



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE GARANHUNS
ENGENHARIA DE ALIMENTOS

MARIANA ALVES DA COSTA

**Estudo e avaliação de um Sistema de Refrigeração Industrial: Estimativa
de carga térmica e capacidade frigorífica**

GARANHUNS

2018

MARIANA ALVES DA COSTA

Estudo e avaliação de um Sistema de Refrigeração Industrial: Estimativa de carga térmica e capacidade frigorífica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Garanhuns, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Mirko Salomón Chávez Gutiérrez

Co-Orientador: Eng. Luís Antonio Thomaz de Godoy Filho

GARANHUNS

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Ariano Suassuna, Garanhuns - PE, Brasil

C837e Costa, Mariana Alves da

Estudo e avaliação de um sistema de refrigeração industrial:
estimativa de carga térmica e capacidade frigorífica / Mariana
Alves da Costa. - 2018.

70f.

Orientador(a): Mirko Salomón Chávez Gutiérrez
Coorientador: Luís Antonio Thomaz de Godoy Filho
Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
de Alimentos) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Departamento de Engenharia de Alimentos, Garanhuns, BR - PE,
2018.

Inclui referências

1. Conservação 2. Refrigeração 3. Alimentos I. Gutiérrez, Mirko
Salomón Chávez, orient. II. Godoy Filho, Luís Antonio Thomaz de
III. Título.

CDD 641.4

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE GARANHUNS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Estudo e avaliação de um Sistema de Refrigeração Industrial: Estimativa de carga térmica e capacidade frigorífica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Garanhuns, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Aprovado em: ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mirko Salomón Chávez Gutiérrez
(Orientador e Presidente da banca)

Prof. Dr. Thibério Pinho Costa Souza
(Membro titular interno)

Eng. Luís Antonio Thomaz de Godoy Filho
(Membro titular externo)

À minha família e amigos,
com todo amor e gratidão.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela sabedoria e discernimento.

Aos meus pais, Cicera e José, por toda dedicação, amor, paciência e apoio.

Ao meu irmão, Daniel, pela parceria em toda essa jornada de estudos e às minhas irmãs, Raquel e Júlia, por tornarem os nossos dias mais alegres.

A minha amiga e segunda mãe, Cicleide, que me presenteou com alguns dos melhores conselhos e exemplos, que carrego comigo.

Aos meus amigos e professores, Maria e Alexandre Braga, que me vêm orientando ao longo desses anos.

A empresa pela oportunidade de desenvolver esse trabalho.

Ao meu supervisor e co-orientador, Luís Godoy, por todos os ensinamentos e apoio.

Ao meu orientador, Mirko Gutiérrez, pela paciência e apoio.

A minha turma amiga, Elizane, Vitória, Raiane, Maria Fernanda e Lucas, obrigada por tudo.

A todos que fazem o Curso de Bacharelado em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Garanhuns.

RESUMO

COSTA, M. A. **Estudo e avaliação de um Sistema de Refrigeração Industrial: Estimativa de carga térmica e capacidade frigorífica.** 70f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Garanhuns - PE, 2018.

O presente trabalho foi desenvolvido em paralelo as atividades de estágio da autora numa fábrica de laticínios, tendo como objetivo estudar o sistema de refrigeração da unidade, avaliando as variações de temperatura nos ambientes destinados à conservação e resfriamento dos produtos. Bem como estimar a carga térmica do túnel de resfriamento por ar forçado para embasar o dimensionamento do sistema de modo que a demanda térmica seja atendida. Para isso, foram realizadas coletas de dados e monitoramento dos parâmetros do sistema *In loco*, entre os meses de maio e setembro de 2018. Trata-se de um sistema de refrigeração por compressão de vapor que opera com os fluidos Freon R-22 e Amônia e precisa atender a demanda de três ambientes refrigerados: as câmaras de conservação e expedição (câmara fria e antecâmara) com temperaturas de interesse nas faixas de 0 a 10°C e 0 à 15°, respectivamente; e o túnel de resfriamento por ar forçado, utilizado para o pré-resfriamento de um tipo de iogurte que é envasado a quente, e temperatura de interesse na faixa de -5 a 10°C. O sistema existente não foi dimensionado para a condição atual da produção, por esse motivo, foi estimada a carga térmica para o túnel de resfriamento, pois foi observado que o mesmo não atende a demanda da produção impactando negativamente os indicadores de qualidade da fábrica. Os dados obtidos foram analisados através de ANOVA e teste de Tukey a 95% de significância. Dessa forma, foi possível constatar que as condições de operação e manutenção atuais impactam negativamente a eficiência do sistema, mesmo assim a câmara fria atende à demanda de produção atual, pois trabalha com 40 a 60% da sua ocupação. Além disso, o tempo de pré-resfriamento adotado (1,5h) não é suficiente para atingir a faixa de temperatura de interesse para o iogurte (0 a 10°C), sendo necessárias pelo menos 4,5h considerando as condições atuais do sistema. Por fim, a capacidade frigorífica estimada foi de 66,587 kW; além de ser identificada a possibilidade de utilizar outro tipo de embalagens secundárias para favorecer a troca de calor entre o ar frio e os produtos de interesse.

Palavras chave: Conservação; refrigeração; alimentos; carga térmica; dimensionamento.

ABSTRACT

COSTA, M. A. **Study and evaluation of Industrial Refrigeration System: Estimation of heat load and cooling capacity.** 70f. Graduation Work - Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Garanhuns - PE, 2018.

The present work was developed in parallel to the author's internship activities in a dairy factory and its objective was to study the refrigeration system in operation, evaluating temperature variations in the refrigerated spaces. It was also intended to estimate the thermal load of the tunnel by forced-air cooling to base the system's sizing so that the thermal demand is met. Therefore data collection and monitoring of the system parameters were performed in loco between May and September 2018. It is a vapor compression refrigeration system that operates with Freon R-22 and Ammonia fluids and needs to meet the demand of three refrigerated environments: the storage and expedition chambers (cold room and antechamber) with temperatures of interest in the 0 to 10°C and 0 to 15° ranges, respectively; and the tunnel by forced-air cooling used for pre-cooling a type of yogurt which is hot packaged and temperature of interest in the range of -5 to 10 ° C. The system was not designed for the current production condition so the thermal load for the cooling tunnel was estimated since it was observed that it does not meet the production demand and this has impacted the quality indicators of the factory. Data were analyzed by ANOVA and Tukey's test at 95% significance level. Thus it was possible to verify that the current operation and maintenance conditions negatively impact the efficiency of the system even though the cold room meets the production demand, since it works with 40 to 60% of its capacity. In addition the pre-cooling time adopted (1.5 hours) is not sufficient to reach the temperature range of interest for yogurt (0 to 10°C) requiring at least 4.5 hours considering the current system conditions. At the end the refrigerated capacity was estimated in 66,587 kW and opportunities for improvement were observed for the secondary packages that are being improved and can contribute with a better cooling effect by increasing the convective thermal exchange between the cold air and the products of interest.

Keywords: Preservation; cooling; food; heat load; sizing.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	9
2.1	Geral	9
2.2	Específicos	9
3	REVISÃO DE LITERATURA	10
3.1	Conservação de Alimentos	10
3.2	Conservação pelo frio	11
3.3	Leite e derivados de leite	13
3.4	Sistemas de refrigeração	16
3.5	Sistema de refrigeração por compressão de vapor	18
3.6	Dimensionamento dos sistemas de refrigeração	19
3.7	Tecnologias de resfriamento rápido	22
3.8	Principais Equipamentos	23
4	MATERIALE MÉTODOS	25
4.1	Identificação do sistema refrigeração existente	25
4.2	Coleta de dados	26
4.3	Medição das variáveis do sistema	28
4.4	Análise de dados e diagnóstico do sistema	33
4.5	Estimativa de carga térmica e dimensionamento	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	Descrição e diagnóstico dos componentes do sistema	37
5.2	Perfis de temperatura dos ambientes	39
5.2.1	<i>Túnel de resfriamento</i>	39
5.2.2	<i>Câmara fria e antecâmara</i>	44
5.3	Carga térmica	50
	Fonte: Elaboração própria.	52
5.4	Capacidade frigorífica e sugestão de equipamentos	52
6	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	55
	APÊNDICE	59
	Apêndice A – ANOVA Minitab	60
	ANEXOS	64
	Anexo I – Fotos dos equipamentos utilizados no cenário de estudo.	65
	Anexo II – Calor específico do produto (IogurteProduto X)	69

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de refrigeração é o método de conservação dominante quando se trata de produtos perecíveis, principalmente dos alimentos. Consiste na remoção de calor desses materiais, seguida de sua permanência em baixas temperaturas, com o intuito de reduzir ou inativar o crescimento e desenvolvimento de microrganismos patogênicos e/ou deteriorantes e algumas enzimas que podem comprometer a qualidade original do alimento, prolongando a sua vida de prateleira (SILVA, 2018; SADHU, 2018; OLIVEIRA et al., 2015).

Trata-se de uma tecnologia empregada em diferentes operações na produção, transporte, manuseio, armazenamento e distribuição dos alimentos, sendo o componente mais importante do que chamamos cadeia do frio, que é justamente esse conjunto de etapas em que se faz uso do frio para preservação das características do alimento por mais tempo. Qualquer interrupção na cadeia impacta negativamente a qualidade, a segurança e a vida de prateleira dos produtos de interesse devido ao rápido crescimento microbiano (SILVA, 2018).

A principal aplicação é na produção de produtos de origem animal como carnes e derivados de carne, leites e derivados de leite, entre outros. São produtos com alto valor nutritivo e que carregam uma certa carga microbiana, dependendo do nível de processamento a que forem submetidos, que se expostos a temperaturas elevadas, podem ver-se comprometidos do ponto de vista sensorial e microbiológico (SILVA, 2018; SADHU, 2018).

Dentre os derivados de leite, os leites fermentados, preparados lácteos submetidos ao processo fermentativo, constituem um grupo de grande relevância quando se fala de cadeia do frio, pois a refrigeração está presente na cadeia leiteira desde o pós-ordenha até as gôndolas dos supermercados. Além disso, a refrigeração também é usada para cessar a fermentação, garantindo as características sensoriais de interesse para um determinado produto (Ordóñez et al., 2005; COSTA, 2018).

Nesse contexto, esse trabalho foi desenvolvido numa fábrica de laticínios em paralelo às atividades de estágio da autora e teve como objetivo estudar o sistema de refrigeração da unidade, avaliando as variações de temperatura nos ambientes destinados à conservação dos produtos. Além disso, em virtude da condição de funcionamento observada para o túnel de resfriamento por ar forçado, foi estimada a carga térmica deste ambiente para embasar o dimensionar do sistema de modo que a demanda térmica seja atendida.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

- Estudar e avaliar o sistema de refrigeração utilizado para processamento e conservação de uma linha de produção de iogurte.

2.2 Específicos

- Identificar e descrever o funcionamento dos elementos principais que compõem o sistema de refrigeração por compressão de vapor utilizado na linha de produção de iogurte;
- Monitorar a temperatura das 3 câmaras utilizadas para conservar o produto durante todo o processo produtivo;
- Avaliar a distribuição das temperaturas dentro das câmaras identificando regiões de alta temperatura e/ou infiltrações de calor;
- Estimar a carga térmica no túnel de resfriamento por ar forçado;
- Estimar a capacidade frigorífica ideal para a eficiência do túnel.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Conservação de Alimentos

Alimentos são materiais naturalmente susceptíveis aos processos de deterioração em virtude de sua composição química e das condições do meio no qual são mantidos. As principais causas de deterioração são associadas a fatores como temperatura, umidade, oxigênio, luz e outros, conforme pode ser visto na Tabela 1, agentes que desencadeiam as reações que comprometem a qualidade original desses materiais. Por isso, diferentes tecnologias são empregadas ao longo da cadeia de produção de alimentos com o intuito de inibir e/ou retardar esses processos (PROKOPOV & TANCHEV, 2007; SHARMA, 2015).

Tabela 1: Fatores responsáveis pela deterioração de alimentos.

Físicos	Químicos	Biológicos
Luz Calor Umidade Ações mecânicas	Oxigênio Gás carbônico Contaminantes anômalos	Enzimas Micro-organismos Insetos Outros parasitas

Fonte: Adaptado de Silva, 2010.

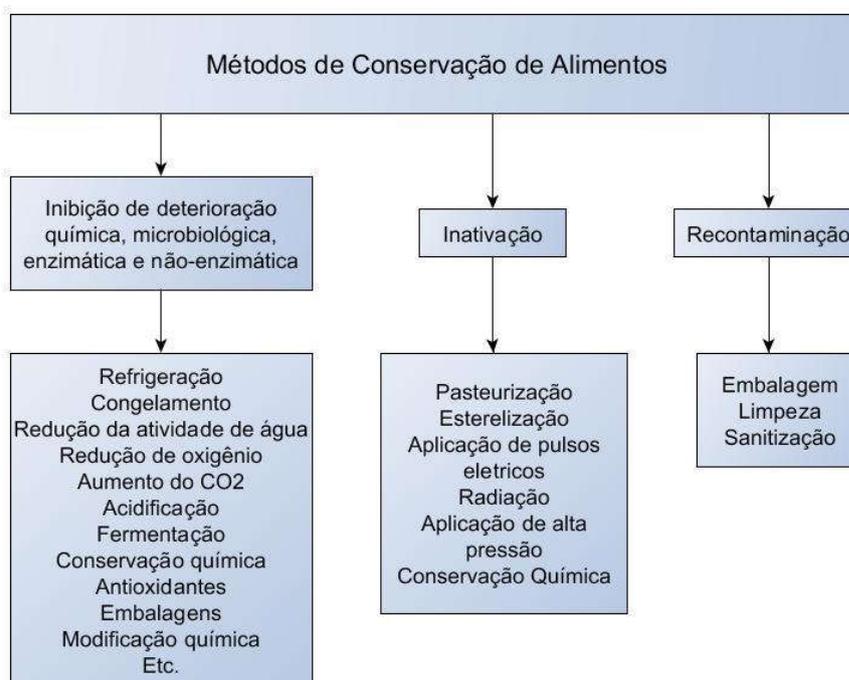
As tecnologias de conservação datam da pré-história quando o homem aprendeu a dominar o fogo e com isso descobriu a conservação pelo calor. Desde então outras técnicas foram sendo desenvolvidas e têm sido empregadas para os diferentes tipos de alimentos com a finalidade de preservar as suas características originais por um período de tempo maior (VASCONCELOS & MELO FILHO, 2010; SHARMA, 2015).

Para Vasconcelos e Melo Filho (2010), o que motiva o desenvolvimento e a aplicação dessas técnicas são a perecibilidade dos alimentos, a sazonalidade das produções e a distribuição geográfica das produções e dos centros de consumo. Também destacam como ganhos, a manutenção da qualidade ao longo da cadeia de produção e a contribuição para o desenvolvimento econômico como consequência da instalação de agroindústrias. Além disso, lista a natureza do alimento, o tempo de conservação, o custo do processo e os agentes deteriorantes envolvidos como fatores que determinam a escolha de um método de conservação.

De acordo com Sharma (2015), podem-se separar esses métodos em duas categorias: naturais - cozimento, refrigeração, pasteurização, desidratação, defumação e adição de açúcar ou sal, entre outros; e artificiais - radiação, embalagens com atmosfera modificada e através de conservantes químicos, por exemplo. Na Figura 1 estão descritos os principais métodos

existentes. Eles podem ser empregados de forma individual, mas em sua maioria, apresentam melhores resultados quando combinados, e é o que acontece na prática.

Figura 1: Principais métodos de conservação de alimentos segundo.



Fonte: Adaptado de Prokopov & Tanchev, 2007.

3.2 Conservação pelo frio

A conservação pelo frio é possível porque temperaturas de refrigeração e congelamento promovem a inibição parcial ou total de reações químicas e enzimáticas e do crescimento de micro-organismos, permitindo assim a preservação das características sensoriais e nutricionais dos alimentos (VASCONCELOS & MELO FILHO, 2010). Para este último caso, sabe-se que cada micro-organismo possui uma faixa ótima de crescimento, abaixo da qual o seu metabolismo é reduzido até um limite crítico em que não consegue mais se multiplicar. Com base nisso, foram criados 4 grupos de micro-organismos (PROKOPOV & TANCHEV, 2007):

- *Psicrófilos* – limite crítico < 0°C, faixa ótima 12 – 18°C;
- *Psicrotóxicos* – limite crítico < 0°C, faixa ótima 20 – 30°C;
- *Mesófilos* – limite crítico 5°C, faixa ótima 30 – 40°C;
- *Termófilos* – limite crítico 30°C, faixa ótima 55 – 65°C.

Com isso os parâmetros adotados na prática podem ser determinados, considerando a microbiota associada a cada tipo de alimento. Na Tabela 2 podem ser observados alguns exemplos de limites de temperatura para multiplicação de bactérias, fungos e leveduras, bem como o limite em que as reações químicas cessam.

Tabela 2: Limites críticos para crescimento microbiano e alterações químicas.

Temperatura (°C)	Limite crítico para
10	Produção de toxinas em <i>Staphylococcus</i> e <i>Clostridium botulinum</i> tipos Ae B
6,7	Multiplicação de <i>Staphylococcus</i>
6,5	Multiplicação de <i>Clostridium botulinum</i>
5,2	Multiplicação de <i>Salmonella</i>
3,3	Produção de toxinas em <i>Clostridium botulinum</i> tipo E
0	Crescimento e atividade de bactérias causadoras de intoxicações alimentares
-8	Multiplicação de bactérias
-10	Multiplicação de leveduras
-12	Multiplicação de mofos
-18	Reações químicas

Fonte: Adaptado de Vasconcelos & Melo Filho, 2010.

Para adoção dessa tecnologia algumas considerações são fundamentais: características, composição e grau de maturação do alimento (o mesmo deve ser sadio); a aplicação do frio deve começar logo após a colheita, abate ou preparo dos alimentos; parâmetros de temperatura, umidade relativa, circulação de ar, luz e composição da atmosfera devem ser controlados; e o mais importante a cadeia do frio deve ser mantida do começo ao fim da cadeia de produção (VASCONCELOS & MELO FILHO, 2010; PROKOPOV & TANCHEV, 2007).

Mas, o que é cadeia do frio e quais os prejuízos causados pela sua interrupção? Refere-se ao conjunto de operações da cadeia que demandam o uso do frio como produção, transporte, manuseio, armazenamento e distribuição dos alimentos. Qualquer interrupção na cadeia, isto é, variações de temperatura entre seus elos, impactam negativamente a qualidade e a segurança dos alimentos, pois aceleram o crescimento microbiano e as reações químicas e bioquímicas (SILVA, 2018; PEREIRA, 2011).

Pereira (2011) destaca transporte e distribuição como os elos mais fracos desta cadeia, pois são etapas em que se observam barreiras de ineficiência na logística e desequilíbrio do nível entre os parceiros, ou seja, nem sempre os responsáveis pelo transporte e distribuição dos produtos garantem o cumprimento das recomendações do fabricante. Dessa forma, o emprego dessa tecnologia oferece vantagens competitivas em termos de marketing e comercialização, mas também oferece grandes riscos de perdas associados a falhas de

controle e monitoramento da temperatura, infraestrutura dos equipamentos, entre outros fatores que comprometem a cadeia do frio (SILVA, 2010).

De acordo com Silva (2010) os produtos de interesse na indústria de alimentos podem ser classificados como resfriados (conservados de 0 a 2°C) ou congelados (conservados de -18 a -25°C) e destaca que o armazenamento dos refrigerados é feito normalmente na faixa de -1,5 a 10°C. Para Vasconcelos & Melo Filho (2010), a temperatura média para refrigeração está na faixa de -1 a 8°C e permite a conservação temporária (dias a semanas) dos alimentos, pois nestas condições as atividades enzimática e microbiana não são interrompidas, apenas são retardadas. Por isso, é aplicada juntamente com outras técnicas de conservação (como pasteurização e fermentação) para prolongar a vida de prateleira.

A tecnologia de refrigeração é o método de conservação dominante quando se trata de produtos perecíveis, principalmente dos alimentos. Consiste na remoção de calor desses materiais, seguida da permanência destes em baixas temperaturas, com o intuito de preservar a qualidade original do alimento, prolongando a sua vida de prateleira (SILVA, 2018; SADHU, 2018; OLIVEIRA et al., 2015).

A principal aplicação é na produção de produtos de origem animal como carnes e derivados de carne, leites e derivados de leite, entre outros. Esses produtos apresentam um alto valor nutricional e carregam certa carga microbiana. Assim, dependendo do nível de processamento a que forem submetidos e à exposição de temperaturas elevadas, podem ver-se comprometidos do ponto de vista sensorial e microbiológico (SILVA, 2018; SADHU, 2018).

3.3 Leite e derivados de leite

Do ponto de vista da inspeção industrial o leite é o produto obtido da ordenha completa, ininterrupta e em condições higiênicas de vacas sadias, bem alimentadas e descansadas (BRASIL, 2017). Trata-se de um alimento rico em nutrientes, de grande relevância para alimentação dos mamíferos e também para a indústria de processamento que entrega ao mercado diferentes derivados como queijo, manteiga, iogurte, entre outros. Sua composição centesimal é variável em virtude de fatores como raça e tipo de alimentação dos animais, fase de lactação, entre outros, entretanto consideram-se valores médios conforme Tabela 3 (BEZERRA et al., 2010).

Tabela 3: Composição centesimal do leite.

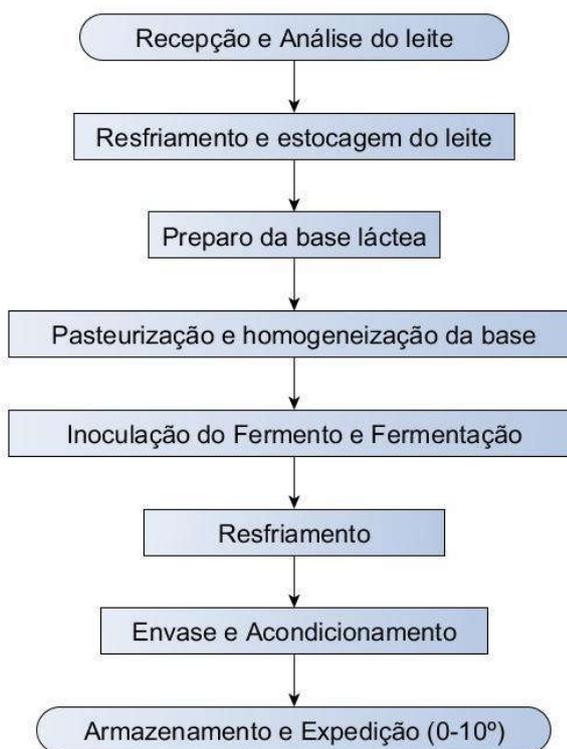
Componente	Concentração (%)
Água	87
Gordura	4
Lactose	4,8
Proteínas	3,5
Sais Minerais	0,7

Fonte: Ordóñez et al., 2005.

Em virtude do seu alto valor nutricional é um ótimo meio para o crescimento de vários grupos de micro-organismos, inclusive patogênicos e deteriorantes. Por isso, uma série de procedimentos que garantem a qualidade higiênico-sanitária devem ser adotados nas etapas de obtenção, manuseio e armazenamento, conforme estabelece o RIISPOA (Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal) e normas complementares. Além da questão sanitária que impacta diretamente a segurança dos alimentos também vale destacar a relevância tecnológica da qualidade dessa matéria-prima para as indústrias, pois um leite contaminado compromete a obtenção dos seus derivados (MENEZES et al., 2014; BRASIL, 2017).

Dentre os derivados do leite, os leites fermentados, preparados lácteos submetidos ao processo fermentativo, constituem um grupo de grande relevância quando se fala de cadeia do frio, pois a refrigeração se faz necessária ao longo de toda a cadeia produtiva, sendo utilizada inclusive para cessar a fermentação, garantindo as características sensoriais de interesse para um determinado produto (Ordóñez et al., 2005; COSTA, 2018). Os leites fermentados e bebidas lácteas fermentadas são bons exemplos dessa classe de produtos e são regulamentados pelas Instruções Normativas (IN) nº49 de 2007 e nº16 de 2005, respectivamente (BRASIL, 2007). O processo de fabricação é similar para ambos os casos e está exemplificado na Figura 2.

Figura 2: Exemplo de fluxograma de produção industrial de iogurtes e bebidas lácteas.



Fonte: Adaptado de Costa, 2018.

Segundo Robert (2008), o iogurte é o leite fermentado de maior importância econômica, e juntamente com as bebidas lácteas têm grande potencial de mercado pelo alto valor nutritivo, diversidade de sabores, formas de apresentação, entre outros fatores. Resultam de um processamento relativamente simples, mas que demanda uma série de controles ao longo de todo o fluxo produtivo, especialmente nas etapas de tratamento térmico, fermentação, resfriamento e armazenamento.

A etapa de resfriamento que sucede à fermentação representa um ponto crítico, pois determina o fim da atividade das bactérias lácticas, garantindo a acidez de interesse e consequentemente as características sensoriais e microbiológicas do produto. Para isso, recomenda-se que o resfriamento ocorra em duas etapas, evitando o choque térmico que desestrutura o coágulo e provoca a separação do soro. Inicialmente a temperatura deve ser reduzida para cerca de 20°C, garantindo o fim da fermentação, e na sequência para a temperatura de 10°C na qual adquire as características finais do produto (ROBERT, 2008).

A primeira ou ambas as etapas do resfriamento podem acontecer por intermédio de trocadores de calor tubulares ou de placas conectados a tanques de fermentação e/ou linhas de

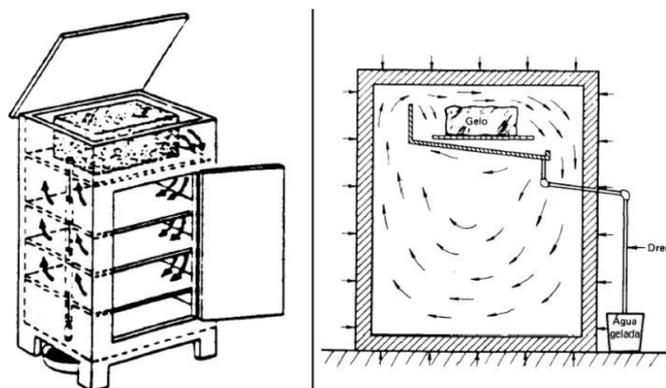
envase ou, no caso de produções em menor escala, faz-se a circulação de água ou ar refrigerados. Nos processos de larga escala a segunda etapa geralmente ocorre em câmaras e/ou túneis de resfriamento conforme especificidades de cada processo (ROBERT, 2008; CORRIEU & BÉAL, 2016).

No armazenamento e distribuição deve ser respeitado o limite de temperatura estabelecido pela legislação, máximo de 10°C (BRASIL, 2007). Entretanto, algumas fontes discordam quanto à temperatura ideal de armazenamento e sugerem, por exemplo, 2 a 5°C (ROBERT, 2008), 4 a 5°C (CORRIEU & BÉAL, 2016) e 2 a 10°C (SILVA et al., 2010).

3.4 Sistemas de refrigeração

Os primeiros experimentos com sistemas de refrigeração datam dos séculos XVIII e XIX como consequência da ampliação do conhecimento sobre a reprodução de micro-organismos e o efeito das baixas temperaturas sobre eles. Com isso o uso do frio na conservação de alimentos se expandiu e então surgiram as primeiras geladeiras que nada mais eram do que recipientes feitos com material isolante (comumente utilizavam-se placas de cortiça) no interior do qual eram colocados pedras de gelo e os alimentos de interesse, conforme Figura 3 (FERRAZ, 2008; NUNES, 2015).

Figura 3: Ilustração da primeira geladeira.

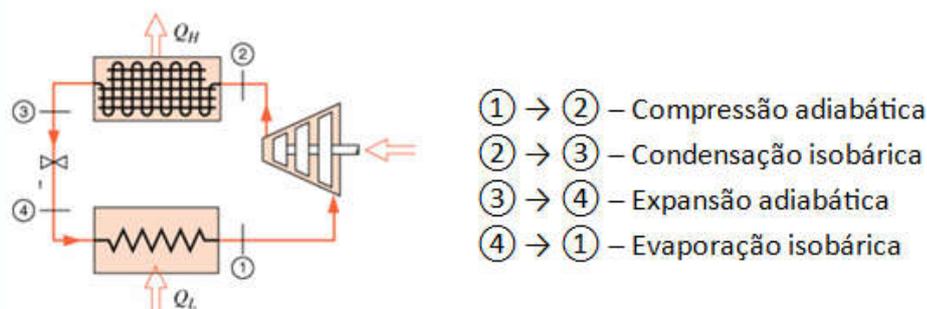


Fonte: Ferraz, 2008.

Entretanto, seu uso estava limitado pela baixa eficiência e praticidade. Mais tarde, no século XX, foi criada a geladeira para uso doméstico nos moldes dos refrigeradores atuais movidos à eletricidade. Trata-se de um sistema de refrigeração por compressão de vapor que

consiste num ciclo composto por quatro processos termodinâmicos conforme Figura 4 (FERRAZ, 2008; NUNES, 2015).

Figura 4: Sistema de refrigeração por compressão de vapor.



Fonte: Adaptado de Universidade de São Paulo – Aula Termodinâmica, 2015.

Essa é a representação do ciclo teórico composto pelos seguintes equipamentos: compressor, condensador, válvula de compressão e evaporador, nos quais ocorrem os processos ilustrados na Figura 4 e detalhados a seguir (ALVES, 2007; NUNES, 2015; TASSINI, 2012):

- Compressão adiabática – O fluido refrigerante é comprimido através de processo adiabático reversível e isoentrópico no compressor, passando do estado de vapor saturado à P_0 e $x=1$ (pressão de vaporização e título) para vapor superaquecido à P_C (pressão de condensação) e temperatura superior à temperatura de condensação;
- Condensação isobárica – O fluido refrigerante troca calor com o meio de resfriamento (água, ar ou outro fluido) no condensador e passa de vapor superaquecido para o estado de líquido saturado à temperatura de condensação;
- Expansão adiabática – O fluido refrigerante é submetido a um processo adiabático irreversível (entropia na saída da válvula é superior a de entrada) e isoentálpico na válvula de expansão, passando do estado de líquido saturado à P_C e $x=0$ para a condição em que coexistem líquido e vapor à P_0 ;
- Evaporação isobárica – O fluido refrigerante troca calor com o ambiente refrigerado no evaporador, passando de vapor úmido ($x=0$) para vapor saturado seco ($x=1$) à pressão constante e temperatura de vaporização.

O fluido refrigerante é a substância que circula pelo ciclo de refrigeração e que absorve o calor do ambiente que se deseja resfriar, são exemplos: Clorofluorcarbonetos

(CFC's), Halofluorcarbonetos (HFC's) e amônia (NH₃). Entretanto, nenhum desses reúne todas as propriedades desejáveis para um bom refrigerante que seriam, por exemplo: não ser corrosivo, tóxico ou inflamável; ser inodoro e quimicamente estável; condensar a pressões moderadas; e evaporar a pressões acima da atmosférica (FERRAZ, 2008).

Além do sistema de refrigeração por compressão de vapor existem também os sistemas por absorção, refrigeração a ar, por efeitos termoelétricos e termomagnéticos. Entretanto, o primeiro é o mais viável e conseqüentemente o mais aplicado para fins domésticos e industriais. Os demais são utilizados em circunstâncias específicas como, por exemplo, em grandes plantas químicas, no mar ou no transporte de remédios/vacinas (NUNES, 2015; MARTINHO, 2013).

3.5 Sistema de refrigeração por compressão de vapor

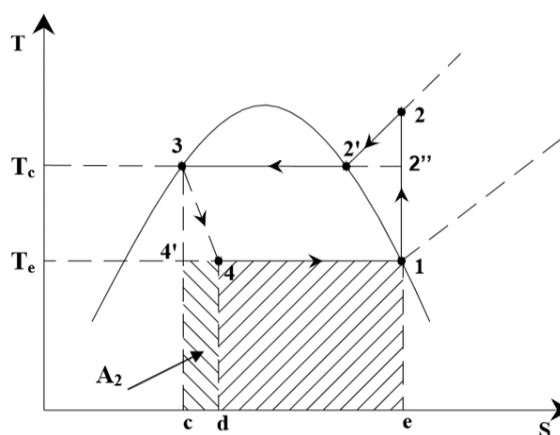
O sistema por compressão de vapor baseia-se nos princípios de evaporação de um fluido: todo líquido tende a vaporizar sob determinadas condições e, para isso, o mesmo deverá absorver calor de vaporização. Dessa forma, o fluido refrigerante, que circula pelo ciclo descrito no item anterior, absorve o calor do ambiente sob refrigeração, passando ao estado de vapor. O vapor é comprimido e bombeado para condensação, etapa em que libera calor para o ambiente externo. Com isso, o fluido retorna ao estado líquido e segue para um dispositivo de expansão no qual a pressão é reduzida, permitindo que o fluido reinicie o ciclo (MARTINHO, 2013; FERRAZ, 2008).

O ciclo só é possível graças ao trabalho de compressão realizado no compressor através do fornecimento de energia elétrica, pois o fluido no estado de vapor precisa retornar à condição de entrada no evaporador e este não é um processo espontâneo. Além disso, na condição real os processos descritos anteriormente apresentam algumas variações relacionadas às peculiaridades de cada sistema como, por exemplo: perdas de carga no condensador, evaporador e nas linhas descarga e sucção; sub-resfriamento do fluido na saída do condensador; e superaquecimento na sucção do compressor (MARTINHO, 2013; ALVES, 2007).

Do ponto de vista termodinâmico, o ciclo de maior rendimento térmico seria o ciclo de Carnot, entretanto, o modelo de Evans-Perkins (ciclo teórico), também chamado ciclo reverso Rankine, é o que melhor representa a refrigeração por compressão de vapor. Para o primeiro caso (1-2''-3-4') temos: dois processos isotérmicos de transferência de calor

(evaporação e condensação) e dois processos isoentrópicos de transferência de energia (compressão e expansão), todos reversíveis. E para o segundo (1-2-3-4) temos: compressão isoentrópica de vapor saturado, condensação isobárica, expansão isoentálpica e evaporação isobárica, sendo a condensação e a expansão processos irreversíveis. Tais diferenças podem ser observadas através do diagrama T-s, conforme Figura 5 (INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY KHARAGPUR, 2018).

Figura 5: Comparação entre o ciclo ideal e o teórico.



Fonte: IITK, 2018.

Na prática o desempenho de um sistema de refrigeração é quantificado através da relação entre a quantidade de calor removida e a energia consumida pelo equipamento, denominada de Coeficiente de Performance (COP). E sua eficiência é obtida comparando-se o COP com o do sistema ideal sob as mesmas condições.

3.6 Dimensionamento dos sistemas de refrigeração

Os sistemas de refrigeração são constituídos por câmaras frigoríficas responsáveis pelo resfriamento, congelamento e/ou conservação dos produtos alimentícios. A capacidade dessas câmaras, a qual chamamos capacidade frigorífica, depende da carga térmica associada aos ambientes e produtos de interesse e consiste na quantidade de calor a ser removida através dos evaporadores, sendo calculada através da Equação 1. Ao passo que a carga térmica é a quantidade de calor presente no interior da câmara e é calculada através da Equação 2. Dessa forma, deve haver equivalência entre as duas para o correto dimensionamento dos

componentes do ciclo de refrigeração (MARTINELLI JUNIOR, 2017; STROBEL, 2013; SILVA, 2018).

$$Q_0 = m_f (h_1 - h_4) \quad (\text{Equação 1})$$

$$Q_T = \sum_{n=1}^n Q_n \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

m_f = fluxo de massa do fluido refrigerante (Kg/h);

h_1 = entalpia específica no ponto 1 do ciclo (Kcal/Kg);

h_4 = entalpia específica no ponto 4 do ciclo (Kcal/Kg);

Q_0 = capacidade frigorífica;

Q_n = calor de diferentes fontes;

Q_T = carga térmica.

O fluxo de massa do refrigerante depende da capacidade do compressor, dessa forma, tendo calculado os valores de carga térmica e capacidade frigorífica, o sistema estará dimensionado e os equipamentos do ciclo podem ser selecionados. Outro conceito importante para efeitos do dimensionamento é o Efeito Frigorífico (EF) que consiste na quantidade de calor removida pelo evaporador para cada quilo de refrigerante e é calculado através da Equação 3 (MARTINELLI JUNIOR, 2017).

$$EF = h_1 - h_4 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

h_1 = entalpia específica no ponto 1 do ciclo (Kcal/Kg);

h_4 = entalpia específica no ponto 4 do ciclo (Kcal/Kg);

EF = efeito frigorífico.

Para os ambientes refrigerados em geral são consideradas diferentes fontes de calor associadas às características do ambiente (inclusive condições climáticas e orientação geográfica), conforme segue descrição abaixo (MARTINELLI JUNIOR, 2017; BRACKMANN et al., 2003; SILVA, 2018):

- Calor de transmissão: se refere à troca de calor com o ambiente externo através de paredes, teto e piso, em virtude do gradiente de temperatura existente e das especificidades dos materiais que constituem a câmara;
- Calor de infiltração: se refere ao calor absorvido do ambiente externo durante a abertura de portas;
- Calor por pessoas, produtos e embalagens: se refere ao calor cedido pelas pessoas, produtos e embalagens que acessam e/ou permanecem na câmara;
- Calor por equipamentos e iluminação: se refere ao calor cedido por equipamentos (exemplos: motores de ventiladores, empilhadeiras) e lâmpadas que permanecem ligados dentro da câmara.

Além da quantidade de calor, também são parâmetros de interesse: a temperatura de bulbo seco, a umidade relativa e a velocidade do ar, determinadas com base nas características de cada processo. Além disso, quando se trata do resfriamento de alimentos, todos os aspectos que afetam a troca de calor do produto com o ambiente devem ser avaliados. Isso quer dizer que fatores como, por exemplo, as propriedades térmicas do alimento, sua geometria, o tipo de embalagem e a disposição deles no ambiente devem ser considerados para garantia da eficiência e uniformidade do resfriamento (TERUEL, 2008; BRACKMANN et al., 2003; SILVA, 2018).

De acordo com Teruel et al. (2001), que avaliou o resfriamento por ar forçado de frutas de diferentes geometrias, a disposição das frutas na embalagem e os diferentes diâmetros provocam efeitos significativos no resfriamento. Para laranjas em diferentes pontos da embalagem expostos ao fluxo de ar frio de formas distintas, observou-se uma diferença na taxa de resfriamento da ordem de 2 a 5 °C. E quanto ao diâmetro, observou-se que a duplicação do diâmetro dos produtos implica um aumento de até quatro vezes no tempo de resfriamento, para a mesma condição convectiva.

Anderson et al. (2004), ao estudar o resfriamento por ar forçado de morangos embalados em escala comercial, observaram que o design e a orientação das embalagens nos paletes afetam de forma significativa o tempo de resfriamento. Além disso, também verificou-se que o material (papelão ou plástico) não afetou a velocidade de resfriamento.

Marini et al. (2014), ao estudar o congelamento e descongelamento de carnes processadas em túnel industrial de congelamento por ar forçado, observaram que os produtos colocados em diferentes posições da embalagem apresentaram qualidade distinta ao final do processo. Com isso, sugeriu-se que a disposição dos produtos desempenha um papel importante no processo de congelamento.

3.7 Tecnologias de resfriamento rápido

Em se tratando da escala industrial, além da eficiência, espera-se que o tempo total do processo seja o menor possível por dois aspectos principais: a qualidade dos produtos e o atendimento das demandas do mercado. Quanto ao aspecto qualidade, o tempo de resfriamento pode ser determinante das características sensoriais e microbiológicas dos produtos de interesse. Por isso, alguns alimentos demandam etapas de pré-resfriamento antes de seguirem para o armazenamento refrigerado e, conseqüentemente, o emprego de tecnologias de resfriamento rápido. As principais tecnologias disponíveis para esta finalidade utilizam os seguintes meios: ar forçado (forced air cooling), água gelada (hydro cooling), gelo (ice cooling) e o vácuo (vacuum cooling) (TERUEL, 2008; BRACKMANN et al., 2003; KIENHOLZ & EDEOGU, 2002).

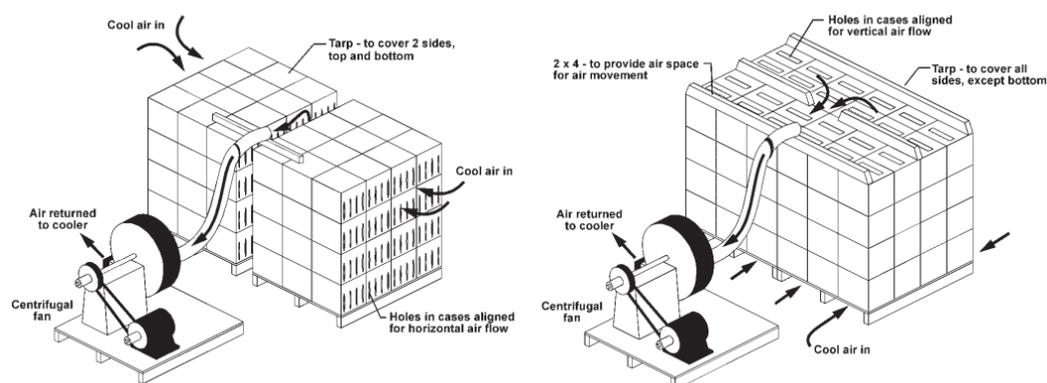
O resfriamento por ar forçado é o tipo mais empregado para esta finalidade, por sua versatilidade e pela possibilidade de resfriamento dos produtos a granel ou paletizados, e consiste na circulação forçada do ar frio ao redor dos produtos, o que acelera a troca térmica convectiva. Esse é o tipo de troca predominante e combina a condução de calor, o armazenamento de energia e o movimento de mistura, representando um importante mecanismo de troca de energia entre sólidos e fluidos (KIENHOLZ & EDEOGU, 2002; ANDERSON et al., 2004; BARROSA, 2004).

De forma resumida, o calor dos produtos (sólidos) é absorvido (por condução) pelas partículas de ar frio (fluido), promovendo a movimentação destas, que tendem a se deslocar para as regiões mais frias do fluido, onde transmitem a energia armazenada para as demais partículas (transmissão de calor por convecção). Assim, os produtos são resfriados ao passo que o fluido vai se aquecendo, esse processo é função da área de contato entre o fluido e o sólido, da diferença de temperatura entre as superfícies e do coeficiente de transferência de calor por convecção. Este último, por sua vez, depende das propriedades de transporte do

fluido, da geometria de contato, da velocidade do fluido, entre outras variáveis (MOREIRA, 2012; BARROSA, 2004).

Quando se utiliza o sistema de ar forçado para os produtos paletizados o ar frio deve ser canalizado de modo que a troca de calor seja efetiva, podendo acessar o palete nas posições horizontal ou vertical, conforme ilustrado na Figura 6. Para isso, devem existir aberturas (em tamanho, quantidade e posição adequados) que garantam a passagem ordenada do fluxo de ar frio através do palete, garantindo o contato com os produtos dos diferentes pontos. Neste sentido, as embalagens utilizadas desempenham um papel fundamental e devem ser projetadas considerando as particularidades do resfriamento (KIENHOLZ & EDEOGU, 2002; TERUEL et al., 2008).

Figura 6: Fluxo de ar no palete nas posições horizontal e vertical.



Fonte: Kienholz & Edeogu, 2002.

3.8 Principais Equipamentos

Conforme descrito anteriormente o ciclo de refrigeração por compressão de vapor é constituído obrigatoriamente por 4 equipamentos, sendo eles: evaporador, compressor, condensador e o dispositivo de expansão (ou válvula de expansão). Dois destes, juntamente com o fluido refrigerante, são determinantes da capacidade frigorífica do sistema e estão descritos abaixo.

Os compressores promovem a circulação do fluido no ciclo devido ao trabalho de compressão garantido pelo fornecimento contínuo de energia elétrica. São classificados com base nas características do processo de compressão como: máquinas de deslocamento

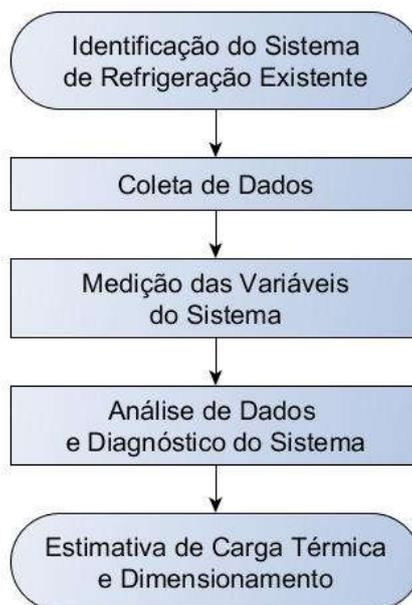
positivo, podendo ser dos tipos alternativos, parafusos, palhetas e scroll; ou máquinas de fluxo que contempla somente o tipo centrífugo. Os mais encontrados nas instalações industriais são os tipos alternativos e parafusos, o primeiro pelo seu estágio de desenvolvimento avançado e possibilidade de uso em instalações de pequeno e médio, cuja capacidade varia de 1 à 700 kW, e o segundo por combinar grandes capacidades (70 à 4570 kW) e pequenas dimensões do equipamento. Ambos permitem o emprego de diferentes refrigerantes, sendo a amônia (R-717) o mais comum para refrigeração industrial (TASSINI, 2012; ALVES, 2007; FERRAZ, 2008).

Os evaporadores conectam o fluido refrigerante ao ambiente refrigerado, promovendo a troca térmica. Esses equipamentos podem ser classificados de formas distintas, entre elas quanto aos aspectos de construção: de tubo liso, de placas e de tubos aletados. Destes o tipo tubo-aletado é o mais usado em virtude da maior área de superfície de troca térmica, o que permite a seleção de evaporadores de menores dimensões (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2010; FERRAZ, 2008).

4 MATERIALE MÉTODOS

A metodologia experimental adotada para esse trabalho está ilustrada no fluxograma da Figura 7 e descrita na sequência.

Figura 7: Metodologia experimental.



Fonte: Elaboração própria, 2018.

4.1 Identificação do sistema refrigeração existente

Trata-se de um sistema de refrigeração por compressão de vapor que opera com os fluídos Amônia e Freon R-22 e garante o funcionamento de 3 ambientes refrigerados. A linha de amônia é direcionada para as salas de armazenamento e expedição dos produtos e a linha de Freon é direcionada para o túnel de resfriamento do tipo estático. As salas de armazenamento e expedição operam com a faixa de temperatura 0 a 10°C e 0 a 15°C, respectivamente. E o túnel de resfriamento por ar forçado opera na faixa de -5 a 10°C. O sistema conta com operação manual e precisa atender a demanda da produção que ocorre 24h por dia nos 7 dias da semana.

O conjunto é composto pelas unidades de evaporação do tipo tubo-aletados, compressores do tipo parafuso, tubulações, válvulas e reservatórios individuais para cada fluido e um condensador evaporativo compartilhado entre as duas linhas. Além disso, o túnel de resfriamento também contém ventiladores para forçar a circulação do ar frio. As

especificações de cada componente não estão disponíveis, pois trata-se de uma planta antiga que abrigou o processo de diferentes empresas e foi submetida à adaptações conforme demandas particulares. Dessa forma, os dados do projeto inicial se perderam.

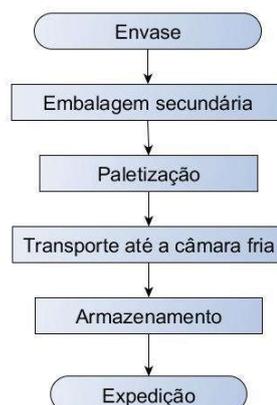
O túnel de resfriamento por ar forçado atende somente uma das linhas de envase de iogurtes em virtude da particularidade do processo, conforme será descrito mais adiante. Já a câmara fria (sala de armazenamento) recebe diferentes produtos de diferentes linhas de envase que precisam aguardar no mínimo 24 horas para serem expedidos. E, por fim, a antecâmara (sala de expedição) é utilizada durante o carregamento dos caminhões frigoríficos (temperatura controlada na faixa de 0 a 10°C).

4.2 Coleta de dados

Os dados referentes a tamanho, regime de funcionamento, degelos programados, paradas para manutenção, parâmetros de controle da linha de produção e demais informações relevantes para este estudo foram coletadas numa fábrica de laticínios responsável pela produção de lácteos refrigerados localizada no município de Garanhuns, Pernambuco, entre os meses de maio e setembro de 2018. Tratou-se de um estudo realizado durante o período de estágio da autora em paralelo às atividades do estágio.

Para esta etapa as verificações foram feitas in loco e por intermédio de entrevistas com operadores do sistema e responsáveis das áreas. As etapas do processo consideradas para este trabalho estão ilustradas na Figura 8 e descritas a seguir:

Figura 8: Fluxograma do Processo.



Fonte: Elaboração própria, 2018.

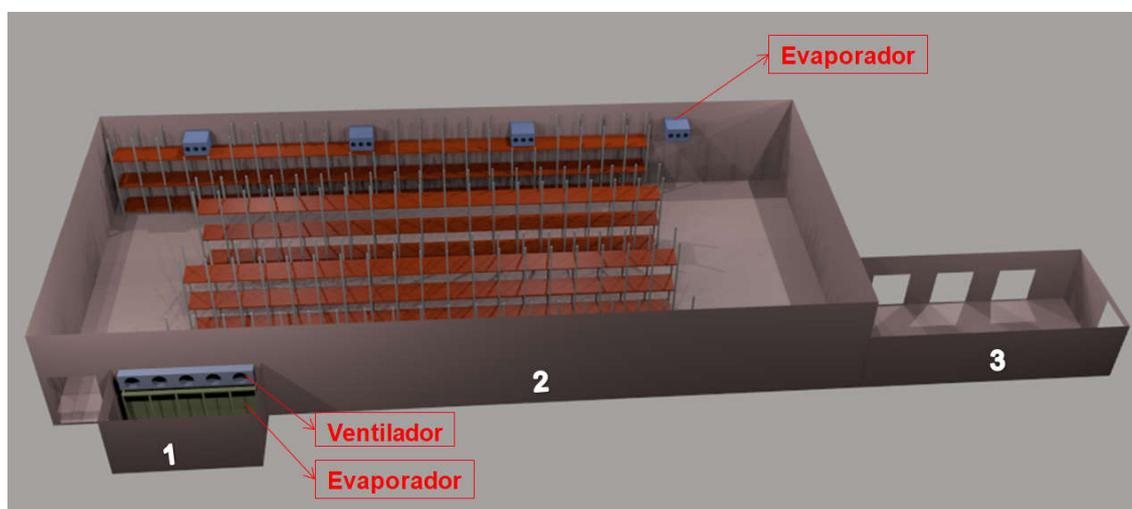
- **Envase:** As máquinas envasadoras recebem os produtos (leites fermentados e/ou bebidas lácteas) das linhas de mistura onde as bases lácteas são misturadas com os preparados de frutas. São máquinas automáticas que moldam ou recebem as embalagens primárias prontas (rotuladas ou não, dependendo do tipo de produto), fazem a dosagem dos produtos, seguida da selagem (com material laminado que pode conter o rótulo, dependendo do tipo de produto) e datagem (incluindo lote e datas de fabricação e validade).

A maioria dos produtos é envasada com temperatura na faixa de 12 a 15°C, esse intervalo está relacionado com as particularidades da fermentação e subsequente resfriamento de cada tipo de produto. Para esse caso, o processo se encerra dentro da câmara fria, quando os produtos chegam a temperaturas entre 0 e 10°C, enquanto aguardam a liberação e expedição. Entretanto, existem exceções em que os produtos continuam fermentando durante o envase, acondicionamento e paletização. Para esses casos, os produtos são envasados em temperaturas acima de 30°C e precisam de um pré-resfriamento, antes de seguirem para o armazenamento refrigerado, responsável por cessar a fermentação.

- **Embalagem secundária:** Das salas de envase os produtos seguem via esteiras para as salas de acondicionamento onde, manualmente, recebem as embalagens secundárias (caixas de papelão) de diferentes formatos e tamanhos, conforme características da embalagem primária.
- **Paletização:** As caixas são empilhadas, manualmente, em paletes de madeira (120 mm x 100 mm) obedecendo ao número específico de camadas e suas configurações, conforme estrutura das caixas, e amarrados com cintas específicas que garantem a sustentação do palete e reduzem os riscos de avaria.
- **Transporte até a câmara fria:** Os paletes prontos são transportados, com o auxílio da transpaleteira, para a câmara fria (ilustrada na Figura 9) onde ficam armazenados até sua liberação, com exceção dos produtos que são envasados em temperaturas mais altas. Para essa situação, antes de seguir para a câmara fria, o palete passa por um túnel de resfriamento (ilustrado na Figura 9) onde é resfriado até a temperatura de armazenamento (cada palete permanece 90 minutos no túnel - tempo padrão do processo).

- **Armazenamento:** Os paletes de produtos acabados são armazenados nos racks da câmara fria com auxílio de empilhadeira, onde a temperatura é controlada na faixa de 0 a 10 °C, conforme exigência da legislação.
- **Expedição:** A expedição dos produtos ocorre em caminhões frigoríficos (temperatura controlada na faixa de 0 a 10 °C) que seguem para os Centros de Distribuição (CDs) da companhia. A expedição ocorre 24 horas após a fabricação quando todos os documentos de liberação são avaliados pela Garantia da Qualidade. Para o carregamento a fábrica conta com uma antessala refrigerada (antecâmara, ilustrada na Figura 9) que previne danos à cadeia do frio, entretanto, o produto deve permanecer nela somente até a finalização da montagem da carga.

Figura 9: Ilustração dos ambientes refrigerados¹.



Fonte: Elaboração própria, 2018.

4.3 Medição das variáveis do sistema

Para a medição das variáveis (temperatura, velocidade de ar e umidade relativa) foram utilizados: Mini registradores de temperatura marca Testo 174 T que possuem sensores NTC de alta exatidão e permitem leituras na faixa de -30 à 70°C, armazenamento dos dados na memória interna e extração via software ComSoft Básico (ver Anexo I); Termômetro Infravermelho Minipa (ver se é o MT-350A) (ver Anexo I); Anemômetro digital Instrutherm e Termo higrômetro digital J Prolab (ver Anexo I). Todos os instrumentos pertencem à fábrica e são controlados pelo departamento de Manutenção, sendo calibrados interna ou externamente

¹ 1 – Túnel de Resfriamento; 2 – Câmara fria; 3 – Antecâmara.

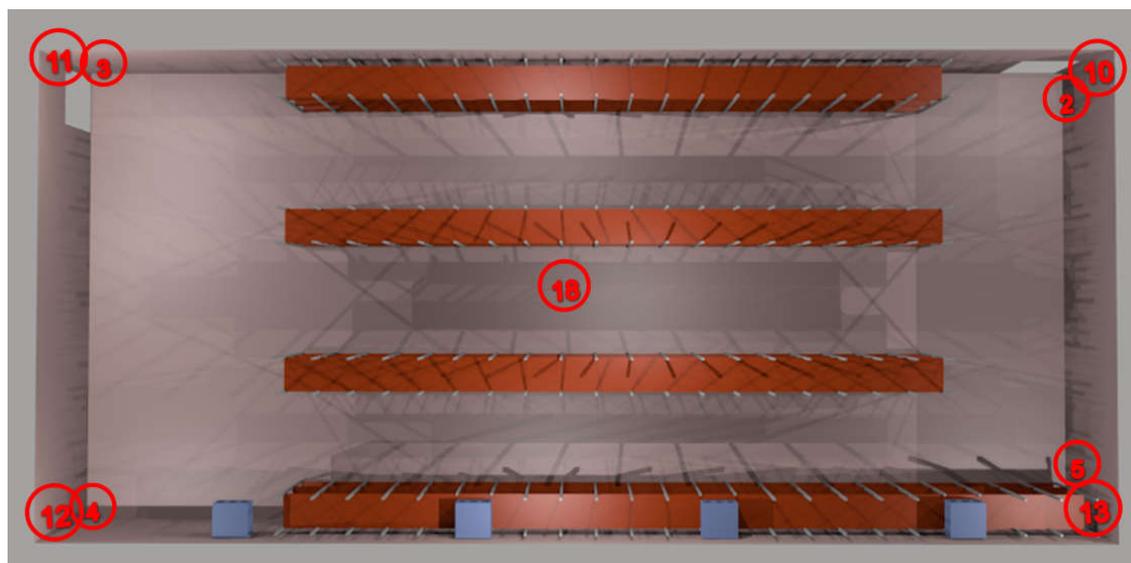
conforme recomendações dos fabricantes. As leituras foram realizadas conforme norma NBR 8888/1985 e NBR 12863/1993 e registradas em planilhas do Excel durante a rotina normal de produção da fábrica, com os equipamentos em regime estacionário.

Essa etapa foi alinhada com os departamentos de produção, segurança e logística e foi dividida em quatro testes², conforme descrição abaixo:

- ***Teste 1 – medições de parâmetros do ambiente na câmara fria e na antecâmara:*** Os registradores de temperatura foram posicionados na câmara fria e na antecâmara ao mesmo tempo, conforme ilustração da Figura 10, onde permaneceram por tempo superior a 24 horas, estando programados para registrar a temperatura em intervalos de 30 minutos; o anemômetro foi posicionado à frente dos evaporadores a distâncias de até 3 metros e as leituras foram feitas em triplicata; o termo higrômetro foi posicionado somente num ponto da câmara fria, as leituras foram registradas manualmente em intervalos de 2 horas durante 24 horas.

² Foram necessários itens para trabalho em altura (ver Anexo I).

Figura 10: Posição dos sensores na câmara fria e na antecâmara³.



Câmara fria



Antecâmara

Fonte: Elaboração própria, 2018.

- **Teste 2 – medições de parâmetros do ambiente no túnel de resfriamento:** Os registradores de temperatura foram posicionados no túnel de resfriamento, conforme ilustração da Figura 11, onde permaneceram por tempo superior a 24 horas, estando programados para registrar a temperatura em intervalos de 30 minutos; o anemômetro foi posicionado à frente dos evaporadores a distâncias de até 3 metros e as leituras

³ Foi adotado o termo “canal” seguido do número “n” para identificação da posição dos sensores nas câmaras.

foram feitas em triplicata (início, meio e fim do teste); o termo higrômetro foi posicionado somente num ponto do túnel, as leituras foram registradas manualmente em intervalos de 2 horas durante 24 horas.

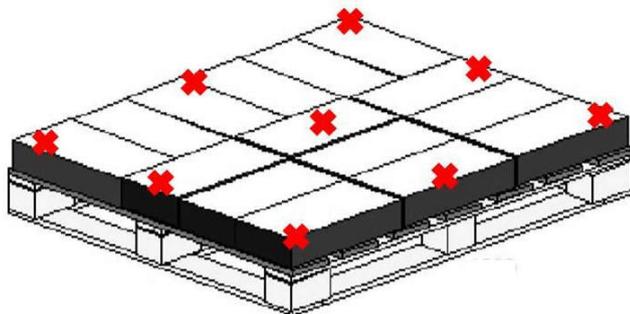
Figura 11: Posição dos sensores no túnel de resfriamento.



Fonte: Elaboração própria, 2018.

- **Teste 3 – medição de parâmetros de produto simulando a condição normal de resfriamento:** Um palete de iogurte submetido ao resfriamento no túnel foi desmontado após 90 minutos de resfriamento (tempo de permanência no túnel de resfriamento adotado na rotina de produção) e novamente após 24 horas de armazenamento (tempo mínimo de permanência na câmara fria) para medição da temperatura do produto (com auxílio do termômetro infravermelho) em 27 posições distribuídas nas camadas inferior, central e superior do palete, conforme Figura 12.

Figura 12: Pontos de medição na camada inferior do palete⁴.



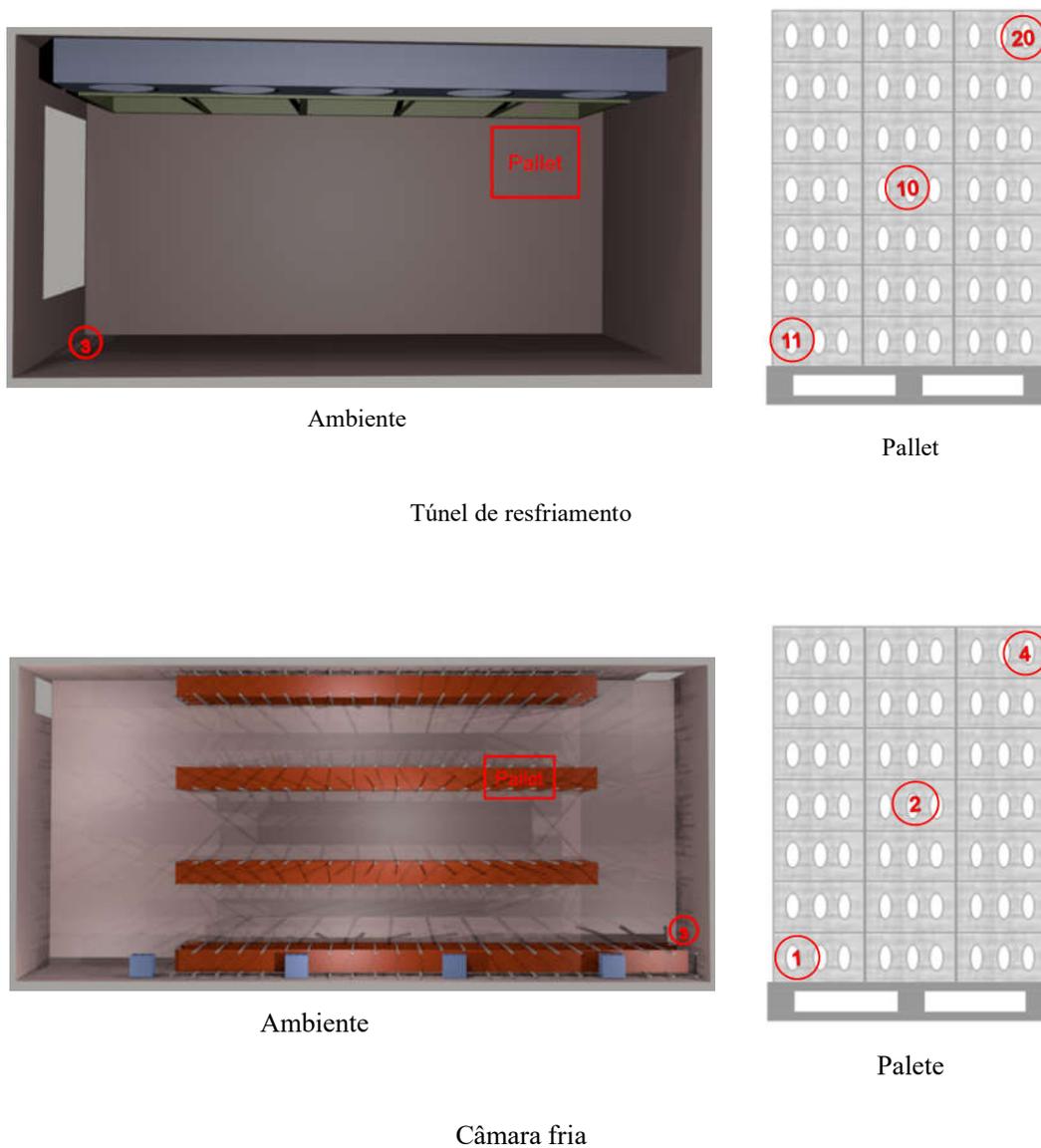
Fonte: Elaboração própria, 2018.

- **Teste 4 – medições de parâmetros do ambiente e do produto durante o resfriamento no túnel de resfriamento e na câmara fria:** Os registradores de temperatura foram posicionados nos ambientes de resfriamento e armazenamento (túnel de resfriamento e câmara fria) nos paletes de uma mesma ordem de produção ao mesmo tempo⁵ (simulando a condição normal do processo), conforme ilustração da Figura 12, nas mesmas configurações do Teste 1 (exceto para a velocidade do ar, pois o anemômetro havia sido enviado para calibração externa). A posição escolhida para medição da temperatura do ambiente foi a de menor desvio padrão em relação à média geral do ambiente nos Testes 1 e 2.

⁴ Idêntico para as demais camadas.

⁵ Não foi possível colocar os sensores dentro das embalagens, tendo sido colocados em contato com a embalagem primária durante a montagem do paleta nos diferentes pontos.

Figura 12: Distribuição dos sensores e posições dos paletes no Teste 4.



Fonte: Elaboração própria, 2018.

4.4 Análise de dados e diagnóstico do sistema

O processamento dos dados, gráficos, ANOVA e Teste de Tukey foram feitos através dos Softwares Excel, Origin Pro 8.0 e Minitab.

No caso das medições de temperatura; foram traçados os perfis de temperatura dos ambientes (Testes 1 e 2) para usar como base para as medições ambiente versus produto (Teste 4) uma vez que a disponibilidade de sensores não permitiu que todas as medições

ocorressem em paralelo. Também foram avaliadas condições operacionais e dos equipamentos que afetam o funcionamento normal do sistema, comprometendo sua eficiência.

4.5 Estimativa de carga térmica e dimensionamento

A estimativa da carga térmica para o túnel de resfriamento foi realizada conforme adaptação de Strobel (2013). A partir do valor de carga térmica em kW, foi estimada a capacidade frigorífica do equipamento capaz de atender a demanda da produção e a legislação vigente (IN nº49/2007). Também foi estimado o tempo de funcionamento do túnel em função do volume da produção.

A carga térmica para o ambiente foi calculada considerando as particularidades da sala, através das seguintes equações:

$$Q_T = \sum Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_P \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$$Q_1 - \text{Calor de transmissão} \quad Q_1 = (86,4) * U * A * \Delta T \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

U – Coeficiente de dissipação de energia (W/m²K);

A – Área de troca térmica (m²);

ΔT – Diferença de temperatura (K);

86,4 – constante para conversão de unidade.

$$Q_2 - \text{Calor de infiltração} \quad Q_2 = n * V * \Delta h \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

n – nº de trocas de ar;

V – Volume da câmara (m^3);

Δh – Diferença de entalpia (ar externo - ar interno) (kJ/m^3).

$$Q_3 - \text{Calor por iluminação} \quad Q_3 = P * t * (3,6) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

P – Potência da lâmpada (W);

t – Tempo de funcionamento (h/24h);

3,6 – constante para conversão de unidade.

$$Q_4 - \text{Calor por motores} \quad Q_4 = \frac{P * t * (3,6)}{n} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

t – Tempo de funcionamento (h/24h);

P – Potência dos motores (W);

n – Rendimento aproximado do motor;

3,6 – constante.

$$Q_5 - \text{Calor por pessoas} \quad Q_5 = n * q * T \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

n - Número de pessoas que circulam na câmara;

T - Tempo de permanência no interior da câmara (h/24h);

q – Calor gerado por pessoa (kJ/h).

$$Q_P - \text{Calor por palete} \quad Q_P = \sum Q_6 + Q_7 \quad (\text{Equação 9})$$

$$Q_6 - \text{Calor do produto} \quad Q_6 = m_{prod} * c_{prod} * \Delta T \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

m_{prod} – Massa do produto (Kg);

c_{prod} – Calor específico do produto (kJ/Kg °C);

ΔT – Diferença de temperatura (°C).

$$Q_7 - \text{Calor por embalagens} \quad Q_7 = m_{emb} * c_{emb} * \Delta T \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

m_{emb} – Massa da embalagem (Kg);

c_{emb} – Calor específico da embalagem (kJ/Kg°C);

ΔT – Diferença de temperatura (°C).

Para calcular o calor específico do produto foram utilizadas as fórmulas de Choi e Okos (1986) e a tabela nutricional do produto (ver Anexo II). A partir do valor da carga térmica foram estimados os valores para a capacidade frigorífica e o efeito frigorífico, considerando o Freon R-22 como fluido refrigerante.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Descrição e diagnóstico dos componentes do sistema

O sistema de refrigeração apresentado nos itens anteriores atende as diferentes linhas de produção da fábrica e deve garantir as condições de resfriamento e armazenamento previstas na legislação e requisitos de qualidade e segurança dos alimentos da companhia. Entretanto, esse sistema não foi dimensionado para essa condição de funcionamento e, mesmo apresentando resultados satisfatórios para a maioria dos produtos conforme observado na rotina da planta, os indicadores de qualidade sugerem falhas nas etapas de resfriamento e armazenamento para o caso particular em que o produto é envasado à temperatura de 35°C (PX⁶).

A operação é manual e o parâmetro temperatura é monitorado periodicamente para garantir que esteja dentro da faixa de trabalho pré-estabelecida. Entretanto, não estão bem definidas as frequências de degelo e manutenção dos diferentes componentes do sistema, sendo realizadas quando os operadores identificam a necessidade.

O funcionamento do túnel de resfriamento está previsto para tempo quase que integral, parando somente durante a rotina diária de limpeza da máquina que envasa o PX. O degelo estaria previsto para esta parada, entretanto, é realizado sempre que se observa a formação de gelo nas placas dos evaporadores e consequente elevação da temperatura do ambiente (> 10°C). A metodologia adotada para esta situação consiste na interrupção da circulação do fluido refrigerante nos evaporadores enquanto os ventiladores permanecem ligados para auxiliar no derretimento das placas de gelo. Quando todo o gelo é eliminado a circulação do fluido é restabelecida e o ambiente é resfriado até a menor temperatura (-5°C) para retornar ao uso. Na prática observou-se que o tempo total para o degelo é de 60 minutos e que são necessários mais 30 minutos para atingir -5°C.

O tipo de degelo adotado é o natural, o menos eficiente se comparado aos tipos elétrico, por água corrente e a gás quente, como descrevem sites especializados em refrigeração (Fregocenter, FrioPlus, Resfriando, etc.). No degelo a gás quente o procedimento chega a durar cerca de 10 minutos. Quanto ao fato do procedimento ser manual ou automático, a escolha varia com as características de cada processo e deve ser embasada pelo correto dimensionamento do sistema. Do contrário a automação pode trazer resultados ruins, como ocorreu numa tentativa feita na unidade. E por último, quanto ao item manutenção,

⁶ PX - Produto X.

todos os elementos do sistema devem passar por revisões periódicas preventivas que garantem a condição normal de funcionamento do sistema, além de representar um custo muito menor se comparada aos custos com reparos (FRIGOCENTER, 2018; RESFRIANDO, 2018; FRIOPLUS, 2018)

O tempo mínimo de funcionamento do túnel que garante o resfriamento de todos os paletes do PX produzidos, considerando as condições atuais do processo, foi estimado em 1.300 minutos/dia. Dessa forma, seria possível realizar somente um degelo por dia.

A câmara fria está organizada de modo que seja respeitado o FIFO (First In First Out) e funciona com ocupação média entre 40 e 60% de sua capacidade total ao longo de todo o ano, apresentando a menor ocupação durante os meses de inverno e a maior nos meses de verão, conforme demanda do mercado. A antecâmara foi prevista somente para o carregamento e, portanto, os produtos liberados transitam neste ambiente por cerca de 60 minutos (tempo necessário para montar uma carga) enquanto são alocados dentro dos caminhões frigoríficos.

Para os três ambientes foram observadas as seguintes situações que impactam negativamente a eficiência do sistema, uma vez que proporcionam o aumento da carga térmica no interior das câmaras conforme descrito no item 3.6:

- Grande movimentação de pessoas devido à existência de fluxos cruzados na câmara fria e na antecâmara;
- Alta frequência de abertura de portas e/ou permanência destas abertas por longos períodos de tempo em virtude de fluxos cruzados e falhas operacionais (para portas de fechamento manual), na câmara fria e na antecâmara;
- Desgaste nas borrachas de vedação das portas da câmara fria e da antecâmara;
- As dimensões das docas⁷ de carregamento não são compatíveis com as dimensões dos baús dos caminhões;
- Vazamento de Freon⁸;
- Um evaporador e seu respectivo ventilador do túnel de resfriamento não estavam funcionando;
- Um dos ventiladores de um evaporador da câmara fria estava com a hélice quebrada.

⁷ Portas utilizadas para conectar o baú do caminhão à antecâmara;

⁸ O ponto de vazamento não foi identificado, o mesmo foi identificado pela redução do volume do fluido no sistema.

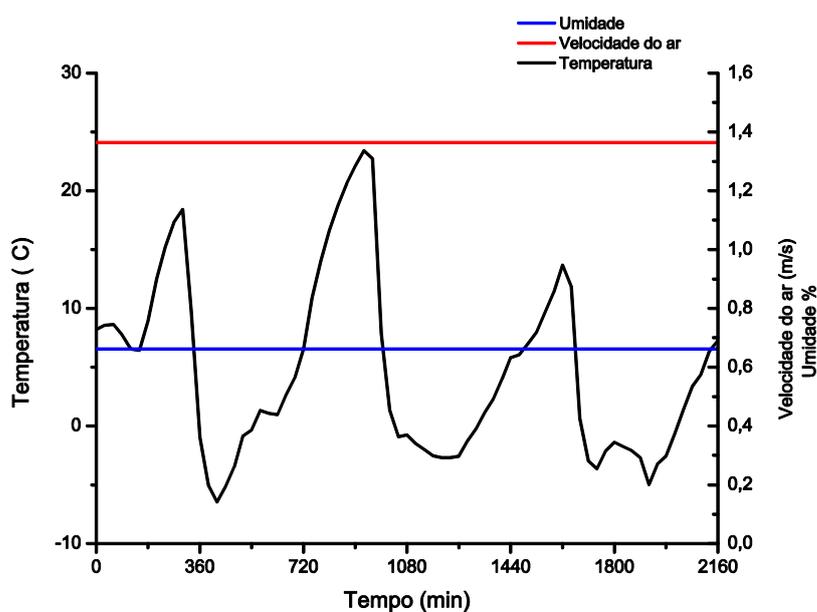
5.2 Perfis de temperatura dos ambientes

Os resultados dos monitoramentos dos parâmetros temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, conforme testes 1, 2 e 4, estão apresentados nos Gráficos 1 a 10. Os perfis obtidos sugerem a existência das situações descritas no item anterior pela característica das curvas, onde são observados picos de temperatura e grande variação dentro do intervalo estabelecido para cada ambiente.

5.2.1 Túnel de resfriamento

Todas as medições foram iniciadas com o sistema ligado na condição normal do processo (inclusive, contendo produto). Para o túnel de resfriamento o monitoramento da temperatura no teste 2 durou 36 horas (2.160 minutos), Gráfico 1, nesse intervalo foram observados 3 degelos ocasionados pela formação de gelo nas placas dos evaporadores (representados pelos pontos em que a temperatura supera o limite máximo de 10°C), com isso, e considerando o tempo necessário para atingir a condição de uso descrita anteriormente, os dados sugerem que o resfriamento de produtos propriamente dito ocorreu somente por cerca de 18 horas (1.080 minutos), não tendo atingido a necessidade diária da produção. Quanto à umidade relativa e velocidade do ar praticamente não foram observadas grandes variações durante o monitoramento o que sugere que a ineficiência do resfriamento não está relacionada com esses parâmetros.

Gráfico 1: Perfil de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar do Túnel - Teste 2.

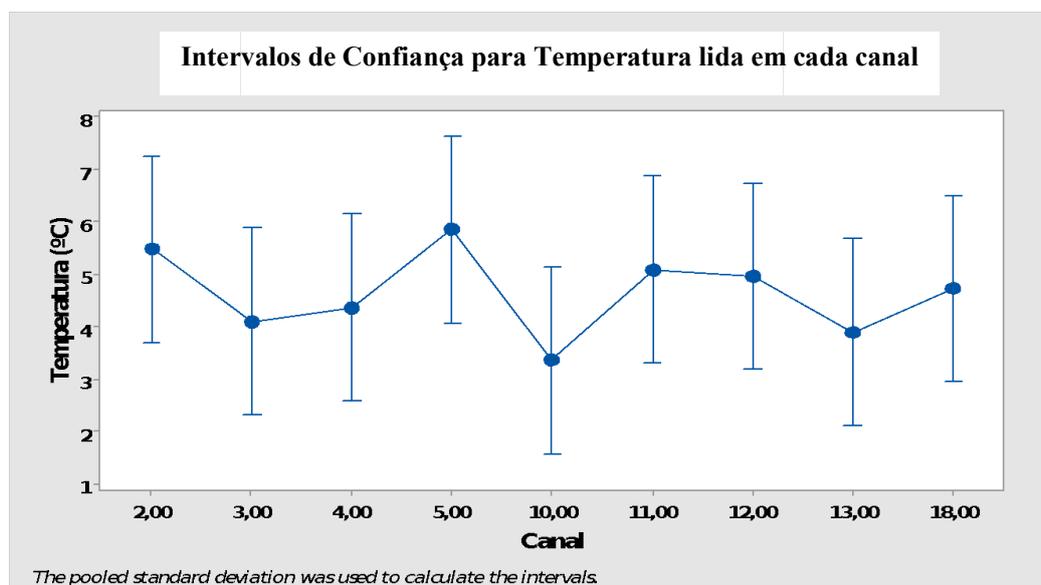


Fonte: Elaboração própria, 2018.

No teste 2 somente foram verificadas as variáveis do sistema. A partir desses dados foi feito a ANOVA (95% de significância) para identificar o ponto de menor desvio padrão em relação à média do ambiente, uma vez que a limitação de recursos e condições do processo não permitiu que todas as leituras ocorressem ao mesmo tempo. Bem como para avaliar a homogeneidade da temperatura entre os diferentes pontos de medição. O canal de menor desvio foi o canal de número 2 (7,084), entretanto, o valor de “p” da ANOVA foi de 0,636, sugerindo que não há diferença significativa entre os diferentes pontos de medição da sala a 95% de significância (análise detalhada no Apêndice A).

Além disso, foi possível verificar qual é a faixa de trabalho na prática para essa câmara conforme Gráfico 2 que mostra a variação de temperatura para os diferentes canais, onde todos os canais⁹ apresentam variação entre 1 e 8°C.

Gráfico 2: Variação de temperatura por ponto de medição – Teste 2.



Fonte: Elaboração própria, 2018.

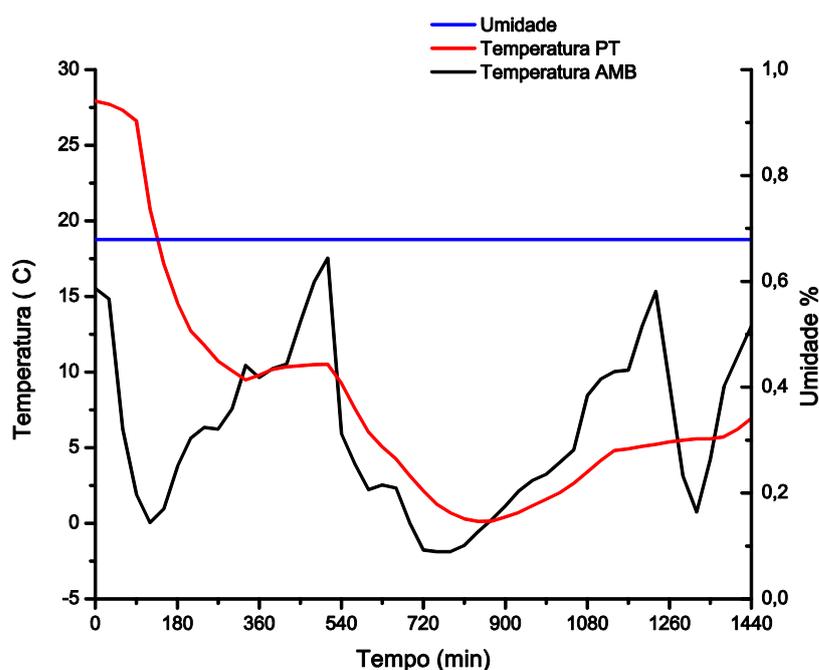
No teste 4 foi a vez de comparar a temperatura do ambiente com a do produto, sendo que a temperatura do produto foi medida de forma indireta devido a inviabilidade de inserir os sensores no interior das embalagens primárias na estrutura do palete. O monitoramento foi feito durante 24 horas (1.440 minutos), os dados obtidos estão ilustrados no Gráfico 3 (foi considerada para o produto a média dos 3 pontos de medição no palete). E sugerem que, nas condições atuais do processo, o tempo de 1, 5 horas (90) minutos não é suficiente para

⁹ Foi adotado o termo “canal” seguido do número “n” para identificação da posição dos sensores nas câmaras.

garantir que os produtos cheguem a temperatura de interesse (10°C ou menos), tendo atingido essa condição somente após cerca de 4,5 horas (270 minutos) do início do resfriamento.

Além disso, foi feita a ANOVA para comparar os diferentes pontos de medição do ambiente e do produto (ver Gráfico 4) e o valor de “p” obtido (0,007) sugere que a 95% de significância não há diferença significativa entre os diferentes canais (ver Apêndice A). Entretanto, os resultados do teste 3 (ilustrados na Figura 13) permitem ampliar essa percepção, pois foram contemplados 27 pontos de medição durante 90 minutos de resfriamento, inclusive no produto do centro geométrico do palete que apresentou a maior temperatura (20,1°C). E dos 27, somente 3 pontos nas extremidades do palete atingiram temperatura desejada.

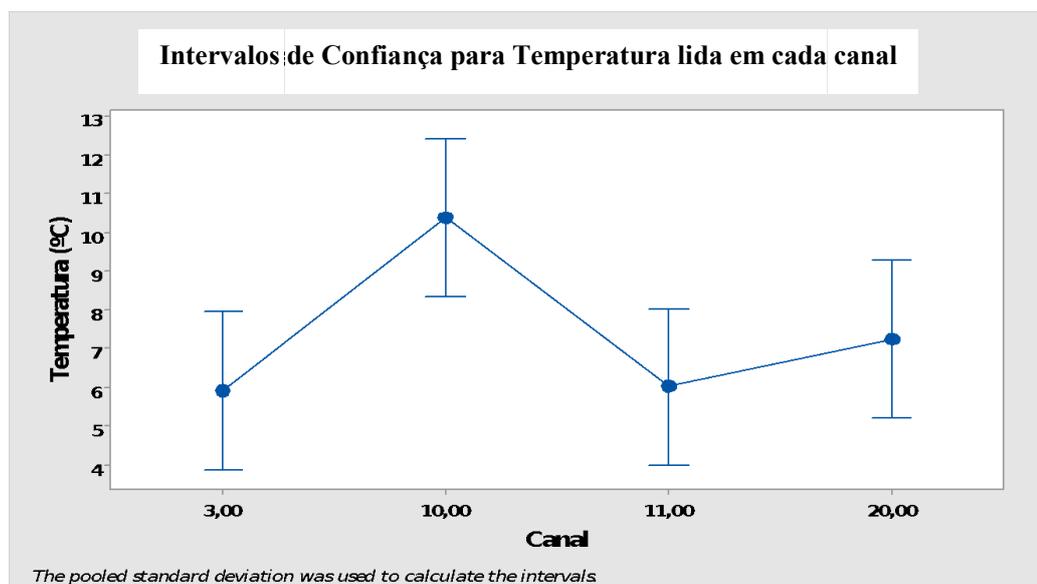
Gráfico 3: Perfil de temperatura e umidade relativa do Túnel e temperatura do produto - Teste 4¹⁰.



Fonte: Elaboração própria, 2018.

¹⁰ PT – Produto Terminado; AMB – Ambiente.

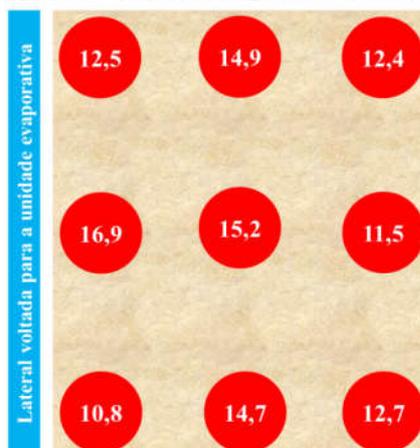
Gráfico 4: Variação de temperatura por ponto de medição – Teste 4.



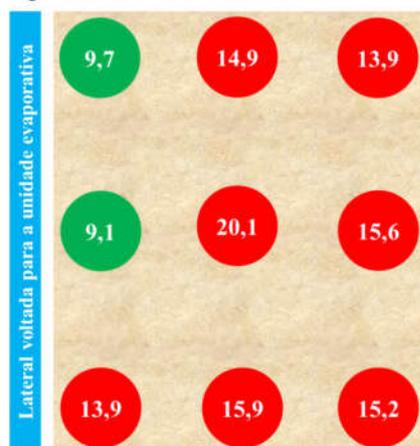
Fonte: Elaboração própria, 2018.

Figura 13: Temperatura do produto após 1,5 horas no túnel de resfriamento¹¹.

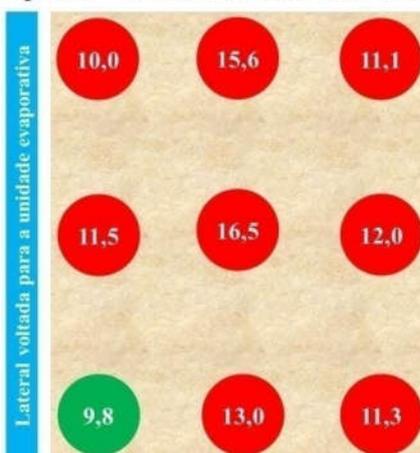
Vista Superior – Camada Superior do Palete no Túnel



Vista Superior – Camada Central do Palete no Túnel



Vista Superior – Camada Inferior do Palete no Túnel



Fonte: Elaboração própria, 2018.

¹¹ Vermelho – temperatura fora da faixa de interesse; Verde – temperatura dentro da faixa de interesse.

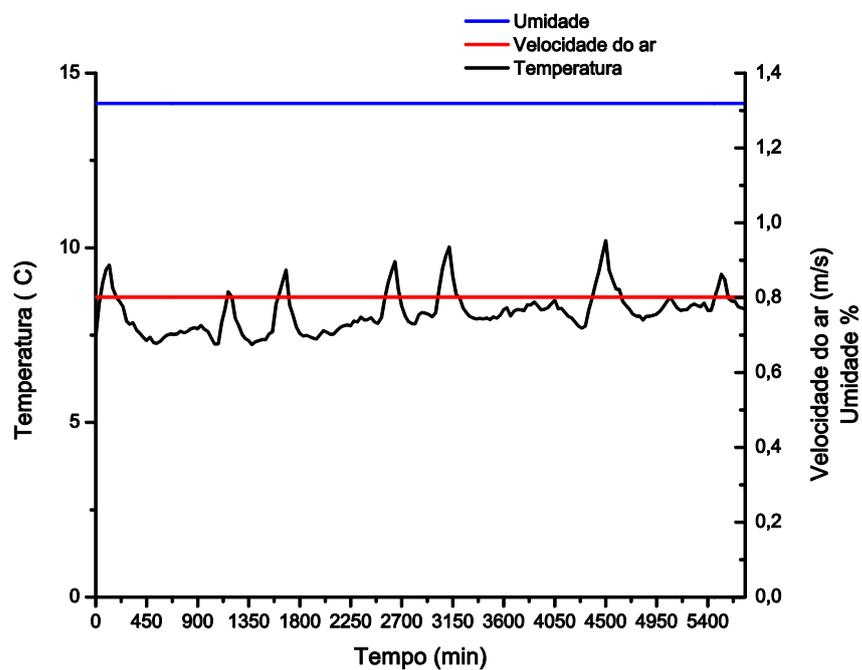
5.2.2 Câmara fria e antecâmara

Para a câmara fria o monitoramento da temperatura no teste 1 durou 95,5 horas (5.730 minutos), conforme Gráfico 5, neste intervalo foram observados alguns picos de temperatura devido a serviços de manutenção no interior da câmara e a 3 degelos (representados pelos pontos em que a temperatura chega ao limite de 10°C ou o supera). Os degelos ocorrem preferencialmente na madrugada e duram cerca de 1 hora, padrão adotado pela empresa. No restante do tempo de monitoramento a temperatura oscilou normalmente dentro do intervalo de 0 a 10°C. Quanto à umidade relativa e velocidade do ar praticamente não foram observadas grandes variações durante o monitoramento o que sugere que as variações de temperatura não estão relacionadas com esses parâmetros.

No teste 1 somente foram verificadas as variáveis do sistema. A partir desses dados foi feito a ANOVA (95% de significância) com mesma finalidade descrita anteriormente. O canal que apresentou menor variação quanto as leituras (desvio padrão igual a 0,4618) foi o canal de número 5 e o valor de “p” da ANOVA foi de 0,000, sugerindo que pelo menos um dos pontos apresentou diferença significativa em relação aos demais (ver Apêndice A), posteriormente, foi feito o Teste de Tukey. Basicamente todos os pontos são diferentes, com exceção dos canais 4 e 12 que apresentaram comportamento semelhante entre si (ver Apêndice A). Além disso, foi possível verificar qual é a faixa de trabalho na prática para essa câmara conforme Gráfico 6 que mostra a variação de temperatura para os diferentes canais, onde todos os canais apresentam variação entre 6 e 10°C.

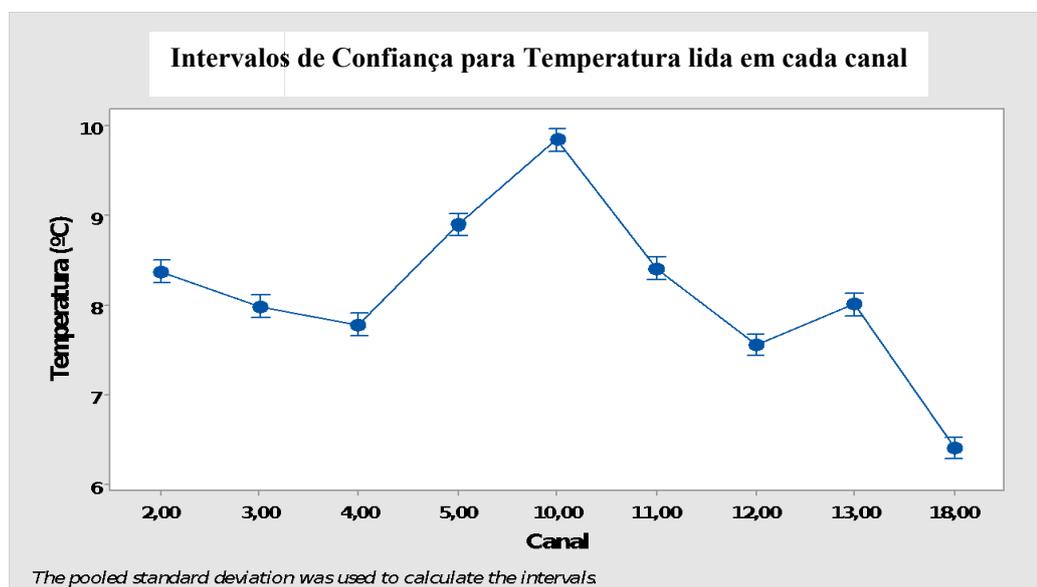
A falta de homogeneidade no ambiente pode ser explicada pelas infiltrações de calor geradas pelos *gaps* descritos no item 5.1, mas também devido à organização dos produtos entre as ruas da câmara que cria regiões mais quentes, onde o produto ingressa inicialmente no ambiente resfriado, e regiões mais frias onde o produto já está armazenado por algum tempo. Além disso, vale destacar que naturalmente, em virtude das características de densidade do ar, as regiões mais altas tendem a concentrar o ar quente e as mais baixas o ar frio. Apesar dos evaporadores contarem com ventiladores que aceleram a circulação do ar frio pela sala, o volume desta e as diferenças relatadas entre as ruas dificulta essa circulação.

Gráfico 5: Perfil de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar da Câmara fria - Teste 1.



Fonte: Elaboração própria, 2018.

Gráfico 6: Variação de temperatura por ponto de medição – Teste 1.

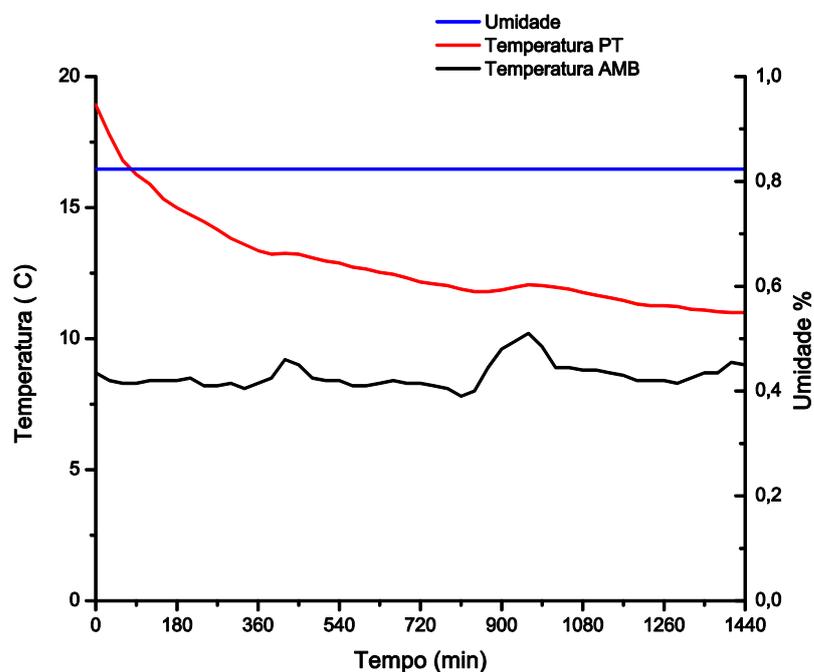


Fonte: Elaboração própria, 2018.

No teste 4, como descrito anteriormente, foram comparadas a temperatura para o ambiente e para o produto. O monitoramento foi feito durante 24 horas (1.440 minutos), os dados obtidos estão ilustrados no Gráfico 7, sugerindo que o armazenamento de 24 horas não é suficiente para garantir a temperatura adequada para os produtos que acessam a câmara fria com temperaturas elevadas.

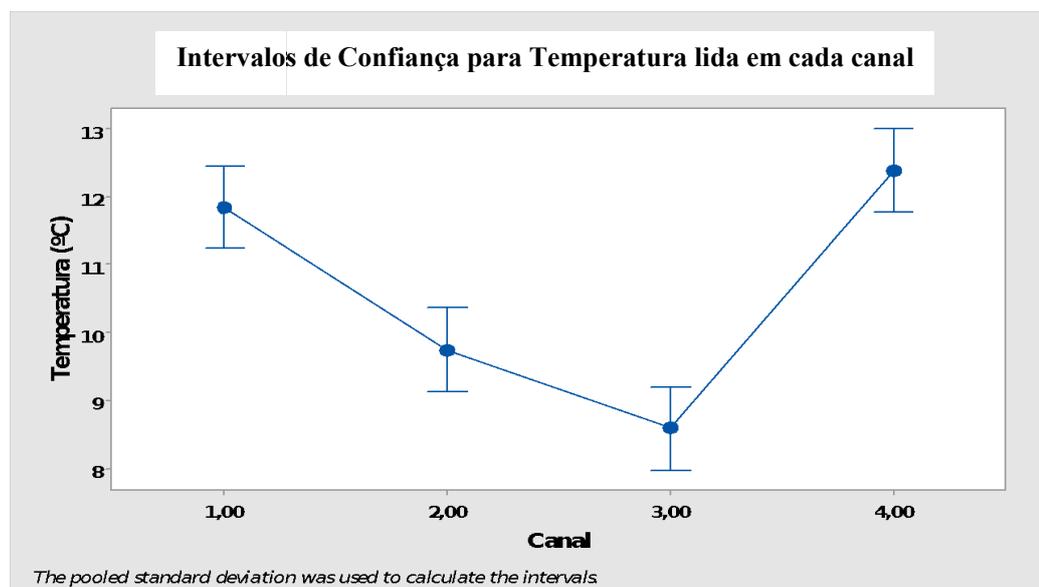
Além disso, foi feita a ANOVA para comparar os diferentes pontos de medição do ambiente e do produto (ver Gráfico 7) e o valor de “p” obtido (0,000) sugerindo que pelo menos um dos pontos apresentou diferença significativa em relação aos demais (ver Apêndice A), por isso, foi feito o Teste de Tukey para identificar qual(is) seria esse(es) ponto (os). Basicamente todos os pontos são diferentes, com exceção dos canais 4 e 1 que apresentaram comportamento semelhante entre si (ver Apêndice A). Entretanto, os resultados do teste 3 (ilustrados na Figura 14) permitem ampliar essa percepção, pois foram contemplados 27 pontos de medição durante 24 horas de resfriamento, inclusive no produto do centro geométrico do palete que apresentou a maior temperatura (30,5°C). E dos 27, somente 2 pontos no interior do palete não atingiram temperatura desejada.

Gráfico 7: Perfil de temperatura e umidade relativa da Câmara fria e temperatura do produto - Teste 4.



Fonte: Elaboração própria, 2018.

Gráfico 8: Variação de temperatura por ponto de medição – Teste 4.



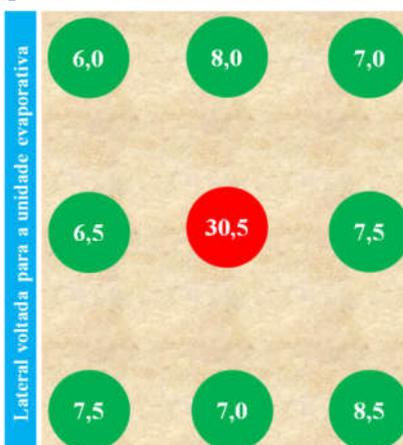
Fonte: Elaboração própria, 2018.

Figura 14: Temperatura do produto após 24 horas na câmara fria¹².

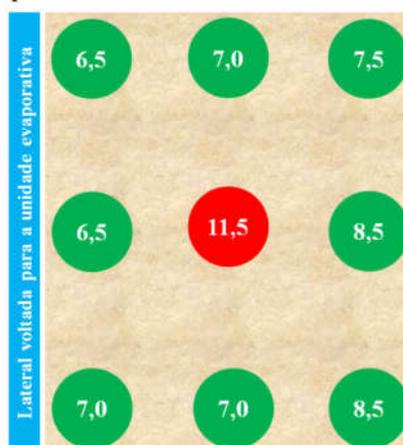
Vista Superior – Camada Superior do Palete na Câmara



Vista Superior – Camada Central do Palete na Câmara



Vista Superior – Camada Inferior do Palete na Câmara



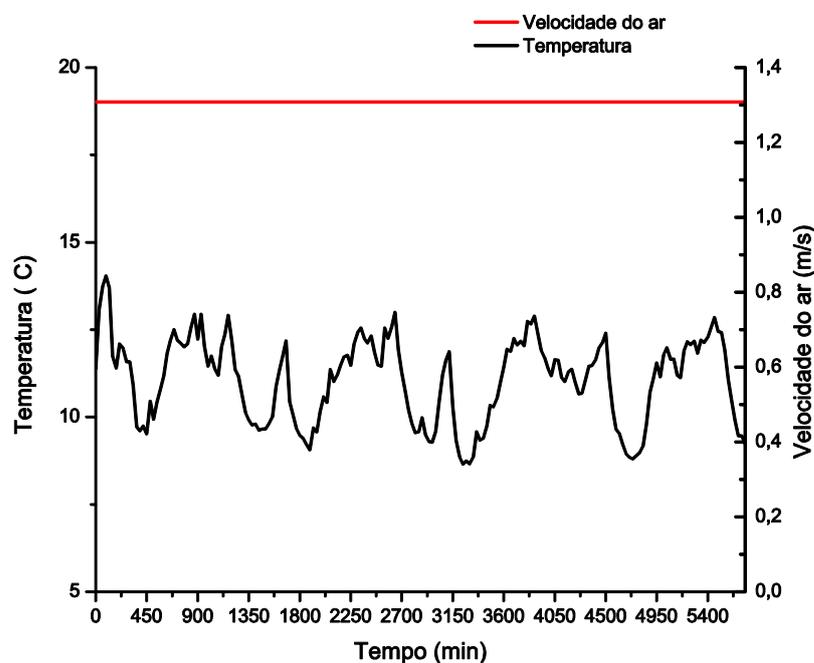
Fonte: Elaboração própria, 2018.

¹² Vermelho – temperatura fora da faixa de interesse; Verde – temperatura dentro da faixa de interesse.

Ao mesmo tempo foi monitorada a temperatura da antecâmara que teve a mesma duração, conforme Gráfico 11. Nesse intervalo foi observada a maior variação de temperatura em comparação com as demais salas. Como a antecâmara está conectada à área externa, a constante abertura de portas e as frestas presentes nas docas de carregamento contribuem para infiltrações de calor que implicam nesse tipo de curva. Além disso, durante carregamento o fluxo da empilhadeira é constante e também representa uma fonte de calor considerável. Quanto à velocidade relativa não foram observadas grandes variações durante esse tempo, sugerindo que as variações de temperatura não estão relacionadas com esse parâmetro.

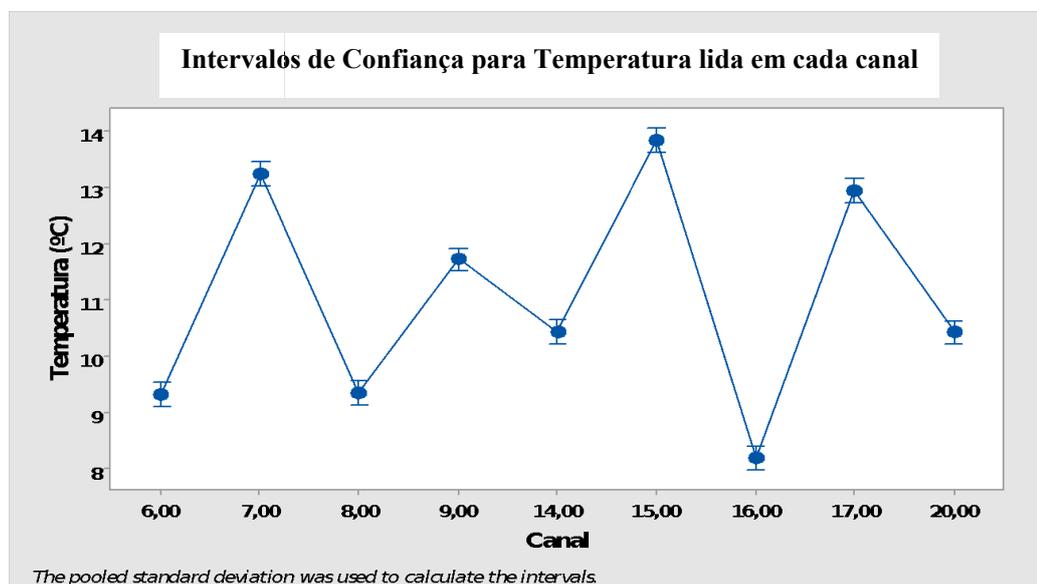
A ANOVA (95% de significância) para este caso retornou 0,000 como valor de “p”, sugerindo que pelo menos um dos pontos apresentou diferença significativa em relação aos demais (análise detalhada no Apêndice A), por isso, foi feito o Teste de Tukey. Foi observado que os pontos 15, 9 e 16 são diferentes de todos os outros, 7 e 17 são semelhantes entre si, 14 e 20 são semelhantes entre si, 8 e 6 são semelhantes entre si (ver Apêndice A). Além disso, foi possível verificar qual é a faixa de trabalho na prática para essa câmara conforme Gráfico 10 que mostra a variação de temperatura para os diferentes canais, onde todos os canais apresentam variação entre 8 e 14°C.

Gráfico 9: Perfil de temperatura e velocidade do ar da Antecâmara - Teste 1.



Fonte: Elaboração própria, 2018.

Gráfico 10: Variação de temperatura por ponto de medição – Teste 1.



Fonte: Elaboração própria, 2018.

5.3 Carga térmica

As informações e considerações utilizadas para calcular a carga térmica para o túnel estão descritas no Quadro 1 a seguir:

Quadro 1: Dados e considerações para cálculo de carga térmica.

	Funcionamento da máquina: 1200 min/dia (20h/dia) - Quantidade total de paletes/dia: 55 paletes.	
Q _P	Q_P = 3.742.200 kJ/24horas	
	Massa de produto em um paleta:	756 Kg;
	Massa das embalagens considerada desprezível, pois não ultrapassa 10% da massa de produto:	47,04Kg.
	Calor específico para iogurtes (Choi e Okos):	3,6 Kcal/Kg°C (ver Anexo II);
	Diferença de temperatura entre o ambiente e o produto:	25°C.

Q ₃	Lâmpadas no interior da sala são de LED (baixa dissipação de calor) e não permanecem ligadas full time (desprezível para efeito de cálculo).
Q ₅	<p style="text-align: center;">Q₅ = 1.744,5 kJ/24horas</p> <p>Calor por pessoa à 5°C: 872,25 kJ/h;</p> <p>Permanência da uma pessoa por dia: 2h.</p>
Q ₁	<p>Dimensões da sala: largura = 5 m; comprimento = 8 m; altura = 4m;</p> <p>Paredes e teto: constituídas por isopainéis que inibem a troca térmica com o ambiente externo; a diferença de temperatura em relação ao ambiente externo deve ser considerada para 3 paredes e o teto, pois uma das paredes está em contato com a câmara fria e não implica transmissão de calor.</p> <p style="text-align: center;">Q₁ = 3.244,032 kJ/24horas</p> <p>Diferença de temperatura: 20°C</p> <p>A (paredes + teto): 112 m²; coeficiente de troca térmica isopainel 100 mm: 0,2018 W/m²K;</p> <p>Piso constituído por concreto c/cobertura de 10 cm: Área = 40 m², coeficiente de transmissão de calor: 3,49 W/m²K.</p>

Q ₂	<p style="text-align: center;">Q₂ = 689.702,4 kJ/24horas</p> <p>Um palete é colocado no túnel a cada 20-25 minutos: 72 trocas de ar/24 horas;</p> <p>Consideradas: Entalpia à 25°C e 80% de umidade (ar externo): 78,71 kJ/m³; e Entalpia à 5°C e 70% de umidade (ar interno): 18,84 kJ/m³;</p> <p>Volume da sala: 160 m³.</p>
Q ₄	<p>n = 0,85.</p> <p style="text-align: center;">Q₄ = 434.121,52 kJ/24horas</p> <p>Sala contendo 8 motores (1 para cada ventilador), ligados durante todo o resfriamento: 21,7 horas;</p> <p>Potência por motor: 2942 W.</p>
Q _T	<p style="text-align: center;">Tempo de funcionamento do túnel: 1300min/dia.</p> <p style="text-align: center;">Q_T = 4.871.012,452 kJ/24horas</p> <p style="text-align: center;">Q_T = 66,587 kW¹³ ou 18,917 TR¹⁴</p>

Fonte: Elaboração própria.

5.4 Capacidade frigorífica e sugestão de equipamentos

A capacidade frigorífica para um sistema com as características descritas no item 5.3 deve ser no mínimo equivalente à carga térmica (Q_T) calculada para garantir sua eficiência conforme descrito no item 3.6. Alguns autores sugerem acrescentar um 10% do valor estimado por razões de segurança.

¹³ Considerada uma margem de segurança de 10%;

¹⁴ TR – Unidade: Tonelada de Refrigeração.

Para este caso específico, sugere-se considerar a substituição do fluido refrigerante (Freon), devido ao fato do mesmo ser um dos fluidos com grande impacto à camada de ozônio, pelo fluido utilizada para as demais câmaras (câmara fria e antecâmara) Amônia (FERRAZ, 2008). Para isso, é preciso rever as tubulações e componentes do sistema para que atendam às novas demandas como, por exemplo, tubulações devem ser constituídas de ferro ou aço (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2005). Com isso, podem ser definidos os demais itens do sistema, considerados cruciais ao seu desempenho: evaporadores e compressores. Os tipos em uso concordam com o item 3.8 e podem ser mantidos; e dessa forma, também se mantém o tipo de resfriamento por ar forçado que se apresenta como o mais viável a nível industrial, conforme item 3.7.

Além disso, conforme foi descrito no item 3.6, fatores como embalagens e geometria do produto, por exemplo, são determinantes no resfriamento e também devem ser estudados. Para este caso específico, foram identificadas oportunidades de melhoria no design de embalagens e na sua disposição nos paletes que estão sendo exploradas. Uma melhoria já implementada foi a modificação do desenho da embalagem secundária de modo que as aberturas estejam alinhadas com embalagens primárias na paletização, favorecendo a passagem do fluxo de ar frio através do palete.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- As condições de manutenção e operação dos ambientes que compõem o sistema impactam negativamente o seu funcionamento, por isso, existem variações significativas na temperatura da câmara fria e da antecâmara e ineficiência no pré-resfriamento;
- Apesar dos *gaps* observados, a câmara fria atende a demanda de produção, uma vez que esta funciona com 40 a 60% de ocupação;
- O tempo de 24 horas é suficiente para garantir que os produtos atinjam a faixa de 0 a 10°C, exceto para casos de falha no pré-resfriamento;
- O túnel de resfriamento não atende a demanda da produção;
- O tempo de pré-resfriamento de 1,5 horas não é suficiente para garantir que os produtos atinjam a temperatura de interesse, ao invés disso seriam necessárias, pelo menos, 4,5 horas para a condição atual;
- Na prática as faixas de trabalho observadas para o túnel, a câmara e a antecâmara são respectivamente: 4 à 8 °C, 6 à 10°C e 8 à 14°C;
- A capacidade frigorífica estimada para o túnel foi de 66,587 kW. Assim sugere-se utilizar um sistema de no mínimo 66,587 kW

Por fim, o desenvolvimento deste trabalho possibilitou a vivência de um problema prático no campo da engenharia de alimentos, contribuindo para o amadurecimento de diferentes conceitos trabalhados ao longo da graduação. Com isso, espera-se estimular a parceria universidade empresa no estudo de problemas e soluções práticos que impliquem melhoria para produtos e processos.

Sugestões para a empresa: Unificar o sistema, trocando o CFC R-22 por Amônia; Dimensionar o sistema considerando as 3 câmaras e o valor da carga térmica estimada; Melhorar o fluxo do processo, eliminando cruzamentos nas linhas de produção; Melhorar a vedação para as aberturas das câmaras; Determinar um cronograma de manutenção e degelo, especificando uma frequência que obedeça às necessidades do processo; Utilizar um método de degelo diferente ao adotado atualmente (Natural); Realizar ensaios específicos para melhorar a troca de calor durante o resfriamento no que respeita às embalagens.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. C. R. Relatório de Avaliação de Estágio: Refrigeração Industrial. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. MG, 2007.

ANDERSON, B. A.; SARKAR, A. THOMPSON, J. F. SINGH, R. P. Commercial-Scale Forced-Air Cooling of Packaged Strawberries. American Society of Agricultural Engineers. Vol. 47 (1): 183-190, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12863 – Câmaras de ensaios para refrigeradores, congeladores, combinados e aparelhos similares de uso doméstico: Construção e controle. Vol.1, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8888 – Refrigeradores e Congeladores Elétricos: Medição do Consumo de Energia. Vol.1, 1985.

BARROSA, M. R. Princípios fundamentais da transferência de calor. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. 2004.

BEZERRA, J. R. M. V.; RIGO, M.; RAYMUNDO, M. S.; BASTOS, R. G. Introdução à tecnologia de leite e derivados. Universidade Estadual do Centro-Oeste. Editora UNICENTRO, Paraná, 2010.

BRACKMANN, A.; GIRARDI, C. L.; BENDER, R. J.; CARON FILHO, O. R. Armazenamento Refrigerado. Série Frutas do Brasil: Maçã Pós-colheita – EMBRAPA, 2003. Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio>> Acesso: Nov, 2018.

BRASIL. Decreto nº 9.013, de 29 de março de 2017. Dispõe sobre o Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal. Diário Oficial da União, 2017.

BRASIL. Instrução Normativa nº 46, de 23 de outubro de 2007. Aprova o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade de Leites Fermentados. Diário Oficial da União, 2007.

CORRIEU, G.; BÉAL, C. Yougurt: The products and its manufacture. In: CABALLERO, B.; FINGLAS, P. and TOLDRÁ, F. (eds.) The Encyclopedia of Food and Health vol. 5, pp. 617-624. Oxford: Academic Press, 2016. Disponível em: <www.researchgate.net> Acesso: Out, 2018.

COSTA, M. A. Relatório de estágio supervisionado obrigatório (ESO): Dairy Partners Americas Nordeste Produtos Alimentícios Ltda: vivências na garantia da qualidade e no sistema de inspeção federal. Trabalho de ESO (Estágio Supervisionado Obrigatório: Curso de Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia de Alimentos, Garanhuns, BR – PE, 2018.

FERRAZ, F. Apostila de Refrigeração. Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia. Unidade de Ensino: Santo Amaro – BA, 2008.

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY KHARAGPUR. Lesson 10 Vapour Compression Refrigeration Systems. Mechanical Engineering, IIT Kharagpur, version1. Disponível em: <<http://www.iitkgp.ac.in>> Acesso: Out, 2018.

KIENHOLZ, J.; EDEOGU, I. Fresh Fruit & Vegetable Pre-cooling. Alberta Agriculture, Food and Rural Development. Alberta, Canadá - 2002.

MARINI, G. A.; BAINY, E. M.; LENZI, M. K.; CORAZZA, L. Freezing and thawing of processed meat in a industrial freezing tunnel. Acta Scientiarum. Technology. Maringá, v.36, n.2, p.361-368, Apr.-June, 2014.

MARTINELLI JUNIOR, L. C. Apostila Refrigeração e Ar-Condicionado: Parte II. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2017. Disponível em: <<https://wiki.sj.ifsc.edu.br>> Acesso: Nov, 2018.

MARTINHO, L. C. S. Modelagem, simulação e otimização de refrigeradores por absorção. Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Curitiba, 2013.

MENEZES, M. F. C.; SIMEONI, C. P.; ETCHEPARE, M. A.; HUERTA, K.; BORTOLUZZI, D. P.; MENEZES, C. R. Microbiota e conservação do leite. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET. V. 18. Ed. Especial Mai. 2014, p. 76-89.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. N899 – Nota técnica nº 03/2004: Refrigeração industrial por amônia: riscos, segurança e auditoria fiscal. Brasília: MTE, SIT, DSST, 2005.

MOREIRA, J. R.S. Introdução à transferência de calor convectiva. Nota de aula de PME 2361 – Processo de Transferência de Calor. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/pme/sisea/>> Acesso: Dez, 2018.

NUNES, T. K.; Modelagem, simulação e otimização de sistemas de refrigeração por compressão de vapor. Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Curitiba, 2015.

OLIVEIRA, E. S. F.; SOARES, M. V.; HECK, R. T.; OLIVEIRA, E. M. Dimensionamento do Sistema Frigorífico de Câmaras-frias para Congelamento e Resfriamento de Carnes. Anais do VII Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão – Universidade Federal do Pampa, 2015.

OLIVEIRA, E. S. F.; SOARES, M. V.; HECK, R. T.; OLIVEIRA, E. M. Dimensionamento do sistema frigorífico de câmaras-frias para congelamento e resfriamento de carnes. Anais do VII Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão – Universidade Federal do Pampa. Rio Grande do Sul, 2015.

ORDÓÑEZ, J. A. et al. **Tecnologia de Alimentos**. Vol. 2. Porto Alegre: Artmed, 2005.

PEREIRA, P. Importância da Cadeia de Frio na Segurança Alimentar de Produtos Congelados e Refrigerados. Escola Superior Agrária de Coimbra. Coimbra, PT, 2011.

PROKOPOV, T.; TANCHEV, S. Methods of Food Preservation. Food Safety: A Practical and Case Study Approach. Springer Science + Business Media, LLC. New York, USA, 2007.

ROBERT, N. F. Dossiê técnico: Fabricação de Iogurtes. Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro. Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, 2010. Disponível em: <www.respostatecnica.org.br> Acesso: Out, 2018.

SADHU, S. P. Effect of cold chain interruptions on the shelf-life of fluid pasteurised skim Milk at the consumer stage. Brazilian Journal of Food Technology. Campinas, v.21, e2017064, 2018.

SHARMA, S. Food Preservatives and their harmful effects. International Journal Of Scientific and Research Publications, Volume 5, Issue 4, April 2015.

SILVA, A. Câmaras Frigoríficas – aplicação, tipos, cálculo de carga térmica e boas práticas de utilização visando a racionalização da energia elétrica. Ambiente Gelado, 2018. Disponível em: <<http://www.ambientegelado.com.br/v51/index.php/artigos-tecnicos>> Acesso: Nov, 2018.

SILVA, A. I. D.; PEREIRA, F. J. C.; BEIRÃO, M. C. R. V.; GOMES, M. R. F. S; MOURA, P. C.; PORFÍRIO, P. A.; FERNANDES, P. D. L. Produção de Iogurte. Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia. Porto, 2010.

SILVA, G. B. A Gestão da cadeia do frio: Uma análise de fatores logísticos. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, G. B. Entendendo a Cadeia do Frio. Cadeia do Frio Soluções e Tecnologia, 2018. Disponível em: <<http://cadeiadofrio.com.br>> Acesso: Set, 2018.

STROBEL, C. Refrigeração e Ar condicionado: Carga térmica em instalações frigoríficas. Universidade Federal do Paraná – Departamento de Engenharia Mecânica. Paraná, 2013. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO> Acesso: Nov, 2018.

TASSINI, J. O. Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial: Estudo de caso. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Guaratinguetá, 2012.

TERUEL, B. J. M. Tecnologias de resfriamento de frutas e hortaliças. R. Bras. Agrociência, Pelotas, v.14, n.2, p.199-200, abr-jun, 2008.

TERUEL, B.; CORTEZ, L. A. LEAL, P.; LIMA, A. G. B. Estudo teórico do resfriamento por ar forçado de frutas de geometrias diferentes. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 21(2): 228-235, maio-ago, 2001.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Termodinâmica: Ciclos de refrigeração. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SP, 2015. Disponível em: <www.edisciplinas.usp.br> Acesso: Out, 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Evaporadores. Servidor de pastas da UFPR, 2010. Disponível em: <<https://docs.ufpr.br/~rudmar/refri>> Acesso: Dez, 2018.

VASCONCELOS, M. A. S.; MELO FILHO, A. B. Conservação de Alimentos. Programa de Escola Técnica Aberta do Brasil. Recife: EDUFRPE, 2010.

RESFRIANDO. Portal de conteúdo técnico e educativo de refrigeração industrial e comercial. Disponível em: <<http://www.resfriando.com.br/>> Acesso: Dez, 2018.

FRIGOCENTER. Indústria de refrigeração. Disponível em: <<https://frigocenter.com.br/blog/>> Acesso: Dez, 2018.

FRIOPLUS. Engenharia, treinamentos e representações. Disponível em: <<http://www.frioplus.com.br/>> Acesso: Dez, 2018.

APÊNDICE

Apêndice A – ANOVA Minitab

Túnel – Teste 2

One-way ANOVA: Temperatura (°C) versus Canal

Analysis of Variance

Source	DF	AdjSSAdj	MS	F-Value	P-Value
Canal	8	365,9	45,73	0,76	0,636
Error	648	38844,5	59,95		
Total	656	39210,3			

Means

Canal	N	Mean	StDev	95% CI
2,00	73	5,479	7,084	(3,700; 7,259)
3,00	73	4,104	8,245	(2,325; 5,884)
4,00	73	4,364	7,269	(2,585; 6,144)
5,00	73	5,849	6,383	(4,070; 7,629)
10,00	73	3,37	8,83	(1,59; 5,15)
11,00	73	5,088	7,241	(3,308; 6,867)
12,00	73	4,962	7,592	(3,182; 6,741)
13,00	73	3,90	8,71	(2,12; 5,68)
18,00	73	4,733	7,991	(2,953; 6,512)

Pooled StDev = 7,74243

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Canal	N	Mean	Grouping
5,00	73	5,849	A
2,00	73	5,479	A
11,00	73	5,088	A
12,00	73	4,962	A
18,00	73	4,733	A
4,00	73	4,364	A
3,00	73	4,104	A
13,00	73	3,90	A
10,00	73	3,37	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Túnel – Teste 4

One-way ANOVA: Temperatura (°C) versus Canal

Analysis of Variance

Source	DF	AdjSSAdj	MS	F-Value	P-Value
Canal	3	642,5	214,15	4,12	0,007
Error	192	9984,0	52,00		
Total	195	10626,5			

Means

Canal	N	Mean	StDev	95% CI
3,00	49	5,918	5,380	(3,886; 7,950)
10,00	49	10,40	9,03	(8,37; 12,43)
11,00	49	6,020	5,728	(3,989; 8,052)
20,00	49	7,24	8,04	(5,21; 9,27)

Pooled StDev = 7,21111

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Canal	N	Mean	Grouping
10,00	49	10,40	A
20,00	49	7,24	A B
11,00	49	6,020	B
3,00	49	5,918	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Câmara – Teste 1

One-way ANOVA: Temperatura (°C) versus Canal

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Canal	8	1371	171,437	221,53	0,000
Error	1719	1330	0,774		
Total	1727	2702			

Means

Canal	N	Mean	StDev	95% CI
2,00	192	8,3797	0,9387	(8,2552; 8,5042)
3,00	192	7,9859	0,7868	(7,8614; 8,1105)
4,00	192	7,7859	0,9137	(7,6614; 7,9105)
5,00	192	8,8990	0,4618	(8,7744; 9,0235)
10,00	192	9,8443	1,0859	(9,7198; 9,9688)
11,00	192	8,4130	0,8004	(8,2885; 8,5375)
12,00	192	7,5599	0,8207	(7,4354; 7,6844)
13,00	192	8,0078	0,5307	(7,8833; 8,1323)
18,00	192	6,4000	1,2811	(6,2755; 6,5245)

Pooled StDev = 0,879700

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Canal	N	Mean	Grouping
10,00	192	9,8443	A
5,00	192	8,8990	B
11,00	192	8,4130	C
2,00	192	8,3797	C
13,00	192	8,0078	D
3,00	192	7,9859	D
4,00	192	7,7859	D E
12,00	192	7,5599	E

18,00 192 6,4000 F

Means that do not share a letter are significantly different.

Câmara – Teste 4

One-way ANOVA: Temperatura (°C) versus Canal

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Canal	3	467,9	155,974	33,56	0,000
Error	192	892,2	4,647		
Total	195	1360,1			

Means

Canal	N	Mean	StDev	95% CI
1,00	49	11,853	1,500	(11,246; 12,460)
2,00	49	9,751	3,927	(9,144; 10,358)
3,00	49	8,5878	0,4837	(7,9803; 9,1952)
4,00	49	12,394	0,829	(11,786; 13,001)

Pooled StDev = 2,15569

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Canal	N	Mean	Grouping
4,00	49	12,394	A
1,00	49	11,853	A
2,00	49	9,751	B
3,00	49	8,5878	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Antecâmara – Teste 1

One-way ANOVA: Temperatura (°C) versus Canal

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Canal	8	6051	756,349	333,43	0,000
Error	1719	3899	2,268		
Total	1727	9950			

Means

Canal	N	Mean	StDev	95% CI
6,00	192	9,3380	1,1184	(9,1248; 9,5512)
7,00	192	13,265	1,755	(13,052; 13,478)
8,00	192	9,347	1,664	(9,134; 9,560)
9,00	192	11,7286	1,0803	(11,5155; 11,9418)

14,00	192	10,4469	1,3169	(10,2337; 10,6601)
15,00	192	13,8448	1,2895	(13,6316; 14,0580)
16,00	192	8,200	2,007	(7,987; 8,413)
17,00	192	12,9557	1,3423	(12,7425; 13,1689)
20,00	192	10,427	1,709	(10,214; 10,640)

Pooled StDev = 1,50613

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Canal	N	Mean	Grouping
15,00	192	13,8448	A
7,00	192	13,265	B
17,00	192	12,9557	B
9,00	192	11,7286	C
14,00	192	10,4469	D
20,00	192	10,427	D
8,00	192	9,347	E
6,00	192	9,3380	E
16,00	192	8,200	F

Means that do not share a letter are significantly different.

ANEXOS

Anexo I – Fotos dos equipamentos utilizados no cenário de estudo.

Anemômetro digital



Anemômetro digital



Anemômetro digital



Termohigrometro



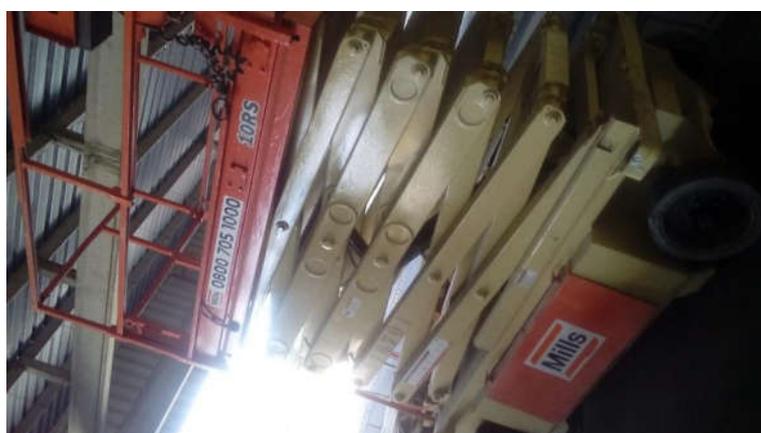
Mini sensores de temperatura



Mini sensores de temperatura



Sensor posicionado no ambiente



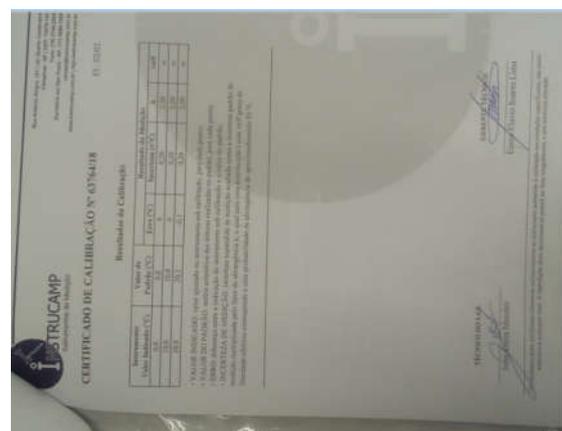
Plataforma elevatória



Escada



Certificado de calibração dos sensores



Certificado de calibração dos sensores



Software ComSoft Basic

Anexo II – Calor específico do produto (Iogurte Produto X)

Fórmulas para estimativa de calor específico de Choi e Okos (1986):

$$C_{pp} = 1,9842 + (1,4733 \times 10^{-3})T - (4,8008 \times 10^{-6})T^2$$

$$C_{pc} = 1,54884 + (1,9625 \times 10^{-3})T - (5,9399 \times 10^{-6})T^2$$

$$C_{pl} = 1,9842 + (1,4733 \times 10^{-3})T - (4,8008 \times 10^{-6})T^2$$

$$C_{pa} = 1,0926 + (1,8898 \times 10^{-3})T - (3,6817 \times 10^{-6})T^2$$

$$C_{pw} = 4,1762 - (9,0864 \times 10^{-5})T + (5,4731 \times 10^{-6})T^2$$

Onde:

C_p – calor específico;

p – proteína; c – carboidrato; l – lipídeos; a – cinzas; e w – água;

T – temperatura.

Componentes da tabela nutricional e calor específico correspondente:

Componentes Tabela nutricional (100g)	Fração mássica (mi/mp)	Calor específico calculado p/ T=35°C (Choi e Okos, 1986)
Carboidratos	0,14	1,6102 KJ/Kg°C
Proteínas	0,03	2,0489 KJ/Kg°C
Lipídeos	0,03	2,0299 KJ/Kg°C
Cinzas	0,0024	1,1542 KJ/Kg°C
Água	0,7976	4,1797 KJ/Kg°C
Produto	1	C_p = 3,6 KJ/Kg°C