9.5 [m]
 raio_CF1 = 1.3 [m]
 volume_CF1 = ((pi# * ((raio_CF1)^2) * largura_CF1) / 2) "volume de um meio cilindro oco em m³"

$C_{A2} + C_{G2} = 0.001 * v_{abate}$ "dados em m³/h, considerando a vazão mínima de água para renovação conforme Port. n 210/98"

$m_{A2} = C_{A2} * \text{Density}(\text{Water}, T=T_{CF1\text{renov}}, P=P_{\text{sala}})$ "vazão de água no chiller fase 1 em kg/h"

$t_{CF1} = 20/60$ "tempo de retenção no resfriador em horas"

$T_{\text{carcaça}_{CF1}} = 21.38$ [C] "temperatura de entrada da carcaça no chiller fase 1 - dados coletados"

$T_{\text{scarcaça}_{CF1}} = 13.62$ [C] "temperatura de saída da carcaça no chiller fase 1 - dados coletados"

"CHILLER FASE 2"

$\text{largura}_{CF2} = 18$ [m]

$\text{raio}_{CF2} = 1.25$ [m]

$\text{volume}_{CF2} = (\pi * ((\text{raio}_{CF2})^2) * \text{largura}_{CF2}) / 2$ "volume de um meio cilindro oco em m³"

$C_{A3} + C_{G3} = 0.001 * v_{abate}$ "dados em m³/h, considerando a vazão mínima de água para renovação conforme Port. n 210/98"

$m_{A3} = C_{A3} * \text{Density}(\text{Water}, T=T_{CF2\text{renov}}, P=P_{\text{sala}})$ "vazão de água no chiller fase 2 em kg/h"

$t_{CF2} = 120/60 - t_{CF1}$ "tempo máx de retenção no resfriador em h"

$T_{\text{carcaça}_{CF2}} = 13.62$ [C] "temperatura de entrada da carcaça no chiller fase 2 - dados coletados"

$T_{\text{scarcaça}_{CF2}} = 5.83$ [C] "temperatura de saída da carcaça no chiller fase 2 - dados coletados"

"Calor total cedido pelas carcaças de frango. Obs: 1 kcal = 4,184 kJ"

$Q_{\text{carcaça}_{PC}} = CC1 * c_{p_{\text{carcaça}}} * (T_{\text{carcaça}_{PC}} - T_{\text{scarcaça}_{PC}}) * 4.184$ "no pré-chiller, em kJ/h"

$Q_{\text{carcaça}_{CF1}} = CC1 * c_{p_{\text{carcaça}}} * (T_{\text{carcaça}_{CF1}} - T_{\text{scarcaça}_{CF1}}) * 4.184$ "no chiller fase 1, em kJ/h"

$Q_{\text{carcaça}_{CF2}} = CC1 * c_{p_{\text{carcaça}}} * (T_{\text{carcaça}_{CF2}} - T_{\text{scarcaça}_{CF2}}) * 4.184$ "no chiller fase 1, em kJ/h"

"Calor total cedido pelo sistema"

$U1 * A_{PC} = 1 / R_{\text{tot}_1}$ "coeficiente global de transferência de calor no pré-chiller em kW / m²*K"

$U2 * A_{CF1} = 1 / R_{\text{tot}_2}$ "coeficiente global de transferência de calor no chiller fase 1 em kW / m²*K"

$U3 * A_{CF2} = 1 / R_{\text{tot}_3}$ "coeficiente global de transferência de calor no chiller fase 2 em kW / m²*K"

$R_{\text{tot}_1} = (1 / ((1 / ((h_{\text{conv}1} / 1000) * A_{PC})) + (1 / ((h_{\text{rad}1}) * A_{PC}))))^{-1}$ "resistência térmica total - pré-chiller em K / kW"

$R_{\text{tot}_2} = (1 / ((1 / ((h_{\text{conv}2} / 1000) * A_{CF1})) + (1 / ((h_{\text{rad}2}) * A_{CF1}))))^{-1}$ "resistência térmica total - chiller fase 1 em K / kW"

$R_{\text{tot}_3} = (1 / ((1 / ((h_{\text{conv}3} / 1000) * A_{CF2})) + (1 / ((h_{\text{rad}3}) * A_{CF2}))))^{-1}$ "resistência térmica total - chiller fase 2 em K / kW"

$h_{\text{rad}1} = ((5.676 * 10^{(-11)}) * 0.8 * (T_{\text{sala}} + 273.15 + (T_{PC\text{resid}} + 273.15)) * (((T_{\text{sala}} + 273.15)^2 + ((T_{PC\text{resid}} + 273.15)^2)))$ "em kW/m² K; transferência de calor por radiação, considerando emissividade = 0.8"

$h_{\text{rad}2} = ((5.676 * 10^{(-11)}) * 0.8 * (T_{\text{sala}} + 273.15 + (T_{CF1\text{resid}} + 273.15)) * (((T_{\text{sala}} + 273.15)^2 + ((T_{CF1\text{resid}} + 273.15)^2)))$ "em kW/m² K; transferência de calor por radiação, considerando emissividade = 0.8"

$h_{\text{rad}3} = ((5.676 * 10^{(-11)}) * 0.8 * (T_{\text{sala}} + 273.15 + (T_{CF2\text{resid}} + 273.15)) * (((T_{\text{sala}} + 273.15)^2 + ((T_{CF2\text{resid}} + 273.15)^2)))$ "em kW/m² K; transferência de calor por radiação, considerando emissividade = 0.8"

"cálculo do coeficiente médio de transferência de calor por convecção do ar, considerando convecção natural - INCROPERA, 2008"

$T_{f_1} = (T_{PC\text{resid}} + T_{\text{sala}}) / 2$ "temperatura do filme no PC"

$T_{f_2} = (T_{CF1\text{resid}} + T_{\text{sala}}) / 2$ "temperatura do filme no CF1"

$T_{f_3} = (T_{CF2\text{resid}} + T_{\text{sala}}) / 2$ "temperatura do filme no CF2"

$v_{ar1} = \text{Viscosity}(\text{Air_ha}, T=Tf_1, P=P_{sala}) / \text{Density}(\text{Air_ha}, T=Tf_1, P=P_{sala})$ "viscosidade cinemática do ar, em m²/s"
 $v_{ar2} = \text{Viscosity}(\text{Air_ha}, T=Tf_2, P=P_{sala}) / \text{Density}(\text{Air_ha}, T=Tf_2, P=P_{sala})$ "viscosidade cinemática do ar, em m²/s"
 $v_{ar3} = \text{Viscosity}(\text{Air_ha}, T=Tf_3, P=P_{sala}) / \text{Density}(\text{Air_ha}, T=Tf_3, P=P_{sala})$ "viscosidade cinemática do ar, em m²/s"
 $\alpha_{ar1} = (k_{ar1}/1000) / (\text{Density}(\text{Air_ha}, T=Tf_1, P=P_{sala}) * C_v(\text{Air_ha}, T=Tf_1, P=P_{sala}))$ "difusividade térmica do ar, em m²/s"
 $\alpha_{ar2} = (k_{ar2}/1000) / (\text{Density}(\text{Air_ha}, T=Tf_2, P=P_{sala}) * C_v(\text{Air_ha}, T=Tf_2, P=P_{sala}))$ "difusividade térmica do ar, em m²/s"
 $\alpha_{ar3} = (k_{ar3}/1000) / (\text{Density}(\text{Air_ha}, T=Tf_3, P=P_{sala}) * C_v(\text{Air_ha}, T=Tf_3, P=P_{sala}))$ "difusividade térmica do ar, em m²/s"
 $k_{ar1} = \text{Conductivity}(\text{Air_ha}, T=Tf_1, P=P_{sala})$ "condutividade térmica do ar em W/m K"
 $k_{ar2} = \text{Conductivity}(\text{Air_ha}, T=Tf_2, P=P_{sala})$ "condutividade térmica do ar em W/m K"
 $k_{ar3} = \text{Conductivity}(\text{Air_ha}, T=Tf_3, P=P_{sala})$ "condutividade térmica do ar em W/m K"
 $\beta_{ar1} = 1 / (Tf_1 + 273.15)$ "coef de expansão térmica do ar, em 1/ K"
 $\beta_{ar2} = 1 / (Tf_2 + 273.15)$ "coef de expansão térmica do ar, em 1/ K"
 $\beta_{ar3} = 1 / (Tf_3 + 273.15)$ "coef de expansão térmica do ar, em 1/ K"
 $g = 9.8$ "aceleração da gravidade, em m/s²"

$L_1 = (\text{largura_PC} * 2 * \text{raio_PC}) / (2 * \text{largura_PC} + 2 * \text{raio_PC})$
 $L_2 = (\text{largura_CF1} * 2 * \text{raio_CF1}) / (2 * \text{largura_CF1} + 2 * \text{raio_CF1})$
 $L_3 = (\text{largura_CF2} * 2 * \text{raio_CF2}) / (2 * \text{largura_CF2} + 2 * \text{raio_CF2})$

$R_{aC} = ((g * \beta_{ar1} * (T_{sala} - T_{PCresid})) * (L_1)^3) / (v_{ar1} * \alpha_{ar1})$
 $Nu_C = 0.27 * (R_{aC})^{(1/4)}$
 $Nu_C = (h_{conv1} * (L_1)) / k_{ar1}$ "h_conv1 em W / m²K"

$R_{aC1} = ((g * \beta_{ar2} * (T_{sala} - T_{CF1resid})) * (L_2)^3) / (v_{ar2} * \alpha_{ar2})$
 $Nu_{C1} = 0.27 * (R_{aC1})^{(1/4)}$
 $Nu_{C1} = (h_{conv2} * (L_2)) / k_{ar2}$ "h_conv2 em W / m²K"

$R_{aC2} = ((g * \beta_{ar3} * (T_{sala} - T_{CF2resid})) * (L_3)^3) / (v_{ar3} * \alpha_{ar3})$
 $Nu_{C2} = 0.27 * (R_{aC2})^{(1/4)}$
 $Nu_{C2} = (h_{conv3} * (L_3)) / k_{ar3}$ "h_conv3 em W / m²K"

"cálculo da carga térmica cedida pelo sistema"
 $A_{PC} = \pi * (\text{raio_PC}^2) + \pi * \text{raio_PC} * \text{largura_PC} + \text{largura_PC} * 2 * \text{raio_PC}$ "área total de troca térmica no pré-chiller em m² - área do tanque em contato com a água + superfície da água"
 $A_{CF1} = \pi * (\text{raio_CF1}^2) + \pi * \text{raio_CF1} * \text{largura_CF1} + \text{largura_CF1} * 2 * \text{raio_CF1}$ "área total de troca térmica no chiller fase 1 em m² - área do tanque em contato com a água + superfície da água"
 $A_{CF2} = \pi * (\text{raio_CF2}^2) + \pi * \text{raio_CF2} * \text{largura_CF2} + \text{largura_CF2} * 2 * \text{raio_CF2}$ "área total de troca térmica no chiller fase 2 em m² - área do tanque em contato com a água + superfície da água"

$Q_{sistemaPC} = (U1 * A_{PC} * (T_{sala} - T_{PCresid})) * 3600$ "no pré-chiller, em kJ/h"
 $Q_{sistemaCF1} = (U2 * A_{CF1} * (T_{sala} - T_{CF1resid})) * 3600$ "no chiller fase 1, em kJ/h"
 $Q_{sistemaCF2} = (U3 * A_{CF2} * (T_{sala} - T_{CF2resid})) * 3600$ "no chiller fase 2, em kJ/h"

"Calor total cedido pelo ar comprimido"
 $C_{AR} = 450$ [m³/h] "vazão de ar comprimido no sistema de borbulhamento - potência aproximada de 7.5 cv"
 $m_{AR} = C_{AR} * \text{Density}(\text{Air_ha}, T=T_{ar}, P=P_{ar})$ "vazão de ar comprimido em kg/h"
 $T_{ar} = 40$ [C] "temperatura do ar comprimido"

$P_{ar} = 100$ [kPa] "pressão de descarga do ar comprimido"

$Q_{cedidoAR} = m_{AR} * Enthalpy(Air_{ha}, T=T_{ar}, P=P_{ar})$ "em cada resfriador, em kJ/h"

"CALOR TOTAL REQUERIDO"

$Q_{requeridoPC} = Q_{carcaçaPC} + Q_{sistemaPC} + Q_{cedidoAR}$ "para o pré-chiller, em kJ/h"

$Q_{requeridoCF1} = Q_{carcaçaCF1} + Q_{sistemaCF1} + Q_{cedidoAR}$ "para o chiller fase 1, em kJ/h"

$Q_{requeridoCF2} = Q_{carcaçaCF2} + Q_{sistemaCF2} + Q_{cedidoAR}$ "para o chiller fase 2, em kJ/h"

"deltaT requerido pela água de renovação no sistema de pré-resfriamento"

$\Delta T_{reqPC} = Q_{requeridoPC} / (m_{A1} * Cp(Water, T=T_{PCrenov}, P=P_{sala}))$ "no pré-chiller"

$\Delta T_{reqCF1} = Q_{requeridoCF1} / (m_{A2} * Cp(Water, T=T_{CF1renov}, P=P_{sala}))$ "no chiller fase 1"

$\Delta T_{reqCF2} = Q_{requeridoCF2} / (m_{A3} * Cp(Water, T=T_{CF2renov}, P=P_{sala}))$ "no chiller fase 2"

"deltaT suprido pela água de renovação no sistema de pré-resfriamento"

$\Delta T_{supPC} = T_{PCmax} - T_{PCrenov}$ "no pré-chiller"

$\Delta T_{supCF1} = T_{CF1max} - T_{CF1renov}$ "no chiller fase 1"

$\Delta T_{supCF2} = T_{CF2max} - T_{CF2renov}$ "no chiller fase 2"

"Energia adicional necessária"

$Q_{adicPC} = m_{A1} * Cp(Water, T=T_{PCrenov}, P=P_{sala}) * (\Delta T_{reqPC} - \Delta T_{supPC})$ "em kJ/h"

$Q_{adicCF1} = m_{A2} * Cp(Water, T=T_{CF1renov}, P=P_{sala}) * (\Delta T_{reqCF1} - \Delta T_{supCF1})$ "em kJ/h"

$Q_{adicCF2} = m_{A3} * Cp(Water, T=T_{CF2renov}, P=P_{sala}) * (\Delta T_{reqCF1} - \Delta T_{supCF2})$ "em kJ/h"

"Massa de gelo necessária"

$Q_{adicPC} = m_{gPC} * Enthalpy_{fusion}(Water)$ "em kg/h"

$C_{G1} = m_{gPC} / Density(Water, T=0, P=P_{sala})$ "volume de gelo no pré-chiller em m³/h"

$Q_{adicCF1} = m_{gCF1} * Enthalpy_{fusion}(Water)$ "em kg/h"

$C_{G2} = m_{gCF1} / Density(Water, T=0, P=P_{sala})$ "volume de gelo no chiller fase 1 em m³/h"

$Q_{adicCF2} = m_{gCF2} * Enthalpy_{fusion}(Water)$ "em kg/h"

$C_{G3} = m_{gCF2} / Density(Water, T=0, P=P_{sala})$ "volume de gelo no chiller fase 2 em m³/h"

$C_{G0} = C_{G1} + C_{G2} + C_{G3}$ "volume total de gelo gasto, em m³/h"

$m_{G0} = m_{gPC} + m_{gCF1} + m_{gCF2}$ "massa total de gelo em kg/h"

$C_{A0} = C_{A1} + C_{A2} + C_{A3}$ "volume total de água gasto, em m³/h"

$m_{A0} = m_{A1} + m_{A2} + m_{A3}$ "massa total de água em kg/h"

$C_{A4} = 0$ "suposição de que não é transportada quantidade significativa de água de um chiller para o outro durante o movimento das carcaças no sistema"

$C_{A6} = 0$ "suposição de que não é transportada quantidade significativa de água de um chiller para o outro durante o movimento das carcaças no sistema"

$C_{A5} = C_{A1} + C_{G1}$ "suposição de que toda água de renovação e gelo que entra, sai do sistema, de forma a manter o chiller sempre dentro do seu volume de água de trabalho"

$C_{A7} = C_{A2} + C_{G2}$ "suposição de que toda água de renovação e gelo que entra, sai do sistema, de forma a manter o chiller sempre dentro do seu volume de água de trabalho"

$C_{A8} = C_{A3} + C_{G3}$ "suposição de que toda água de renovação e gelo que entra, sai do sistema, de forma a manter o chiller sempre dentro do seu volume de água de trabalho"

"ANÁLISE EXERGÉTICA"

"Dados gerais"

T_0 = 25 [C] "temperatura no estado de referência"
 T_0K = T_0 + 273.15 "temperatura em Kelvin"
 P_0 = 100 [kPa] "pressão atmosférica no estado de referência"

"Dados de amônia no trocador de calor da água de recirculação"

P_AM1 = 2*98.0665 [kPa]
 P_AM2 = (2-1.2)*98.0665 [kPa] "considerando perda de pressão de 1,2 kgf/cm²"
 v_amonia = 13.43 [m³/h]
 T_AM = 0 [C] "regime de operação - processo de troca de calor ocorre em estado isotérmico. Há mudança de fase de líquido para vapor"
 C_AM1 = v_amonia * Density(Ammonia,T=T_AM,P=P_0) "em kg/h"

"Dados de amônia no trocador de calor da fábrica de gelo"

P_AM3 = 2*98.0665 [kPa]
 P_AM4 = (2-1.2)*98.0665 [kPa] "considerando perda de pressão de 1,2 kgf/cm²"
 v_amoniag = 20 [m³/h]
 T_AMg = -5 [C] "regime de operação - processo de troca de calor ocorre em estado isotérmico. Há mudança de fase de líquido para vapor"
 C_AM3 = v_amonia * Density(Ammonia,T=T_AMg,P=P_0) "em kg/h"

"Cálculo da exergia das correntes"

Ex_A = 0 [kJ/kg] "entrada de água a 25 C e 1 atm"
 Ex_A0 = (Enthalpy(Water,T=2,P=P_sala) - Enthalpy(Water,T=T_0,P=P_0)) - T_0K * (Entropy(Water,T=2,P=P_sala) - Entropy(Water,T=T_0,P=P_0)) "entrada de água assumida a 2°C, em kJ/kg"
 Ex_A1 = (Enthalpy(Water,T=T_PCrenov,P=P_sala) - Enthalpy(Water,T=T_0,P=P_0)) - T_0K * (Entropy(Water,T=T_PCrenov,P=P_sala) - Entropy(Water,T=T_0,P=P_0)) "entrada de água no PC, em kJ/kg"
 Ex_A2 = (Enthalpy(Water,T=T_CF1renov,P=P_sala) - Enthalpy(Water,T=T_0,P=P_0)) - T_0K * (Entropy(Water,T=T_CF1renov,P=P_sala) - Entropy(Water,T=T_0,P=P_0)) "entrada de água no CF1, em kJ/kg"
 Ex_A3 = (Enthalpy(Water,T=T_CF2renov,P=P_sala) - Enthalpy(Water,T=T_0,P=P_0)) - T_0K * (Entropy(Water,T=T_CF2renov,P=P_sala) - Entropy(Water,T=T_0,P=P_0)) "entrada de água no CF2, em kJ/kg"
 Ex_A4 = 0
 Ex_A5 = (Enthalpy(Water,T=T_PCresid,P=P_sala) - Enthalpy(Water,T=T_0,P=P_0)) - T_0K * (Entropy(Water,T=T_PCresid,P=P_sala) - Entropy(Water,T=T_0,P=P_0)) "saída de água no PC, em kJ/kg"
 Ex_A6 = 0
 Ex_A7 = (Enthalpy(Water,T=T_CF1resid,P=P_sala) - Enthalpy(Water,T=T_0,P=P_0)) - T_0K * (Entropy(Water,T=T_CF1resid,P=P_sala) - Entropy(Water,T=T_0,P=P_0)) "saída de água no CF1, em kJ/kg"
 Ex_A8 = (Enthalpy(Water,T=T_CF2resid,P=P_sala) - Enthalpy(Water,T=T_0,P=P_0)) - T_0K * (Entropy(Water,T=T_CF2resid,P=P_sala) - Entropy(Water,T=T_0,P=P_0)) "saída de água no CF2, em kJ/kg"
 Ex_AM1 = (Enthalpy(Ammonia,T=T_AM,P=P_AM1) - Enthalpy(Ammonia,T=T_0,P=P_0)) - T_0K * (Entropy(Ammonia,T=T_AM,P=P_AM1) - Entropy(Ammonia,T=T_0,P=P_0)) "entrada de amônia, em kJ/kg"
 Ex_AM2 = (Enthalpy(Ammonia,T=T_AM,P=P_AM2) - Enthalpy(Ammonia,T=T_0,P=P_0)) - T_0K * (Entropy(Ammonia,T=T_AM,P=P_AM2) - Entropy(Ammonia,T=T_0,P=P_0)) "saída de amônia, em kJ/kg"

$Ex_AM3 = (Enthalpy(Ammonia, T=T_AMg, P=P_AM3) - Enthalpy(Ammonia, T=T_0, P=P_0)) - T_0K * (Entropy(Ammonia, T=T_AMg, P=P_AM3) - Entropy(Ammonia, T=T_0, P=P_0))$ "entrada de amônia, em kJ/kg"

$Ex_AM4 = (Enthalpy(Ammonia, T=T_AMg, P=P_AM4) - Enthalpy(Ammonia, T=T_0, P=P_0)) - T_0K * (Entropy(Ammonia, T=T_AMg, P=P_AM4) - Entropy(Ammonia, T=T_0, P=P_0))$ "saída de amônia, em kJ/kg"

$Ex_G0 = (Enthalpy(Water, T=0, P=P_sala) - Enthalpy(Water, T=T_0, P=P_0)) - T_0K * (Entropy(Water, T=0, P=P_sala) - Entropy(Water, T=T_0, P=P_0))$ "entrada de gelo, em kJ/kg"

$Ex_AR0 = 0$ "entrada de ar a 25 C e 1 atm"

$Ex_AR = (Enthalpy(Air_ha, T=T_ar, P=P_ar) - Enthalpy(Air_ha, T=T_0, P=P_0)) - T_0K * (Entropy(Air_ha, T=T_ar, P=P_ar) - Entropy(Air_ha, T=T_0, P=P_0))$ "entrada de ar comprimido"

$W = 7.5 * 0.7355 * 3600$ "em kJ/h, considerando trabalho de eixo da turbina de ar comprimido de 7,5 cv (1 cv = 0.7355 kJ/s)"

$Ex_PC = ((1 - (T_0 + 273.15) / (T_{carca\c{c}a_PC} + 273.15)) * Q_{requeridoPC})$ "exergia relacionada ao calor total que deve ser retirado para resfriamento da carcaça no pré-chiller, em kJ/h"

$Ex_CF1 = ((1 - (T_0 + 273.15) / (T_{carca\c{c}a_CF1} + 273.15)) * Q_{requeridoCF1})$ "exergia relacionada ao calor total que deve ser retirado para resfriamento da carcaça no chiller fase 1, em kJ/h"

$Ex_CF2 = ((1 - (T_0 + 273.15) / (T_{carca\c{c}a_CF2} + 273.15)) * Q_{requeridoCF2})$ "exergia relacionada ao calor total que deve ser retirado para resfriamento da carcaça no chiller fase 2, em kJ/h"

"Balanço exergético"

"PRÉ-CHILLER"

$m_A1 * Ex_A1 + m_gPC * Ex_G0 + m_AR * Ex_AR + Ex_PC = (m_A1 + m_gPC) * Ex_A5 + E_D1$
"considera trabalho do eixo desprezível; exergia destruída em kJ/h"

"CHILLER FASE 1"

$m_A2 * Ex_A2 + m_gCF1 * Ex_G0 + m_AR * Ex_AR + Ex_CF1 = (m_A2 + m_gCF1) * Ex_A7 + E_D2$
"considera trabalho do eixo desprezível; exergia destruída em kJ/h"

"CHILLER FASE 2"

$m_A3 * Ex_A3 + m_gCF2 * Ex_G0 + m_AR * Ex_AR + Ex_CF2 = (m_A3 + m_gCF2) * Ex_A8 + E_D3$
"considera trabalho do eixo desprezível; exergia destruída em kJ/h"

"TROCADORES DE CALOR CASCO E TUBO"

$m_A0 * Ex_A + C_AM1 * Ex_AM1 = m_A0 * Ex_A0 + C_AM1 * Ex_AM2 + E_Dagua$ "considera trabalho do eixo desprezível e equipamento adiabático; exergia destruída em kJ/h"

$m_G0 * Ex_A + C_AM3 * Ex_AM3 = m_G0 * Ex_G0 + C_AM3 * Ex_AM4 + E_Dgelo$ "considera equipamento adiabático; exergia destruída em kJ/h"

"TURBINA DE AR COMPRIMIDO"

$m_AR * Ex_AR0 + W = m_AR * Ex_AR + E_Dar$ "considera equipamento adiabático; exergia destruída em kJ/h"

"eficiência exérgica"

$efic_PC = (((m_A1 + m_gPC) * Ex_A5 - (m_A1 * Ex_A1 + m_gPC * Ex_G0)) / (Ex_PC + m_AR * Ex_AR)) * 100$
"pré-chiller, em %"

$efic_CF1 = (((m_A2 + m_gCF1) * Ex_A7 - (m_A2 * Ex_A2 + m_gCF1 * Ex_G0)) / (Ex_CF1 + m_AR * Ex_AR)) * 100$ "chiller fase 1, em %"

$$\text{efic_CF2} = \frac{((m_{A3}+m_{gCF2})\text{Ex}_{A8} - (m_{A3}\text{Ex}_{A3} + m_{gCF2}\text{Ex}_{G0}))}{(\text{Ex}_{CF2} + m_{AR}\text{Ex}_{AR})} * 100$$
 "chillerfase 2, em %"

$$\text{efic_AM} = \frac{(C_{AM1}\text{Ex}_{AM1} - C_{AM1}\text{Ex}_{AM2})}{(m_{A0}\text{Ex}_{A0} - m_{A0}\text{Ex}_{A})} * 100$$
 "trocador de calor da amônia, em %"

$$\text{efic_G} = \frac{(C_{AM3}\text{Ex}_{AM3} - C_{AM3}\text{Ex}_{AM4})}{(m_{G0}\text{Ex}_{G0} - m_{G0}\text{Ex}_{A})} * 100$$
 "trocador de calor do gelo, em %"

$$\text{efic_AR} = \frac{(m_{AR}\text{Ex}_{AR})}{W} * 100$$
 "turbina de ar comprimido, em %"

"ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA"

"(considerando equipamentos já instalados: Z=0; equipamentos analisados em condições de regime permanente; energias cinética e potencial desconsideradas; perdas de carga por atrito nos trocadores de calor e nas tubulações desconsideradas)"

"Custos específicos conhecidos"

$\text{camb} = 4.21$ [R\$/US\$]

$\text{custo_aETA} = 0.87/\text{camb}$ "custo de recebimento de água tratada (média 2019), em US\$/m³"

$\text{custo_aETE} = 2.07/\text{camb}$ "custo da água residuária (média 2019), em US\$/m³"

$\text{custo_gelo} = 28.75/\text{camb}$ "custo de fabricação do gelo (dado fornecido pela empresa), em US\$/m³"

$c_w = 0.53/\text{camb}$ "custo de eletricidade (média 2019), em US\$/kWh"

"BALANÇO DE CUSTOS"

"PRÉ-CHILLER"

$\text{custo_aETA} * C_{A1} + \text{custo_gelo} * C_{G1} + C_{u_ar} + c_{c1} * (\text{Ex}_{PC}) = \text{custo_aETE} * (C_{A5})$

"CHILLER FASE 1"

$\text{custo_aETA} * C_{A2} + \text{custo_gelo} * C_{G2} + C_{u_ar} + c_{c2} * (\text{Ex}_{CF1}) = \text{custo_aETE} * (C_{A7})$

"CHILLER FASE 2"

$\text{custo_aETA} * C_{A3} + \text{custo_gelo} * C_{G3} + C_{u_ar} + c_{c3} * (\text{Ex}_{CF2}) = \text{custo_aETE} * (C_{A8})$

"TURBINA DE AR COMPRIMIDO"

$C_{u_w} = c_w * (W/3600)$

$C_{u_ar} = C_{u_w}$