

CAUÊ PASCOAL BOECHAT DE BRITO

Projeto de uma máquina de ultracongelamento de alimentos para uso doméstico

Cauê Pascoal Boechat de Brito

Projeto de uma máquina de ultracongelamento de alimentos para uso doméstico

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Eliana Vieira Canettieri

B862p Brito, Cauê Pascoal Boechat de
Projeto de uma máquina de ultracongelamento de alimentos
para uso doméstico / Cauê Pascoal Boechat de Brito –
Guaratinguetá, 2018.
48 f : il.

Bibliografia: f. 47-48

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica –
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de
Guaratinguetá, 2018.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Eliana Vieira Canettieri

1. Alimentos - Conservação. 2. Alimentos congelados.
3. Eletrodomésticos. I. Título.

CDU 664

Luciana Máximo
Bibliotecária CRB-8/3595

Cauê Pascoal Boechat de Brito

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM Engenharia Mecânica”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

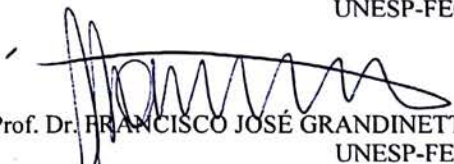
BANCA EXAMINADORA:



Prof.ª. Dr.ª. ELIANA VIEIRA CANETTIERI
Orientadora/UNESP-FEG



MSc. FELLIPE SARTORI DA SILVA
UNESP-FEG



Prof. Dr. FRANCISCO JOSÉ GRANDINETTI
UNESP-FEG

Dezembro 2018

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha família e amigos,

à minha orientadora, *Prof. Dr. Eliana Vieira Canettieri* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *André e Valéria*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimento, instala-se a dúvida.”

Goethe

RESUMO

O aumento da exigência do consumidor quanto a qualidade dos alimentos associado à manutenção de saúde, impulsionou o mercado a buscar métodos práticos de conservação de alimentos por meio de técnicas de ultracongelamento. Este método diferente do congelamento tradicional, consiste em uma queda brusca de temperatura, atingindo rapidamente a temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou menos, proporcionando a preservação da estrutura celular dos alimentos e com isso, mantendo intactas o sabor e as propriedades dos mesmos, além de conservar o alimento por mais tempo. Este trabalho visou o projeto de uma máquina de ultracongelamento compacta para uso residencial. Foram estudadas e discutidas as necessidades de projeto e as vantagens do processo de ultracongelamento para o cliente final. Também foi determinado o calor necessário para suprir o processo, foi selecionado o fluido refrigerante e os componentes mais adequados para compor o ciclo.

PALAVRAS-CHAVE: Ultracongelamento. Congelamento. Eletrodoméstico. Conservação. Alimento.

ABSTRACT

L'augmentation de l'exigence des clients par rapport à la qualité des aliments associé à la manutenção de la santé, a fait le marché chercher pour des méthodes pratiques de préservation des aliments en utilisant des techniques de surgélation. Cette méthode différent de refrigeration traditionnel cherche à diminuer vite la temperature des aliments jusqu'à des temperatures de -18 °C ou moin. Cette méthode préserve la structure cellulaire des aliments et de cette façon mantien intactes le saveur, las proprietes du aliment et matien celui-là pour plus de temps.

Cette travail a eu comme but le projet de une machine compacte de surgélation pour les particulières. A été étudié les besoins de projet et les avantages du processus de surgélation au client finale. A été déterminé aussi le besoin de chaleur pour le processus et a été selecioné le fluide frigorifique e les composants du cycle thermique.

KEYWORDS: Surgélation. Refrigeration. Conservation. Aliments. Domestique.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principal dificuldade em se alimentar corretamente, em %	13
Figura 2 – Porcentagem de pessoas que declaram de esforçar para ter uma alimentação mais saudável	14
Figura 3 – comparação entre 2010 e 2017 da porcentagem de pessoas que declaram comprar alimentos mais caros se forem saudáveis	14
Figura 4 – Ilustração da formação de cristais de acordo com a cinética de congelamento	19
Figura 5 – Esquema sobre a influência do tamanho do cristal de gelo no rompimento da célula	19
Figura 6 – Esquema máquina de ultracongelamento por criogenia.....	21
Figura 7 – Esquema máquina de ultracongelamento por contato.....	22
Figura 8 – Esquema máquina de ultracongelamento mecânico estacionário	23
Figura 9 – Esquema máquina de ultracongelamento mecânico intermitente	24
Figura 10 – Ciclo teórico de refrigeração por compressão de vapor.....	29
Figura 11 –Diagrama P x h do ciclo de refrigeração por compressão.....	29
Figura 12 – Diagrama pressão-entalpia do fluido R-410a.....	34
Figura 13– Diagrama pressão-entalpia do fluido R-404a.....	35
Figura 14 – Diagrama pressão-entalpia do fluido R-507a.....	36
Figura 15 – Diagrama pressão-entalpia do fluido R-407C.....	37
Figura 16 – Diagrama pressão-entalpia do fluido R17A.....	38
Figura 17 – Compressor Tecumseh AE4430Y-FZ1A.....	40
Figura 18 – Condensador LU-VE GROUP FCE NCE 7.2.210.....	40
Figura 19 – Válvula de expansão termostática Castel EL-TS2 R404A e R507	41
Figura 20 – Catálogo evaporadores	42
Figura 21 – Dimensões evaporadores.....	43
Figura 22 – Componentes do ciclo térmico (estrutura, câmara fria, compressor e evaporador)	44
Figura 23 – Máquina de ultracongelamento. Dimensão 550 x 320 x 230 mm.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Influência da temperatura na porcentagem de água na carne	18
Tabela 2 – Resumo das pré-definições do projeto.....	26
Tabela 3 – Valores calculados de COP e cilindrada para diferentes fluidos frigoríficos.....	39
Tabela 4 – Custo da compra unitária de cada componente	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ONU	Organização das Nações Unidas
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
HFC	Hidrofluorcarbonetos
HCFC	Hidroclorofluorcarbonetos

LISTA DE SÍMBOLOS

m	massa do alimento
\dot{m}	vazão mássica de fluido refrigerante
Q	calor
\dot{Q}	taxa de calor
\dot{W}	Potência
c_p	calor específico, J/kg.K
ΔT_1	diferença de temperatura entre o ambiente e a temperatura de congelamento
ΔT_2	diferença de temperatura entre a temperatura de congelamento e a temperatura final a ser obtida
$L_{\text{fusão}}$	calor latente de fusão
KR	coeficiente de enchimento
τ	taxa de compressão
COP	Coeficiente de performance
h	Entalpia
cyl	Cilindrada do compressor
N	Frequência da rede elétrica
ρ_{asp}	Densidade do fluido refrigerante no condição de entrada do compressor
P	Pressão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	ULTRACONGELAMENTO	17
2.2	CONGELAMENTO	17
2.3	VANTAGENS DO ULTRACONGELAMENTO	17
2.4	MÉTODOS DE ULTRACONGELAMENTO	19
2.4.1	Ultracongelamento por criogenia	19
2.4.2	Ultracongelamento por contato	21
2.4.3	Ultracongelamento mecânico	22
2.4.1.1	Estacionário	22
2.4.1.2	Intermitente	23
3	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	25
3.1	ESCOLHA DO MÉTODO DE ULTRACONGELAMENTO	25
3.2	PRÉ-DEFINIÇÕES – VISÃO DE PRODUTO	25
3.3	DIMENSIONAMENTO TÉRMICO	27
3.4	ESCOLHA DO FLUIDO REFRIGERANTE	27
3.4.1	Equacionamento teórico	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	Escolha do fluido refrigerante	33
4.1.1	Fluido R-410a	33
4.1.2	Fluido R-404a	34
4.1.3	Fluido R-507	35
4.1.4	Fluido R-407C	36
4.1.5	Fluido R17A	37
4.2	ESCOLHA DOS COMPONENTES DO CICLO TÉRMICO	39
4.2.1	Compressor	39
4.2.2	Condensador	40
4.2.3	Válvula de expansão	40
4.2.4	Evaporador	41
4.3	MODELAGEM 3D	44
4.4	ANÁLISE DE CUSTOS	45
5	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

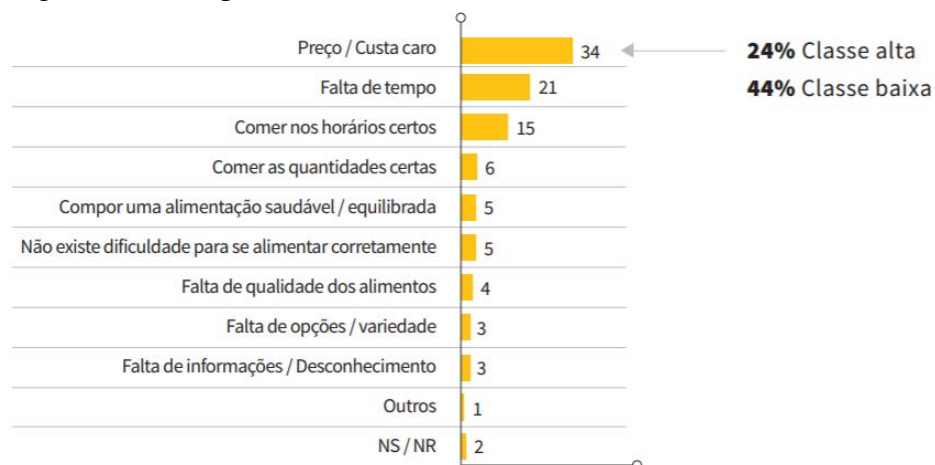
A busca por uma alimentação mais saudável e segura vem crescendo e tornou-se um mercado muito interessante a nível nacional e internacional.

Segundo o jornal Estadão (2017), o mercado de alimentação voltada à saúde cresceu 98% no Brasil entre 2009 e 2014. Esta mesma notícia, afirma que em 2015 este setor movimentou mais de 27 bilhões de dólares mundialmente, e que previa-se um crescimento de 20% para os anos seguintes. Além disso, a notícia, baseando-se no relatório *The Top 10 Consumer Trends for 2017* (As Top 10 Tendências dos Consumidores para 2017), analisa os dados sobre as tendências dos consumidores:

“83% dos entrevistados estão dispostos a gastar mais para obter um alimento saudável; 79% substituem produtos da alimentação convencional por opções mais saudáveis; 28% acham importante consumir alimentos com alto teor nutricional; 22% optam por compras alimentos naturais sem conservantes; 44% dão preferência a produtos sem corantes artificiais; 42% optam por itens sem sabores artificiais (ESTADÃO, 2017)”

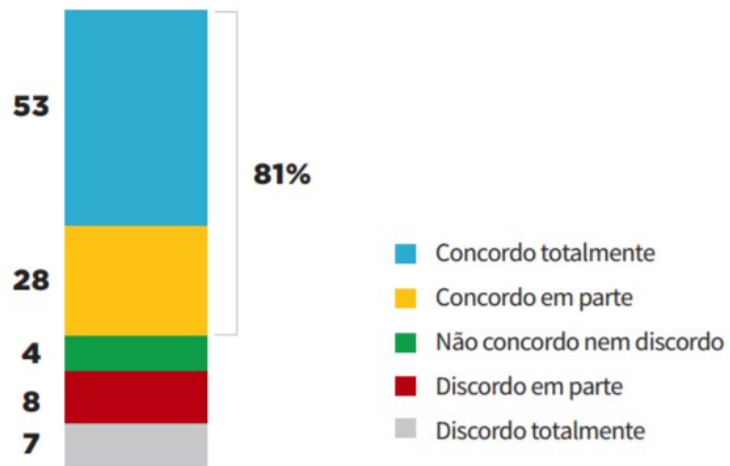
Segundo a FIESP(2017), para os brasileiros, as duas maiores dificuldades em se alimentar de maneira mais saudável são os preços mais elevados destes produtos e a falta de tempo (Figura 1). Também consta nesta pesquisa que 81% dos brasileiros declaram esforçar-se para ter uma alimentação mais saudável (Figura 2) e que 71% das pessoas afirmaram comprar alimentos mais caros se forem saudáveis (Figura 3).

Figura 1 - Principal dificuldade em se alimentar corretamente, em %



Fonte: FIESP (2017).

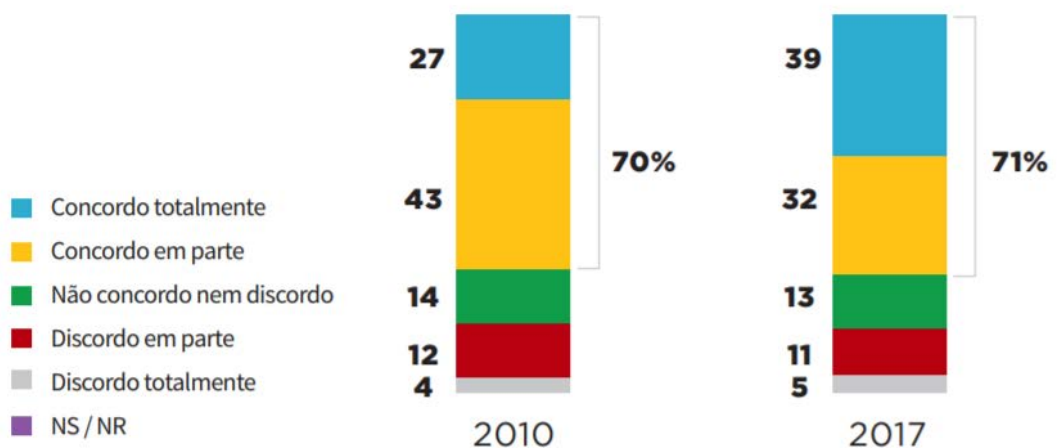
Figura 2 - Porcentagem de pessoas que declaram se esforçar para ter uma alimentação mais saudável



Fonte: FIESP (2017).

Na Figura 3 é apresentada uma comparação entre os anos de 2010 e 2017 da porcentagem de pessoas que declaram comprar alimentos mais caros se forem saudáveis, evidenciando que, em 2017, 71% concordam totalmente ou em parte com esta afirmação.

Figura 3 - comparação entre 2010 e 2017 da porcentagem de pessoas que declaram comprar alimentos mais caros se forem saudáveis



Bases: 1.512 | 3.000 casos

Fonte: FIESP (2017).

Segundo Agoulon (2010), o ultracongelamento possui diversas vantagens em relação ao processo de congelamento tradicional, tais como: maior conservação do sabor, da textura e dos nutrientes do alimento, além de aumentar sua durabilidade. Desta forma, dentro deste

cenário de alimentação voltada à saúde, um mercado bilionário, que está em crescimento e que possui forte apelo dos consumidores em busca de alimentar-se melhor, o ultracongelamento surge como uma oportunidade de ter à disposição de forma rápida e prática um alimento mais natural e saudável.

Hoje em dia este processo é amplamente utilizado pela indústria alimentícia para a conservação de todo tipo de alimento, desde frutas, legumes e carnes até pratos e sobremesas prontas.

Outro ponto de interesse é o desperdício de alimentos. A ONU definiu em 2015 uma agenda formada por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), ou seja, 17 tópicos com diversas ações à serem cumpridas por todos os países até 2030 (ONU, 2015a). O objetivo 12 refere-se ao Consumo e Produção Responsáveis, ou seja, assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis. O tópico 12.3 determina a redução pela metade do desperdício percapita mundial de alimentos até 2030 (ONU, 2015b). Segundo a FAO (2017), 1,3 bilhão de toneladas de comida é desperdiçada ou se perde ao longo das cadeias produtivas de alimentos. Este volume representa 30% de toda a comida produzida por ano no planeta. Além disso 54% destas perdas ocorrem nas fases de produção, armazenamento e transporte.

Dentro deste cenário, a máquina de ultracongelamento residencial diminuiria drasticamente as perdas de armazenamento e principalmente transporte de produtos refrigerados. O ultracongelamento conserva o alimento por mais tempo (AGOULON, 2010), resultando em maior tempo para o seu consumo, diminuindo deste modo as perdas devido ao armazenamento de produtos refrigerados. Por ser uma máquina a ser utilizada em casa, não haveria transporte do alimento refrigerado, não havendo assim perdas relacionadas a este processo.

Portanto, estas pesquisas afirmam categoricamente que:

1. O mercado de alimentação voltado à saúde movimenta bilhões de dólares ao ano;
2. Nacionalmente e internacionalmente as pessoas estão buscando cada vez mais alimentar-se de maneira mais saudável;
3. Um dos maiores empecilhos para as pessoas se alimentarem melhor é a falta de tempo;
4. Há um grande desperdício de alimentos, desde a fase de produção e transporte até o produto chegar à casa do consumidor.

Diante deste cenário, a existência da máquina de ultracongelamento residencial se torna interessante por estar inserida em um mercado altamente aquecido, por existir um grande número de consumidores em potencial, por resolver alguns dos principais empecilhos hoje relatados pelas pessoas que buscam uma alimentação mais saudável e por possuir um interessante apelo ambiental.

O presente trabalho visa o dimensionamento térmico teórico e a escolha da tecnologia dos componentes do ciclo térmico de uma máquina de ultracongelamento para uso residencial.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ULTRACONGELAMENTO

O ultracongelamento, ou congelamento rápido, é um processo físico muito utilizado pela indústria para a conservação de alimentos hoje em dia. Este consiste basicamente na redução à temperaturas de -18 °C a -46 °C no centro do alimento, a depender da tecnologia de ultracongelamento empregada, em um período de aproximadamente 30 minutos (MARTINS, 2013 e FREITAS; FIGUEIREDO, 2000, p.133). Várias vantagens decorrem dessa diminuição brusca da temperatura, tais como: maior conservação do sabor, da textura e dos nutrientes do alimento, maior segurança alimentar, além da durabilidade do alimento por mais tempo (AGOULON, 2010 e REMY, 1986).

2.2 CONGELAMENTO

O congelamento é um processo físico muito utilizado em âmbito residencial e industrial, amplamente empregado para a conservação de alimentos. Este método consiste na solidificação de grande porcentagem da água contida nos alimentos. Este processo possui temperaturas que podem variar entre -5 °C e -29 °C podendo durar de 3 a 72 horas (RAHMAN, 1986).

2.3 VANTAGENS DO ULTRACONGELAMENTO

Diferentemente do que comumente se acredita os alimentos congelados não são inteiramente estáveis. Segundo o estudo de Agoulon (2010) e Lebail et al. (2007), alimentos congelados ainda possuem uma porcentagem de água em forma líquida (Tabela 1). Ao analisar-se a temperatura média de funcionamento de congeladores domésticos, aproximadamente -5 °C , foi verificado a existência de aproximadamente 20% de água não congelada no interior dos alimentos analisados. Para a temperatura média dos freezers, -20 °C , aproximadamente 10% de água não se solidifica. A existência desta fração não solidificada proporciona a susceptibilidade a reações físicas e bioquímicas nas células, proporcionando uma diminuição da durabilidade do alimento próprio ao consumo.

A Tabela 1 contém a porcentagem de água em forma líquida para diferentes temperaturas para três carnes distintas, carne de ave, boi e peixe.

Tabela 1– Influência da temperatura na porcentagem de água na carne

Água congelada (%)			
Temperatura (°C)	Ave (músculo)	Bife magro	Peixe (bacalhau)
-5	74	74	77
-10	83	82	84
-15		85	87
-20	88	87	89
-25			
-30	89	88	91

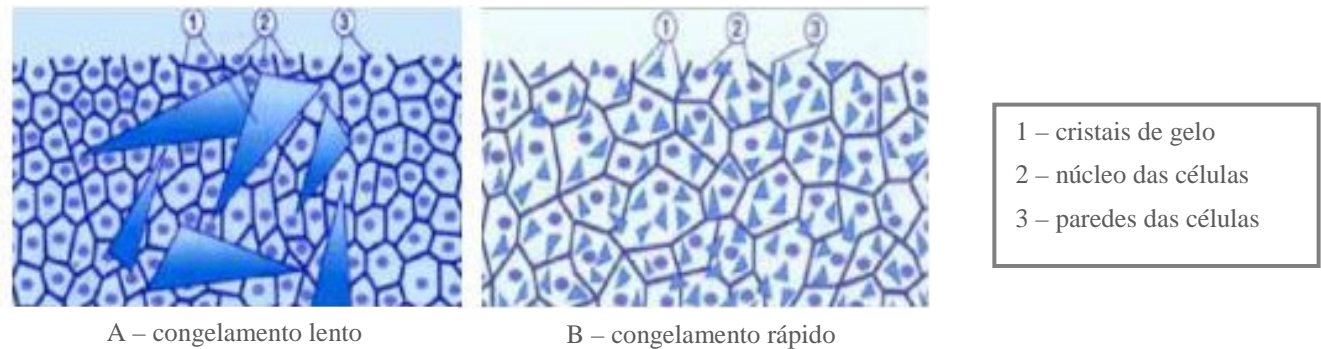
Fonte: Adaptado de Agoulon (2010).

A maior conservação de nutrientes, sabor, textura e aparência do alimento ao realizar-se o processo de ultracongelamento em relação ao congelamento tradicional se deve principalmente ao tamanho e quantidade de cristais de gelo formados no alimento. Esses fatores dependem da cinética da diminuição de temperatura, que por sua vez está diretamente relacionado à técnica utilizada (AGOULON, 2010). Adrien (2010) afirma que a taxa de nucleação de cristais de gelo (número de núcleos de cristais de gelo por unidade de tempo) aumenta com maiores taxas de resfriamento, sendo que a cada grau de acréscimo no subresfriamento a taxa de nucleação é multiplicada por 10.

A Figura 4 ilustra a quantidade e tamanho de cristais de gelo formados por cada processo. Pode-se notar que, para o congelamento tradicional, os cristais de gelo possuem dimensões maiores que as células, de 100 a 300 μm , causando assim seu rompimento, diferentemente do processo de ultracongelamento, que possui cristais de gelo menores que a célula, aproximadamente 1 a 2 μm (RAHMAN, 2007, p.637), mantendo assim a estrutura da célula intacta. Este rompimento proporciona a perda dos fluidos intracelulares e da estrutura física da célula (Figura 5). A perda dos fluidos intracelulares propicia a diminuição nutritiva e de sabor do alimento. Ao descongelar, a perda da estrutura física faz com que a textura e aparência do alimento sejam danificadas (AGOULON, 2010).

Na Figura 4 são apresentadas duas representações do tamanho dos cristais de gelo no processo de congelamento lento e no processo de congelamento rápido (ultracongelamento).

Figura 4 - Ilustração da formação de cristais de acordo com a cinética de congelamento



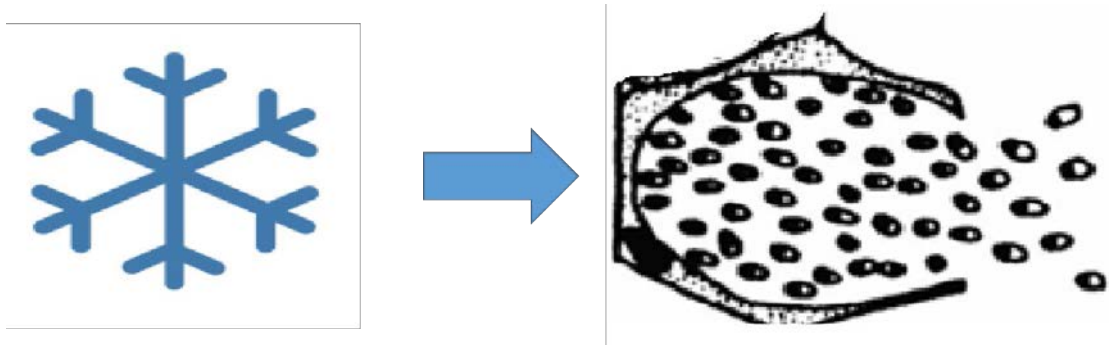
A - congelamento lento

B - congelamento rápido

Fonte: Adaptado de Agoulon (2010).

A Figura 5 esquematiza a influência de tamanho do cristal de gelo formado sobre o rompimento de uma célula ocasionando a perda de seu material intracelular.

Figura 5 - Esquema sobre influência do tamanho do cristal de gelo no rompimento da célula



Fonte: Autoria própria

2.4 MÉTODOS DE ULTRACONGELAMENTO

Existem basicamente três métodos de ultracongelamentos utilizados pela indústria, que são: ultracongelamento por contato, criogênico e o mecânico. Abaixo serão abordados cada um e ao fim será detalhada a escolha do método a ser utilizado no projeto da máquina.

2.4.1 Ultracongelamento por criogenia

Este método utiliza fluidos à temperaturas muito baixas, azoto líquido (N_2) ou dióxido de carbono (CO_2). O CO_2 líquido é estocado a pressões abaixo de 2MPa, a temperatura de $-20^\circ C$, sendo esta mantida por uma pequena unidade auxiliar de refrigeração. O N_2 líquido é armazenado em vasos com isolantes térmicos à pressões de 0,15 a 0,20 MPa sendo a

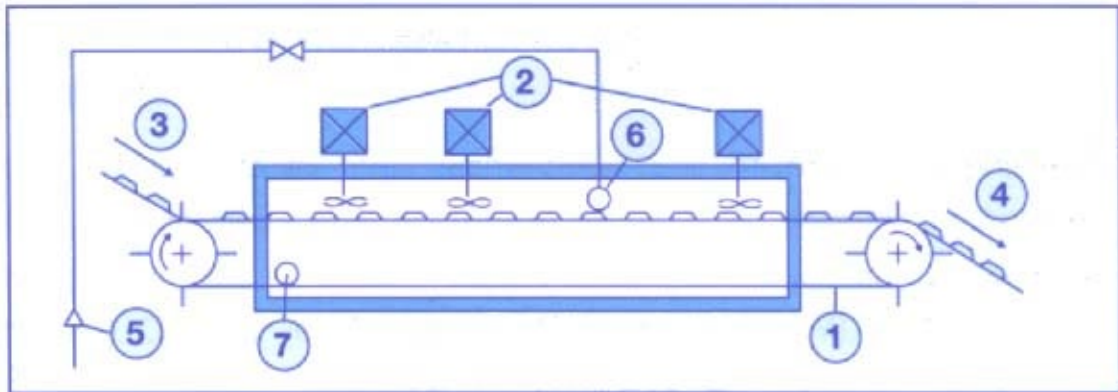
temperatura mantida através de um dispositivo de alívio automático (*automactic bleed-off device*) (REMY, 1986, p.172).

Segundo Remy (1986, p.172), há basicamente três métodos de ultracongelamento por criogenia, sendo que em todos eles utiliza-se o N₂ ou CO₂, gerando assim um custo a mais por quilograma de alimento resfriado. Além da necessidade da compra, a estocagem e armazenamento destes fluidos requerem um cuidado maior, por ser necessário mantê-los a pressões e temperaturas específicas. Dois destes processos trabalham em regime estacionário e um em regime intermitente, sendo eles:

1. Câmara-fria: o fluido criogênico é transportado até uma câmara fria onde estão contidos os alimentos à serem resfriados. Este fluido expande-se até a pressão atmosférica causando assim uma diminuição de temperatura. O coeficiente de convecção pode variar de 80 à 500 W.m⁻².K⁻¹ à depender das configurações da máquina.
2. Submersão: processo mais utilizado para produtos delicados. Consiste basicamente em submergir os alimentos no N₂ líquido. Este método requer um controle cuidadoso do tempo do banho de N₂. Este banho pode ser juntamente realizado com uma mistura de CO₂ sólido, empregando deste modo uma transferência de calor por contato.
3. Spray: Este é o único sistema intermitente, e consiste basicamente na injeção do spray de N₂ ou CO₂ diretamente sobre o alimento enquanto este é transportado por uma esteira transportadora (Figura 6). Pode conter um ou mais compartimentos. Este método limita as dimensões dos alimentos que podem ser resfriados devido a movimentação do alimento sobre a esteira, implicando na necessidade de diminuir a temperatura ainda mais rapidamente. Menores espessuras do alimento implicam em uma maior transferência de calor.

A Figura 6 é a representação de uma máquina de ultracongelamento por criogenia utilizando o método por spray.

Figura 6 - Máquina de ultracongelamento por criogenia



1 – Fita transportadora • 2 – Ventiladores • 3 – Entrada do produto • 4 – Saída do produto • 5 – Tubulação azoto líquido • 6 - Pulverização de azoto líquido 7 - Evacuação de azoto gasoso

Fonte: Adaptado de Joho (2018a)

O ultracongelamento por criogenia possui maior taxa de resfriamento do alimento em comparação com o ultracongelamento por contato e mecânico (KENNEDY, 2002), porém necessita a compra, armazenagem e estoque correto no líquido criogênico.

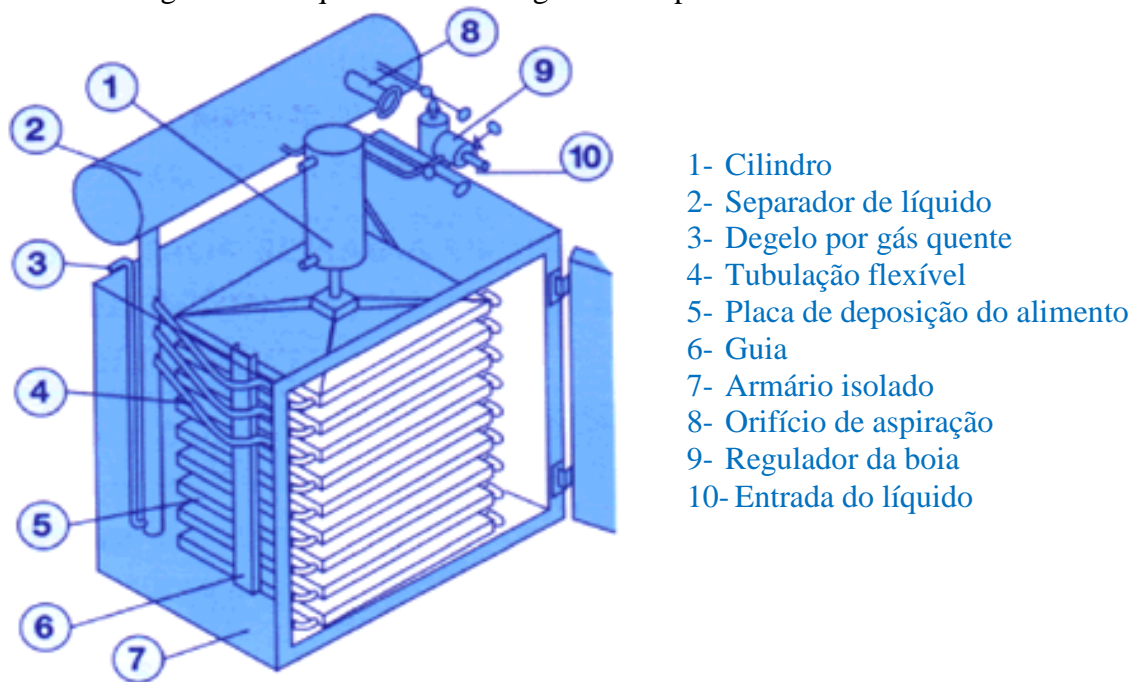
2.4.2 Ultracongelamento por contato

Segundo Remy (1986), este é um processo desenvolvido nos anos 60 que consiste basicamente em placas, normalmente metálicas, refrigeradas por um fluido refrigerante contido em um ciclo de compressão. Como os alimentos estão diretamente em contato com as placas, estes devem possuir formas geométricas que favoreçam este contato, ocasionando a diminuição de um meio intermediário (ar) à ser resfriado, promovendo assim altos valores de coeficientes de troca de calor. Além disso há uma limitação referente a espessura do alimento, que não deve ser superior a 20 mm.

Este processo possui menor taxa de resfriamento que o método por criogenia, porém maior taxa em comparação ao ultracongelamento mecânico.

A Figura 7 é a representação de uma máquina de ultracongelamento por contato.

Figura 7 - Máquina de ultracongelamento por contato



Fonte: Adaptado de Joho (2018a).

2.4.3 Ultracongelamento mecânico

2.4.3.1 Estacionário

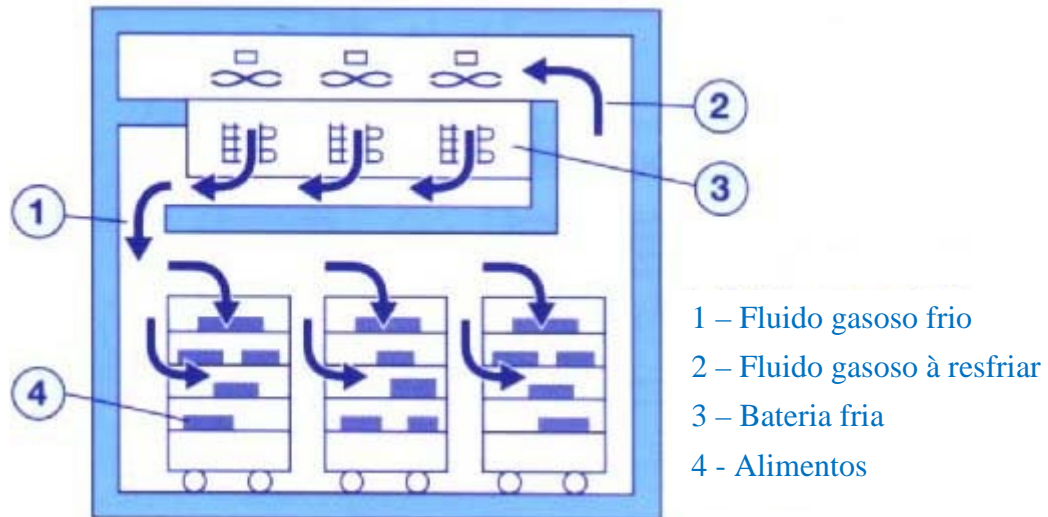
Este é o método mais antigo e adaptável em comparação com os outros dois métodos (KENNEDY, 2002). Neste utiliza-se um fluido refrigerante que circula em um sistema fechado composto basicamente por um condensador, um compressor, um evaporador e uma válvula de expansão, a fim de extrair por convecção calor do interior da uma câmara onde se encontra o alimento (KENNEDY, 2002). Trabalha-se na indústria normalmente com temperaturas de -30 a -40 °C no interior da câmara fria (REMY, 1986).

O compressor fornece um aumento de pressão ao fluido refrigerante. Este, ao passar pelo condensador, é condensado, cedendo calor ao exterior. O fluido segue para a válvula de expansão, que reduz a pressão de modo a diminuir a temperatura de ebulição do fluido refrigerante. E por fim, no evaporador, o fluido é evaporado retirando a energia do ambiente a ser resfriado. O fluido retorna ao compressor, recomeçando o processo.

No mercado esta é a tecnologia que proporciona uma diminuição da temperatura do alimento em maior tempo, ou seja, que possui menor taxa de refrigeração (KENNEDY, 2002).

A Figura 8 representa uma máquina de ultracongelamento mecânico estacionário industrial.

Figura 8 - Máquina de ultracongelamento mecânico estacionário



Fonte: Adaptado de Joho (2018a).

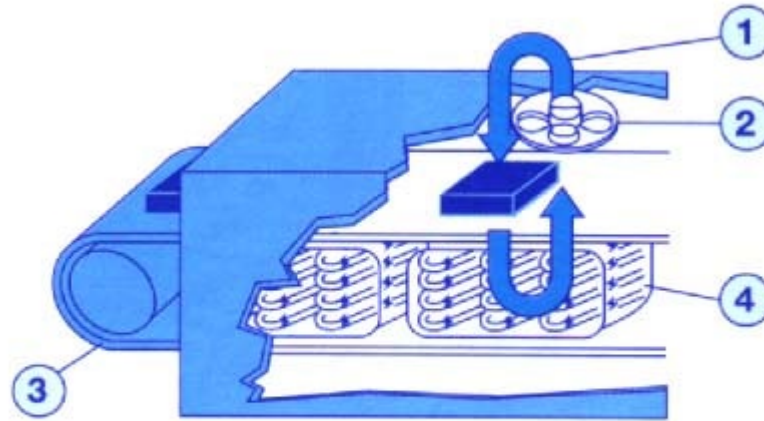
2.4.3.2 Intermitente

Processo muito parecido com ultracongelamento por criogenia por spray, porém não utiliza nenhum fluido criogênico, apenas ar refrigerado. O produto é normalmente posto sobre uma esteira transportadora, sobre o qual jatos de ar a alta velocidade são dirigidos diretamente sobre o alimento (Figura 9). Este ar é direcionado através de fendas, buracos ou pequenos tubos sobre o alimento. Este processo é utilizado para alimentos homogêneos, conformados ou subdivididos em pedaços menores. Limita-se a alimentos de dimensões de 20 a 25 mm (REMY, 1986).

Esta técnica confere um ultracongelamento mais lento que o processo de criogenia e por contato, porém mais rápido que pelo método mecânico estacionário pois ele rompe a camada limite na superfície e favorece a transferência térmica (REMY, 1986).

A Figura 9 representa uma máquina de ultracongelamento mecânico intermitente.

Figura 9 - Máquina de ultracongelamento mecânico intermitente



1 – Ar frio • 2 – Ventilador • 3 – Esteira • 4 – Baterias frias

Fonte: Adaptado de Joho (2018a).

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

3.1 ESCOLHA DO MÉTODO DE ULTRACONGELAMENTO

Comparando-se os métodos e tecnologias existentes no mercado, o método de ultracongelamento por criogenia é o que possui maior taxa de refrigeração, seguido pelo método por contato e por fim o mecânico.

A utilização do método por criogenia implicaria na necessidade do uso de N₂ líquido ou CO₂ (líquido ou sólido). A utilização destes fluidos geram maiores custos de produção, devido a necessidade da compra periódica para sua reposição. Além disso, estes fluidos requerem um armazenamento a pressões e temperaturas específicas. Talvez a criação de uma espécie de cápsula de N₂ ou CO₂ fosse uma solução interessante, porém a necessidade de compra destas cápsulas tornaria o produto final menos atrativo ao consumidor, além de gerar um maior impacto ambiental por produzir resíduos.

O segundo método com maior taxa de refrigeração, o método por contato, impõe limitações referente a forma e espessura dos alimentos. Como o presente projeto visa uma máquina para uso residencial, entende-se ser necessário ao consumidor final a possibilidade de utilizá-la para os mais diversos alimentos consumidos em seu dia-a-dia, alimentos de variadas formas e espessuras. Além disso, o uso desta tecnologia implicaria na necessidade da limpeza das placas a cada utilização. Para o manuseio destas placas, seria necessário aguardar certo tempo para que as placas retornassem a temperatura ambiente. O manuseio a temperaturas muito baixas poderiam gerar riscos de acidentes dos consumidores.

O método de ultracongelamento mecânico é o que possui menor taxa de refrigeração. O método intermitente possui limitações de forma e espessura, restringindo assim os alimentos que podem ser ultracongelados por este método. O método estacionário pode ultracongelar alimentos das mais variadas formas e dimensões, necessita apenas de energia elétrica para seu funcionamento, além de ser uma tecnologia similar à empregada por geladeiras e freezers, já conhecida e amplamente difundida entre os consumidores, sendo assim mais aceito comercialmente. Deste modo escolhemos o método de ultracongelamento mecânico estacionário como a tecnologia a ser utilizada no presente projeto.

3.2 PRÉ-DEFINIÇÕES – VISÃO DE PRODUTO

O presente trabalho visa o projeto de uma máquina de ultracongelamento para uso residencial. Foram pesquisados os produtos existentes no mercado, sendo que a menor máquina encontrada possui dimensão de 810 x 1060 x 720 mm (ECO, 2018) e resfria até 10kg de alimento. Estas máquinas de pequeno porte são utilizadas principalmente para panificadoras, docerias e restaurantes de pequeno porte. Diante deste cenário, torna-se interessante o projeto de uma máquina mais compacta, visando assim atingir um setor de mercado ainda em desenvolvimento. Deste modo, foi definido que o produto final possuiria a dimensões aproximadas de um micro-ondas (300 x 400 x 500mm).

Segundo Martins (2013), o alimento após ser ultracongelado, precisa ser mantido à temperaturas inferiores a de congelamento. Devido ao porte da máquina, faz-se necessário o armazenamento do alimento, após ser ultracongelado, em um freezer ou congelador residencial. Os passos para a utilização da máquina de ultracongelamento residencial serão:

1. Inserir o alimento à ser ultracongelado na máquina;
2. Ligar a máquina de modo a ultracongelar o alimento;
3. Retirar o alimento ultracongelado e armazená-lo no freezer ou congelador residencial.

Para o dimensionamento térmico da máquina é necessário definir a capacidade, ou seja, a maior massa de alimento a ser ultracongelada. Foi definido então uma massa de 2kg de alimento, visto as dimensões da máquina e uma base de comparação com a quantidade de alimento utilizado em um micro-ondas.

Segundo Remy (1986), as máquina industriais de ultracongelamento mecânico trabalham em média a temperaturas de -35 a -40 °C. Deste modo, foi definido a temperatura de -35°C como sendo a temperatura interna da câmara fria, garantindo assim o ultracongelamento do alimento.

A Tabela 2 resume as pré-definições de projeto.

Tabela 2 – Resumo das pré-definições do projeto

Máquina de ultracongelamento residencial		
Dimensão	300 x 400 x 500	mm
Capacidade	2	kg
Temperatura da câmara fria	-35	°C
Armazenamento	congelador residencial comum	-

Fonte: Autoria própria

3.3 DIMENSIONAMENTO TÉRMICO

Como o equipamento será utilizado para uma ampla gama de alimentos, torna-se difícil a caracterização exata de um “alimento padrão” para considerar nos cálculos. A densidade da carne de frango em natura, por exemplo, que é constituído por 74,8% de água, é de 1,075 kg/L (PEREIRA, 2013). Frutas e vegetais são compostos, em média, por aproximadamente 90% de água, enquanto as carnes possuem aproximadamente 70% (MUNDOEDUCAÇÃO, 2018). Como a alimentação das pessoas é constituída basicamente por estes três grupos de alimentos, foi considerado a densidade do alimento como sendo igual ao da água, ou seja, 1 kg/L.

Considerando-se o ultracongelamento de 2kg de alimento com densidade de 1 kg/L, obtém-se o volume de câmara fria de no mínimo 2 litros.

A Equação 1 determina a quantidade de calor necessário a ser retirado para resfriar o alimento de uma temperatura ambiente de 30 °C a -35°C.

$$Q = m \cdot c_p \text{ água} \cdot \Delta T_1 + m \cdot L_{\text{ fusão}} + m \cdot c_p \text{ gelo} \cdot \Delta T_2 \quad (1)$$

Onde:

$$m = 2 \text{ kg}$$

$$c_p \text{ água} = 4178 \text{ J/kg.K (INCROPERA ,2007)}$$

$$\Delta T_1 = (30 - 0) = 30\text{K}$$

$$L_{\text{ fusão}} = 333000\text{J/kg (INCROPERA ,2007)}$$

$$c_p \text{ gelo} = 2040 \text{ J/kg.K (INCROPERA ,2007)}$$

$$\Delta T_2 = [0 - (-35)] = 35\text{K}$$

Substituindo os valores acima na Equação 1, obtém-se $Q = 10,59 \cdot 10^5 \text{J}$.

Como o tempo de ultracongelamento do alimento deve ser no máximo de 30 min (MARTINS, 2013 e FREITAS; FIGUEIREDO, 2000, p.133), ou seja 1800 s, obtém-se:

$$\dot{Q} = Q/\Delta t \quad (2)$$

$$\dot{Q} = 588,6 \text{ W}$$

3.4 ESCOLHA DO FLUIDO REFRIGERANTE

A escolha do fluido refrigerante baseou-se nos seguintes critérios:

1. A temperatura de congelamento do fluido deve ser inferior a -35°C de modo a não congelar no interior dos tubos;
2. Seja um fluido não poluente. O protocolo de Montreal (1989) determinou a restrição do uso de HCFCs devido ao seu impacto na destruição da camada de ozônio.
3. Não ser tóxico, inflamável, corrosivo e ser quimicamente estável.

Neste estudo foram avaliados portanto os refrigerantes, HFCs, R-410A, R-404A, R-507 A, R-407 A e R-17 A. Todos esses refrigerantes sintéticos foram desenvolvidos para a substituição do R-22 (HCFC-22 ou Monoclorodifluorometano) por apresentarem características de não degradação da camada de ozônio, são amplamente utilizados na indústria e possuem temperatura de congelamento inferior a -35°C .

3.4.1 Equacionamento teórico

Análise de volumes de controle em regime permanente (Moran et al, 2013):

Para um volume de controle em regime permanente, as propriedades do fluido não se alteram com o tempo. Como não há acúmulo de massa no volume de controle, $\frac{dm_{vc}}{dt} = 0$, o balanço de massa torna-se:

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad (3)$$

Sendo o subscrito “e” referente à uma propriedade que “entra” no volume de controle, e “s” uma propriedade que sai.

O balanço de energia é igual a:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_s \dot{m}_s h_s \quad (4)$$

No regime permanente $\frac{dE_{vc}}{dt} = 0$ e a equação acima pode ser escrita como:

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_s \dot{m}_s h_s \quad (5)$$

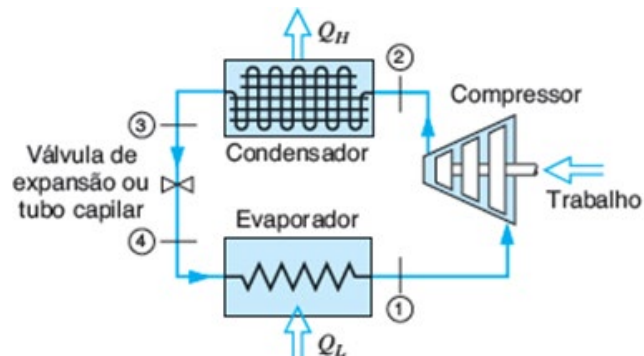
Ou também na forma de:

Taxa de entrada de energia = Taxa de saída de energia

$$\dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e h_e = \dot{W}_{vc} + \sum_s \dot{m}_s h_s \quad (6)$$

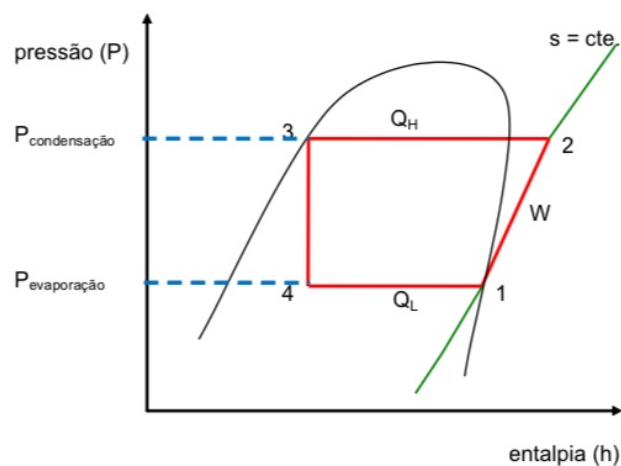
Os sistemas de refrigeração por compressão de vapor são os sistemas mais utilizados atualmente nos equipamentos frigoríficos, tais como, geladeiras e ar condicionados. A Figura 10 ilustra os componentes existentes no ciclo de compressão (compressor, condensador, evaporador e válvula de expansão). A Figura 11 relaciona os pontos numerados da Figura 10 em um diagrama pressão *versus* entalpia (P x h).

Figura 10 – Ciclo teórico de refrigeração por compressão de vapor.



Fonte: Moran et al. (2018).

Figura 11 – Diagrama P x h do ciclo de refrigeração por compressão



Fonte: adaptado de Wikiwand (2018).

Analisando-se os sistemas de refrigeração por compressão de vapor (Figura 10 e 11), considerando-os em regime permanente e desprezando as variações de energia cinética e potencial em todos os componentes, pode-se afirmar que:

Processo 4-1: No evaporador, a transferência de calor do espaço refrigerado resulta na evaporação do refrigerante. Para um volume de controle que engloba o lado do refrigerante, os balanços de massa e de energia simplificam-se para fornecer a taxa de transferência de calor por unidade de massa do refrigerante em escoamento dada pela Equação 7.

$$\frac{\dot{Q}_{entra}}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \quad (7)$$

em que: \dot{m} representa a vazão mássica do refrigerante; \dot{Q}_{entra} representa a taxa de calor transferido, conhecida como capacidade frigorífica.

Processo 1-2: Compressão isentrópica. No compressor, o refrigerante é comprimido até pressão do condensador. O balanço de massa e energia para um volume de controle que englobe o compressor fornecem:

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \quad (8)$$

em que: $\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}}$ = trabalho específico.

Processo 2-3: No condensador, o refrigerante se condensa à pressão constante e ocorre uma transferência de calor do refrigerante para a vizinhança, que está mais fria, à medida que este escoar a pressão constante ao longo do condensador. O refrigerante sai como líquido saturado no estado 3. Para um volume de controle que engloba o condensador, o calor específico do condensador é dada pela Equação 9.

$$\frac{\dot{Q}_{sai}}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \quad (9)$$

Processo 3-4: Na válvula de expansão, o refrigerante se expande até a pressão do evaporador. Como não há variação de calor, potência e vazão no volume de controle, através da primeira lei da termodinâmica (equação 6), temos que:

$$h_4 = h_3 \quad (10)$$

A pressão do refrigerante diminui na expansão adiabática irreversível, e há um aumento correspondente na entropia específica. O refrigerante sai da válvula de expansão no estado 4 como uma mistura de duas fases líquido-vapor.

O coeficiente de performance, COP, ou coeficiente de desempenho do sistema de refrigeração, β , é um parâmetro importante na análise de um sistema de refrigeração. Já é conhecido que o COP do ciclo real é sempre menor que o do ciclo teórico, nas mesmas condições de operação. A partir do ciclo teórico, pode-se verificar que parâmetros influenciam no desempenho do sistema. No sistema de compressão de vapor, o fornecimento de potência líquida é igual à potência do compressor, já que a válvula de expansão não admite entrada ou saída de potência (Moran et al. 2018). Desse modo, o COP ou β pode ser definido pela Equação 11.

$$COP \text{ ou } \beta = \frac{\dot{Q}_{entra}/\dot{m}}{\dot{W}_c/\dot{m}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (11)$$

Para ciclo teórico, o COP é função somente das propriedades do refrigerante (Equação 11), conseqüentemente, depende das temperaturas de condensação (processo 2-3) e vaporização (processo 4-1).

O coeficiente de enchimento representa a diferença entre a vazão mássica real e teórica, sendo calculado pelas equações 12 e 13.

$$KR = 1 - 0,05\tau \quad (12)$$

$$KR = \frac{\dot{m}}{cyl.N.\rho_{asp}} \quad (13)$$

Igualando as duas equações obtém-se o equacionamento para o cálculo da cilindrada (Equação 14).

$$cyl = \frac{\dot{m}}{(1 - 0,05\tau) \cdot N \cdot \rho_{asp}} \quad (14)$$

A cilindrada representa o volume deslocado por cada pistão de uma máquina de deslocamento positivo, no caso do presente projeto, o compressor alternativo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESCOLHA DO FLUIDO REFRIGERANTE ADEQUADO - DIAGRAMAS DE PRESSÃO VERSUS ENTALPIA

Para o cálculo do COP e da cilindrada foi utilizado o diagrama P x h de cada fluido refrigerante para obtenção dos valores de entalpia, densidade e pressão máxima e mínima do ciclo. Conforme as determinações teóricas de cada etapa do processo descritas na seção 3.4.1, foram traçados os processos no diagrama, sendo assim:

O processo 2-3 (Figura 11) ocorre a temperatura ambiente. A pressão permanece constante ao longo do condensador. O refrigerante sai como líquido saturado no estado 3.

O processo 3-4 (Figura 11) que ocorre na válvula de expansão é isoentalpica (Equação 10), com queda de pressão, atingindo assim a pressão de trabalho do evaporador (estado 4).

O processo 4-1 (Figura 11) é a evaporação do fluido. Este processo ocorre à temperatura de -35°C , à pressão constante. O refrigerante sai como vapor saturado no estado 1.

O processo 1-2 (Figura 11) compreende a compressão isentrópica do fluido pelo compressor. O vapor saturado é comprimido retornando à condição inicial do fluido (estado 2).

A partir dos valores de entalpia, pressão e densidade do fluido aspirado pelo compressor (estado 1) obtidos pelo diagrama, calculou-se o COP teórico a partir da Equação 11 e a vazão mássica do fluido refrigerante através da Equação 7 para cada fluido refrigerante.

Sendo a taxa de compressão τ , definida como:

$$\tau = P_{\text{máx}}/P_{\text{mín}} \quad (15)$$

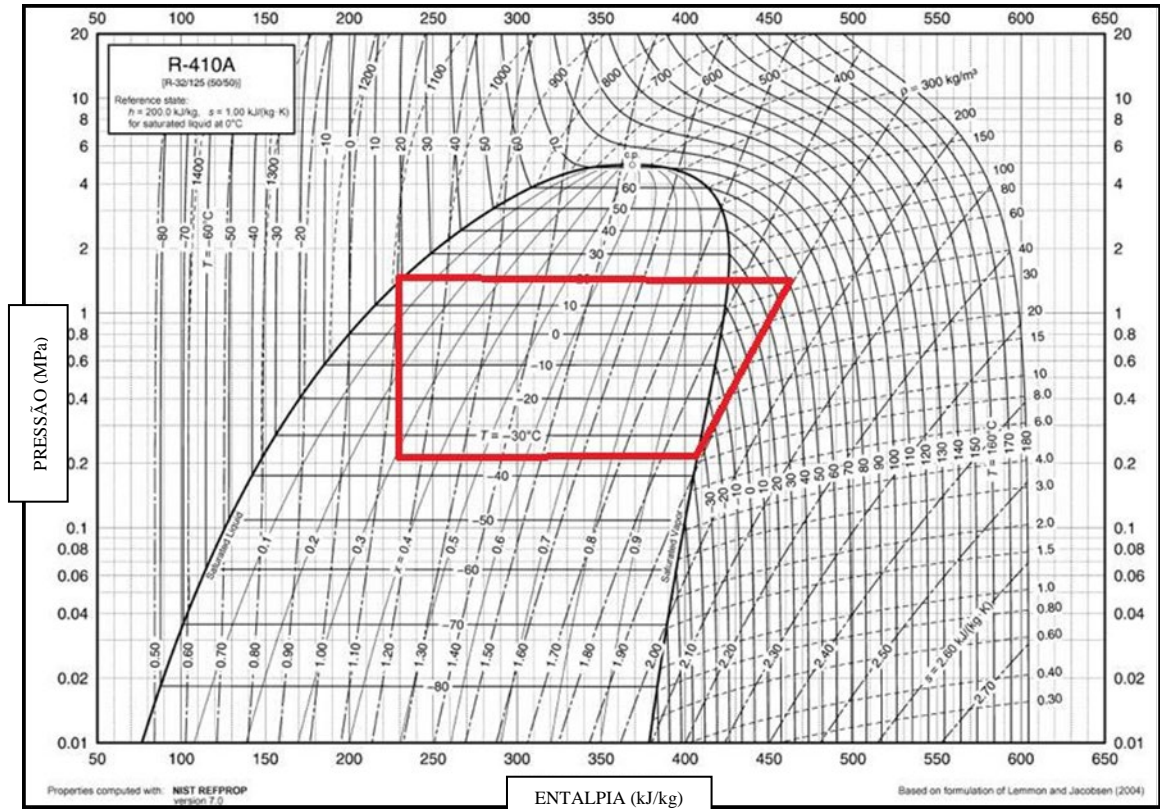
os valores encontrados de vazão mássica, taxa de compressão, densidade do fluido no estado 1 e frequência da rede elétrica ($N = 60 \text{ Hz}$) foram utilizados na Equação 14, obtendo assim o valor cilindrada.

4.1.1 Fluido R-410A

Apartir do procedimento descrito na seção 4.1, utilizando o diagrama pressão-entalpia do fluido R-410A, obtém-se:

$$cyl = 11,15 \text{ cm}^3; \text{COP} = 3,26$$

Figura 12 – Diagrama pressão-entalpia do fluido R-410A



$$h_1 = 406 \text{ kJ/kg}; h_2 = 460 \text{ kJ/kg}; h_4 = 230 \text{ kJ/kg}; \Delta h = 177,8 \text{ kJ/Kg}; \rho_{asp} = 8 \text{ Kg/m}^3;$$

$$\dot{Q} = 541 \text{ W}; P_1 = 0,2 \text{ Mpa}; P_2 = 1,5 \text{ Mpa}; \tau = 7,5; N = 60 \text{ Hz}$$

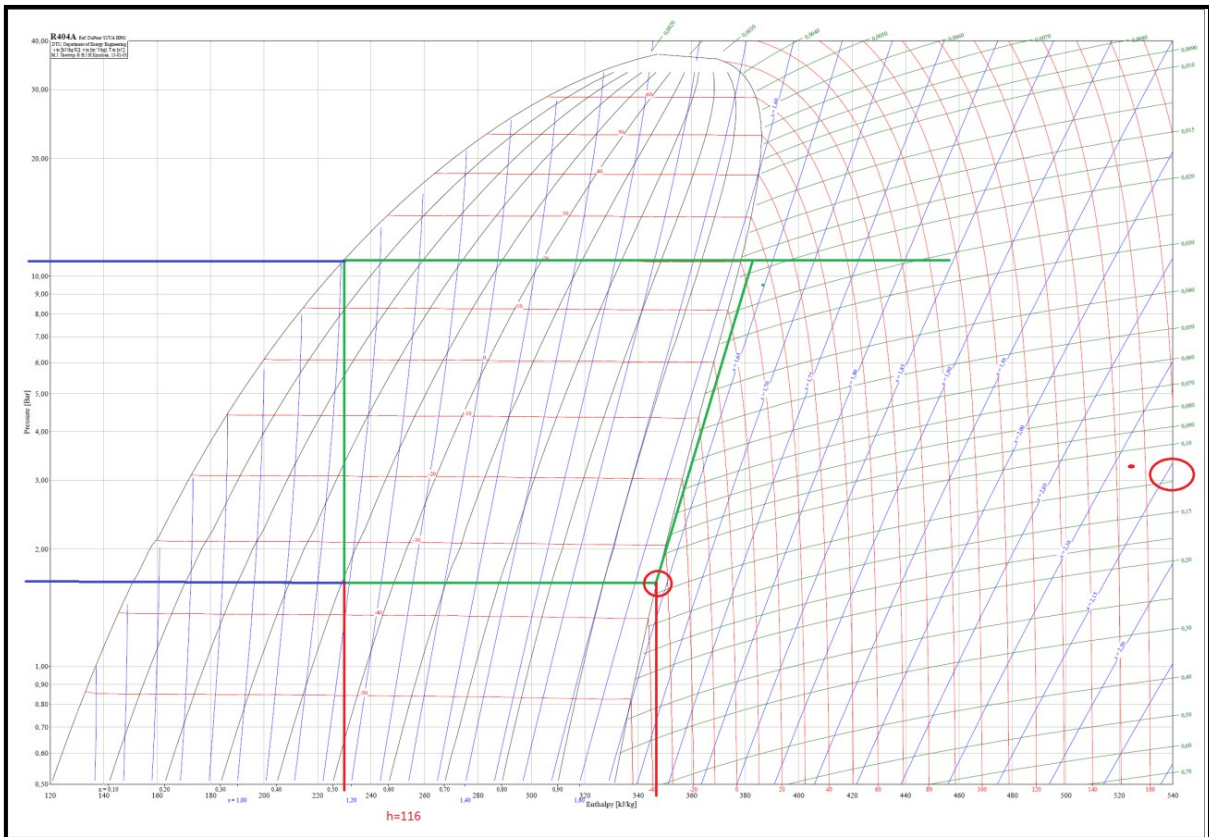
Fonte: Joho (2018b).

4.1.2 Fluido R-404A

Apartir do procedimeto descrito na seção 4.1, utilizando o diagrama pressão-entalpia do fluido R-404A, obtém-se:

$$cyl = 14,6 \text{ cm}^3; \text{COP} = 3,74$$

Figura 13 – Diagrama pressão-entalpia do fluido R-404a



$$\Delta h = 116 \text{ kJ/Kg}; \rho_{asp} = 8,421 \text{ Kg/m}^3; P_1 = 1,80 \text{ bar}; P_2 = 11 \text{ bar}; \tau = 6, 11; h_1 = 354 \text{ kJ/kg}; h_2 = 385 \text{ kJ/kg}; h_4 = 238 \text{ kJ/kg}$$

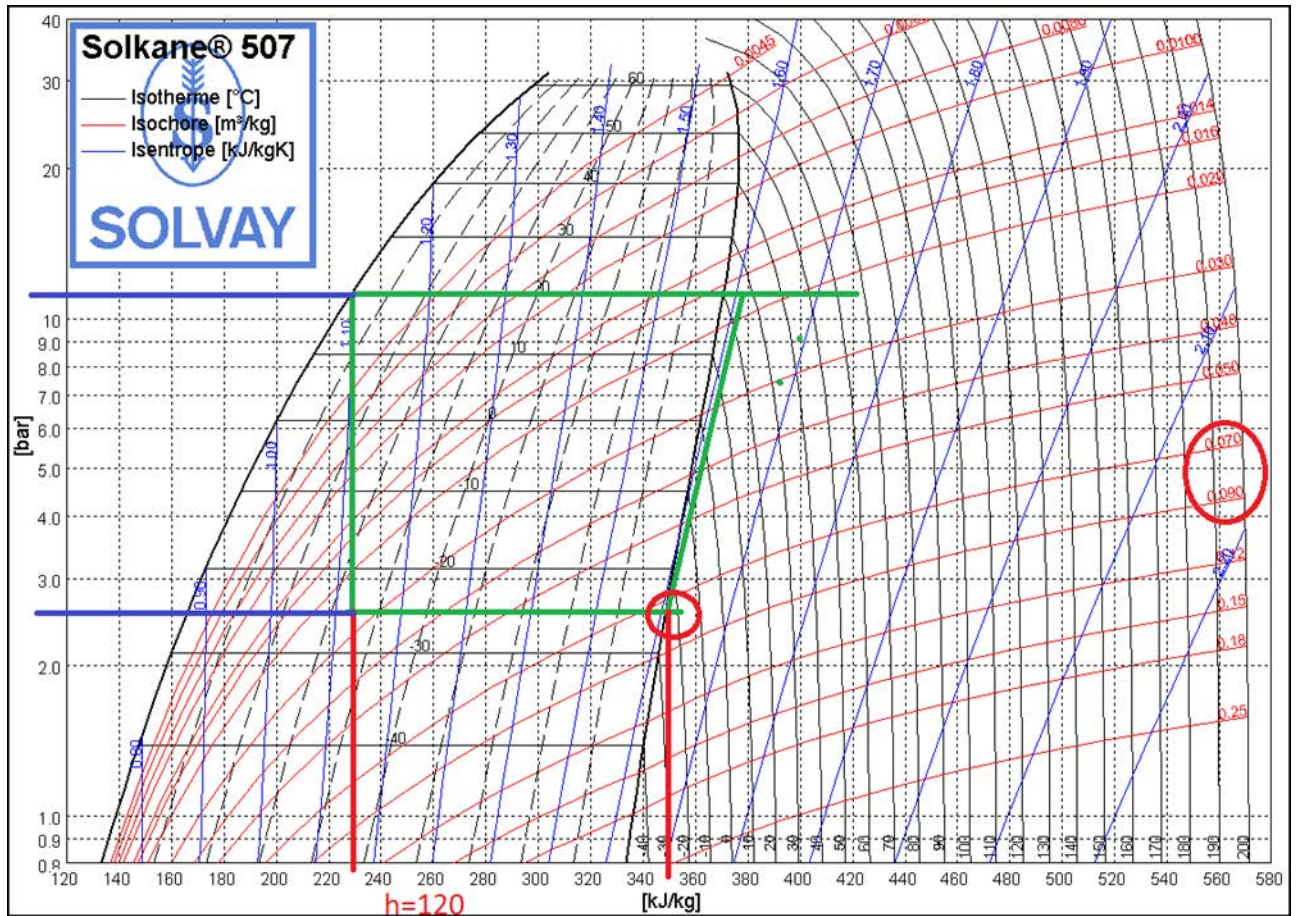
Fonte: Joho (2018b).

4.1.3 Fluido R-507A

Apartir do procedimento descrito na seção 5.1, utilizando o diagrama pressão-entalpia do fluido R-507A, obtém-se:

$$cyl = 7,95 \text{ cm}^3; \text{COP} = 4,44$$

Figura 14 – Diagrama pressão-entalpia do fluido R-507A



$\Delta h = 120 \text{ kJ/Kg}$; $\rho_{\text{asp}} = 13,043 \text{ Kg/m}^3$; $P_1 = 2,6 \text{ bar}$; $P_2 = 11 \text{ bar}$; $\tau = 4,23$; $h_1 = 350 \text{ kJ/kg}$, $h_2 = 377 \text{ kJ/kg}$; $h_4 = 230 \text{ kJ/kg}$

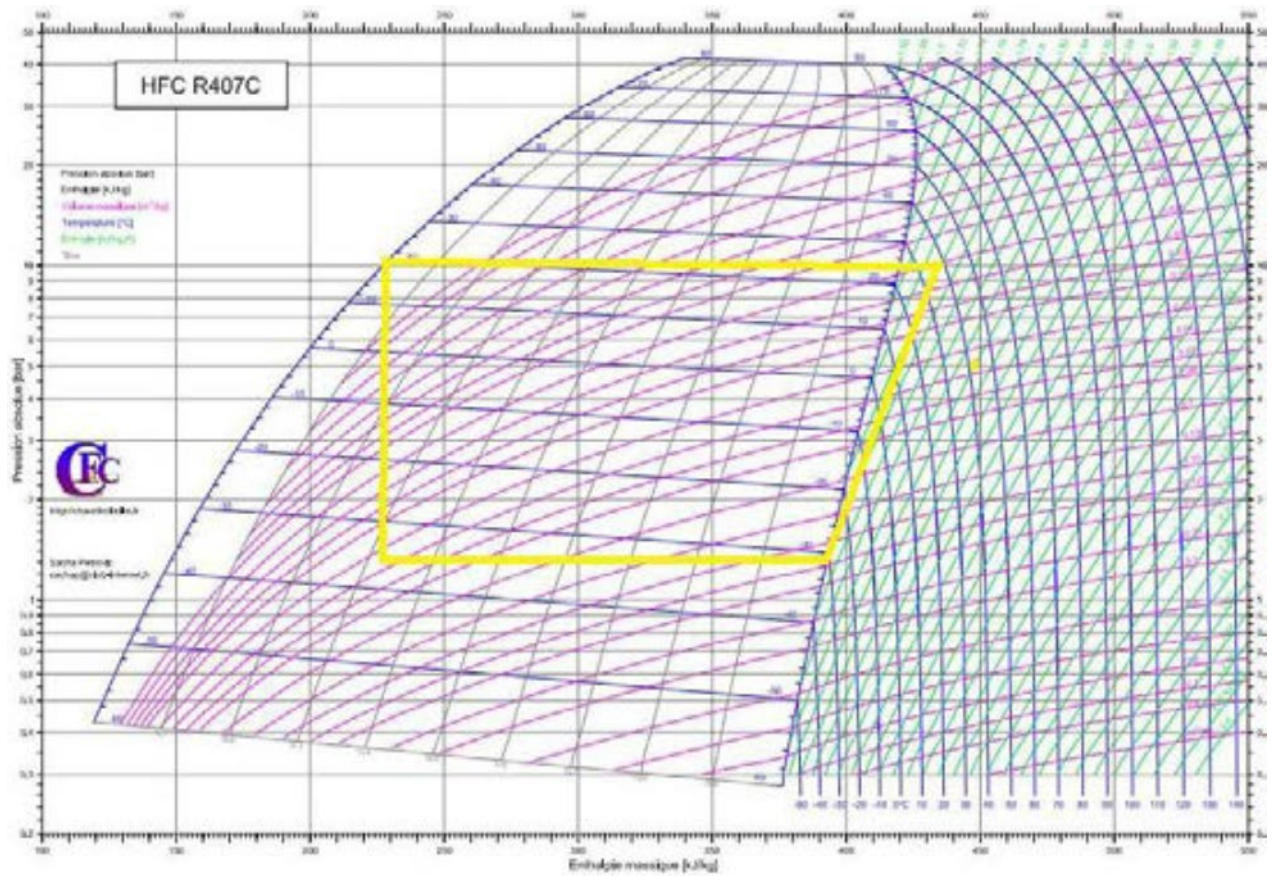
Fonte: Joho (2018b).

4.1.4 Fluido R407C

Apartir do procedimeto descrito na seção 4.1, utilizando o diagrama pressão-entalpia do fluido R-407C, obtém-se:

$$cyl = 15,27 \text{ cm}^3; \text{COP} = 4,47$$

Figura 15 – Diagrama pressão-entalpia do fluido R-407C



$\Delta h = 169,81 \text{ KJ/Kg}$; $\rho_{asp} = 5,88 \text{ Kg/m}^3$; $P_1 = 1,4 \text{ bar}$; $P_2 = 10 \text{ bar}$; $T = 7,14$; $h_1 = 394 \text{ kJ/kg}$; $h_2 = 432 \text{ kJ/kg}$; $h_4 = 224 \text{ kJ/kg}$

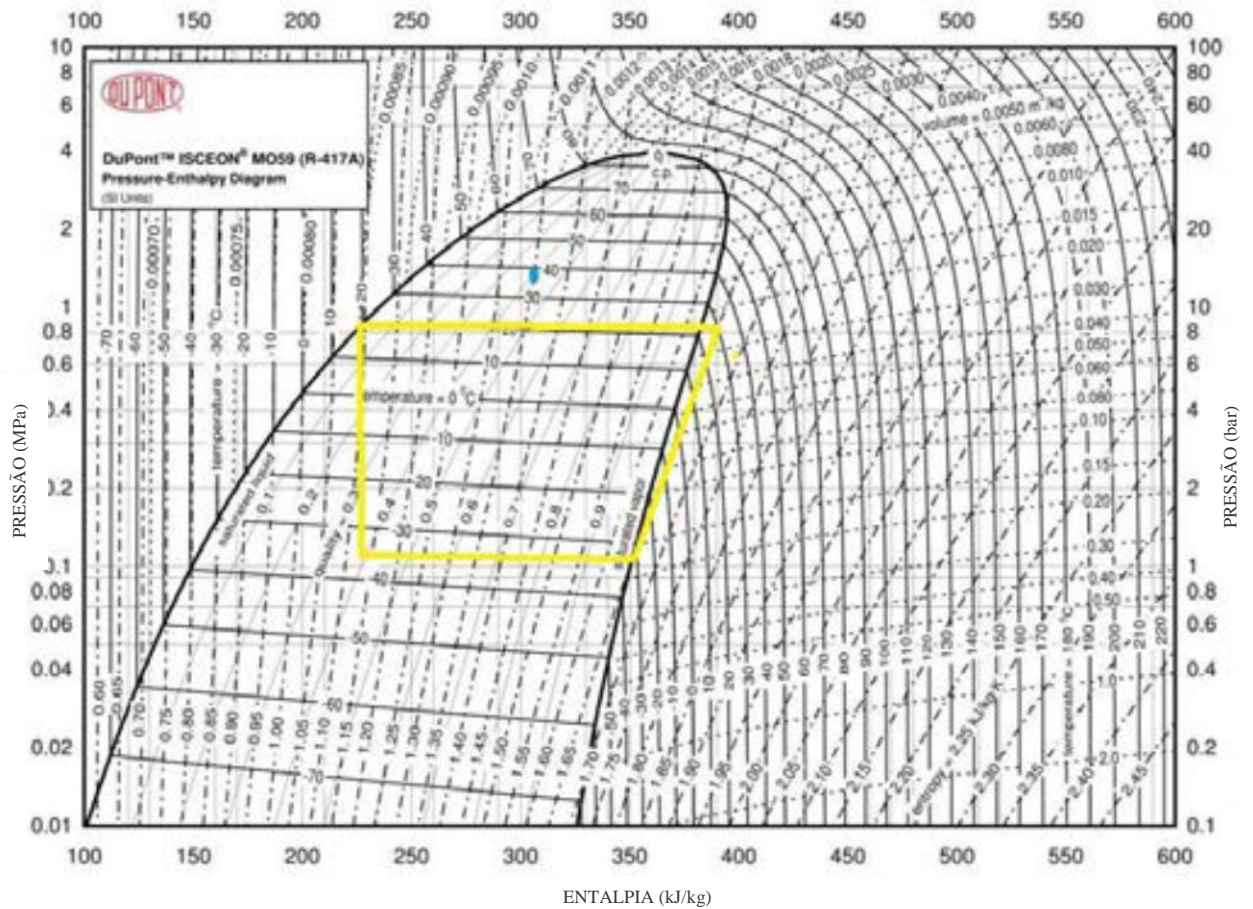
Fonte: Joho (2018b).

4.1.5 Fluido R17A

Apartir do procedimento descrito na seção 4.1, utilizando o diagrama pressão-entalpia do fluido R17A, obtém-se:

$$cyl = 21,6 \text{ cm}^3; \text{COP} = 2,80$$

Figura 16 – Diagrama pressão-entalpia do fluido R17A



$$\Delta h = 126,83 \text{ KJ/Kg}; \rho_{\text{asp}} = 5,88 \text{ Kg/m}^3; P_1 = 0,1 \text{ Mpa}; P_2 = 0,8 \text{ MPa}; \tau = 8; h_1 = 354 \text{ kJ/kg}; h_2 = 400 \text{ kJ/kg}; h_4 = 225 \text{ kJ/kg}$$

Fonte: Joho (2018b).

A escolha dentre os fluidos refrigerantes selecionados foi baseado em seus respectivos valores de COP e cilindrada. O COP, ao relacionar potência utilizada pelo compressor com o calor retirado da câmara fria pelo evaporador, fornece um fator de comparação essencial para a criação de um ciclo com equipamentos mais compactos e eficientes. Um valor mais alto de COP implica na utilização de um compressor que consome menos potência, ou seja, mais compacto. A cilindrada, por representar o volume deslocado de fluido por pistão, é um importante fator para a escolha do compressor a ser utilizado. Um menor valor de cilindrada implica em compressores de menor porte.

A tabela 3 resume os valores calculados de COP e cilindrada para os diferentes fluidos frigoríficos.

Tabela 3 – Valores calculados de COP e cilindrada para diferentes fluidos frigoríficos

Fluido	COP	Cyl (cm3)
R-410A	3,25	11,15
R-404A	3,74	14,46
R-407C	4,47	15,27
R-17A	2,80	21,56
R-507 A	4,44	7,95

Fonte: Autoria própria.

Deste modo escolhemos utilizar o fluido R-507 por melhor representar um equilíbrio entre um alto valor de COP e um valor baixo de cilindrada.

4.2 ESCOLHA DOS COMPONENTES DO CICLO TÉRMICO

4.2.1 Compressor

A partir da cilindrada calculada, foram consultados catálogos de compressores de diferentes fabricantes, em busca de um compressor de pequeno porte que atendesse outras necessidades da nossa máquina, tais como transporte do fluido frigorífico R507, voltagem 110 ou 220 volts, frequência de 60Hz. Foi escolhido deste modo o compressor da Tecumseh AE4430Y-FZ1A, de custo de 878 reais.

A Figura 17 apresenta a imagem do compressor juntamente com uma tabela contendo os principais dados técnicos deste.

Figura 17 – Compressor Tecumseh AE4430Y-FZ1A



Peso:	10
Unidade de medida do peso:	Kg
Deslocamento (cc):	8.02
Tipo de óleo:	Polyolester
Viscosidade (cSt):	32

Fonte: Adaptado de Tecumseh (2018a).

4.2.2 Condensador

O condensador LU-VE GROUP FCE NCE 7.2.210 foi escolhido pois este atende a demanda da taxa de calor exigida pelo ciclo térmico, além de atender as limitações tecnológicas da máquina. O custo deste equipamento é de 283 reais.

A Figura 18 apresenta uma imagem do condensador juntamente com uma tabela contendo os principais dados técnicos deste.

Figura 18 – Condensador LU-VE GROUP FCE NCE 7.2.210



Potência absorvida	586W
Pressão máxima	30 bar
Temperatura máxima	60°C
Tubo de entrada e saída	Ø 8mm
vazão de ar	320 m ³ /h

Fonte: Adaptado de Piecesfrigo (2018).

4.2.3 Válvula de expansão termostática

A válvula de expansão termostática Castel EL-TS2 R404A e R507 foi selecionada por ter sido projetada por trabalhar com o fluido refrigerante R507 à temperaturas e pressões necessárias. O custo deste equipamento é de 260 reais.

A figura 19 apresenta a válvula juntamente com uma tabela contendo com os principais dados técnicos desta.

Figura 19 – válvula de expansão termostática Castel EL-TS2 R404A e R507



Fluidos R404A e R507
Equalização interna
Compatível com material Danfoss
Local de evaporação de -10 à -40°C
rosca 5/8"

Fonte: Adaptado de Peçasfrigo, Aldifrio (2018).

4.2.4 Evaporador

Não foi encontrado no mercado um evaporador que atendesse as necessidades de tamanho e capacidade para o presente projeto.

A Figura 20 apresenta o catálogo de evaporadores. O evaporador Tecumseh TFTC14C é a máquina de menor dimensão que trabalha a temperatura de evaporação de -35°C. Este modelo apresenta dimensões de 325 x 271 x 542 mm (Figura 21) e capacidade de 825 kcal/h (960 W, Figura 20) à temperatura de -35°C, ou seja, possui uma capacidade muito maior do que a necessária, fazendo com que, caso utilizado, poderia superaquecer o fluido dependendo das condições de operação. Isto implicaria na necessidade da inclusão de alguma tecnologia para dessuperaquece-lo. Além disso as dimensões ultrapassam as previstas no começo do projeto, de modo que ao utiliza-lo a máquina final possuiria praticamente o dobro do tamanho preestabelecido.

As Figuras 20 e 21 apresentam, respectivamente, os dados retirados de catálogo de evaporadores e as respectivas dimensões do equipamento.

Figura 20 – catálogo evaporadores

Modelo Modelo		Capacidade (Kcal/h) - DT = 6°C / Capacidade (Kcal/h) - DT = 6°C Temperatura de evaporação [°C] / Temperatura de evaporação [°C]											Dados dos Ventiladores Datos de los Ventiladores			
		10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	Flujo (m³/h) Flujo de aire (m³)	Quant. Cantidad.	Diám. (mm) Diám. (mm)	Flujo de ar (m³) Flujo de aire (m³)
		MODELO 4 ALETAS (POLEGADAS) / MODELO 4 ALETAS (PULGADAS)														
TFTC13R		1.226	1.165	1.112	1.051	998	975	952	921	899	-	-	840	1	254	10
TFTC14R		1.487	1.413	1.348	1.274	1.210	1.182	1.154	1.117	1.090	-	-	770	1	254	10
TFTC23R		2.445	2.338	2.220	2.083	1.995	1.946	1.897	1.839	1.770	-	-	1.680	2	254	10
TFTC24R		2.997	2.858	2.709	2.538	2.432	2.378	2.314	2.240	2.165	-	-	1.540	2	254	10
TFTC33R		3.709	3.520	3.330	3.130	2.993	2.919	2.845	2.750	2.656	-	-	2.520	3	254	10
TFTC34R		4.561	4.325	4.089	3.843	3.666	3.578	3.481	3.381	3.273	-	-	2.310	3	254	10
TFTC43R		5.075	4.822	4.569	4.203	4.103	4.005	3.782	3.782	3.655	-	-	3.360	4	254	10
TFTC44R		6.123	5.814	5.506	4.938	4.938	4.819	4.550	4.550	4.410	-	-	3.080	4	254	10
TFTC54R		7.930	7.543	7.155	6.185	6.185	6.042	5.705	5.705	5.522	-	-	3.850	5	254	10
TFTC64R		10.267	9.755	9.242	7.407	7.407	7.230	6.835	6.835	6.618	-	-	4.620	6	254	10
TFTC74R		12.053	11.446	10.840	8.704	8.704	8.495	8.018	8.018	7.760	-	-	5.390	7	254	10
TFTC84R		13.745	13.054	12.363	9.926	9.926	9.683	9.151	9.151	8.852	-	-	6.160	8	254	10
MODELO 6 ALETAS (POLEGADAS) / MODELO 6 ALETAS (PULGADAS)																
TFTC14C		1.169	1.118	1.066	997	954	937	911	877	851	825	767	850	1	254	10
TFTC23C		1.920	1.838	1.747	1.638	1.565	1.537	1.492	1.446	1.401	1.357	1.224	1.800	2	254	10
TFTC24C		2.398	2.278	2.168	2.038	1.938	1.898	1.858	1.788	1.728	1.658	1.534	1.700	2	254	10
TFTC33C		2.946	2.799	2.651	2.494	2.376	2.337	2.249	2.190	2.121	2.043	1.901	2.700	3	254	10
TFTC34C		3.633	3.450	3.257	3.064	2.918	2.853	2.780	2.688	2.606	2.514	2.346	2.550	3	254	10
TFTC43C		3.998	3.796	3.584	3.372	3.211	3.140	3.059	2.958	2.867	2.767	2.581	3.600	4	254	10
TFTC44C		4.880	4.642	4.405	4.130	3.940	3.854	3.750	3.636	3.522	3.389	3.133	3.400	4	254	10
TFTC54C		6.314	6.000	5.687	5.279	4.918	4.840	4.681	4.538	4.386	4.234	3.932	4.250	5	254	10
TFTC64C		8.206	7.799	7.391	6.703	5.924	5.788	5.643	5.471	5.290	5.100	4.724	5.100	6	254	10
TFTC74C		9.608	9.131	8.654	7.848	6.936	6.776	6.607	6.405	6.193	5.971	5.531	5.950	7	254	10
TFTC84C		10.932	10.389	9.835	8.936	7.891	7.703	7.515	7.274	7.044	6.793	6.300	6.800	8	254	10

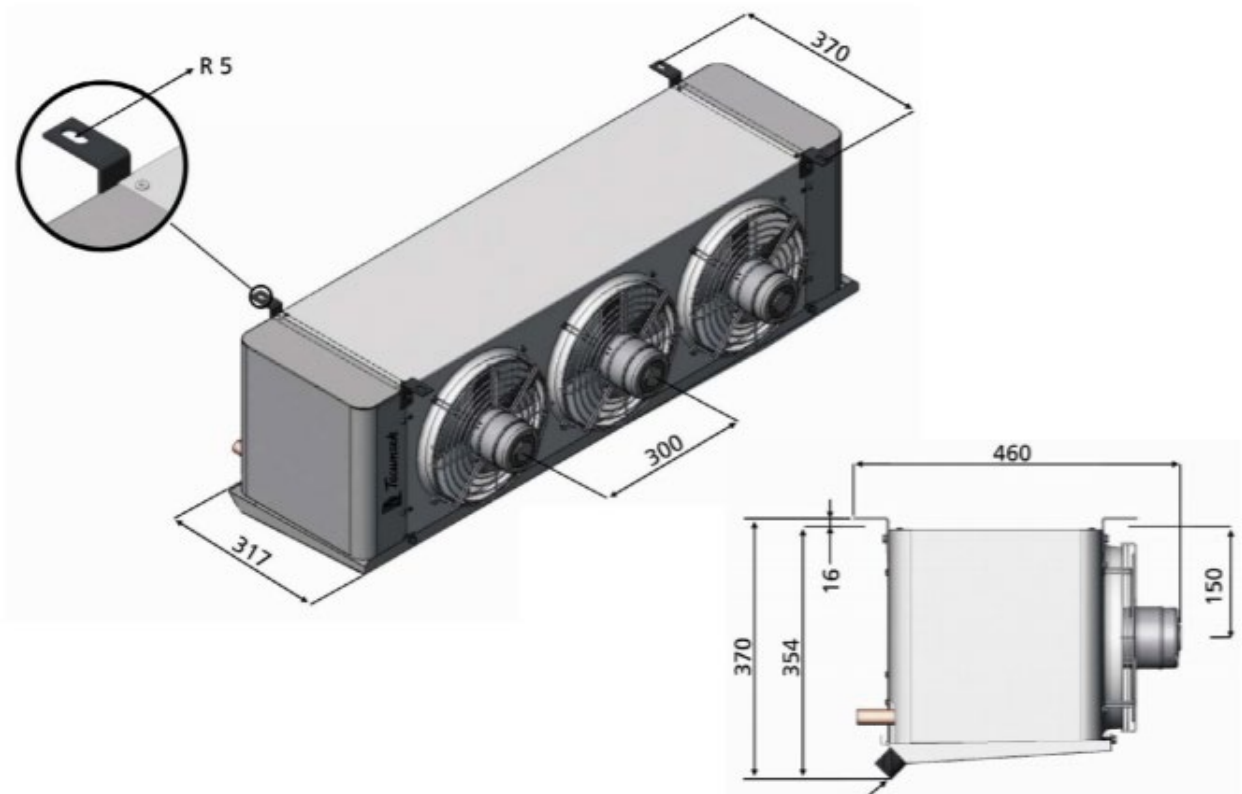
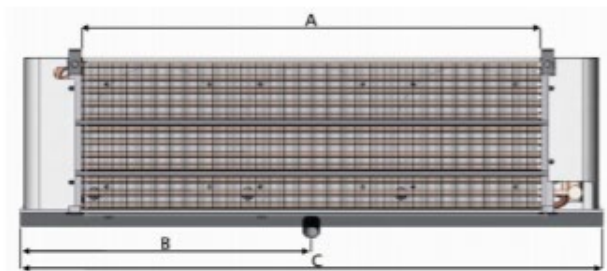
Modelos TFTC 60 Hz (para 50Hz, multiplicar por 0,9)

Observaciones:

Fonte: Tecumseh (2018b).

Figura 21 – dimensões evaporadores

Modelo Modelo	Dimensões (mm) Dimensiones (mm)			DADOS DIMENSIONAIS DATOS DIMENSIONALES
	A	B	C	
13 / 14	325	271	542	
23 / 24	625	421	842	
33 / 34	925	571	1142	
43 / 44	1250	734	1467	
54	1550	884	1767	
64	1850	1034	2067	
74	2175	1196	2392	
84	2475	1346	2692	



Fonte: Tecumseh (2018b).

4.3 MODELAGEM 3D

Foi utilizado o software Solidworks para a modelagem do produto final.

Devido à complexidade da estrutura do condensador, este equipamento foi modelado de maneira meramente ilustrativa, respeitando-se apenas as dimensões básicas de altura, comprimento e largura.

Como não foi encontrado no mercado um evaporador que atendesse as dimensões predefinidas, este equipamento não foi modelado. Porém foi reservado um espaço acima do compressor e abaixo da câmara fria caso, em projetos futuros, se projete um evaporador de menor porte para este equipamento.

A disposição dos componentes foi organizada de maneira a ser compacta porém reservando espaço para componentes futuros, tais como o evaporador, painel, tubulações, fiações etc, obtendo por fim uma máquina de dimensões 230 x 320 x 550 mm. A utilização do evaporador Tecmuseh TFTC14C, implicaria em uma máquina com aproximadamente o dobro das dimensões obtidas (547 x 690 x 1092 mm).

A Figura 22 representa os componentes da máquina, da esquerda para a direita: estrutura, câmara fria, compressor e condensador.

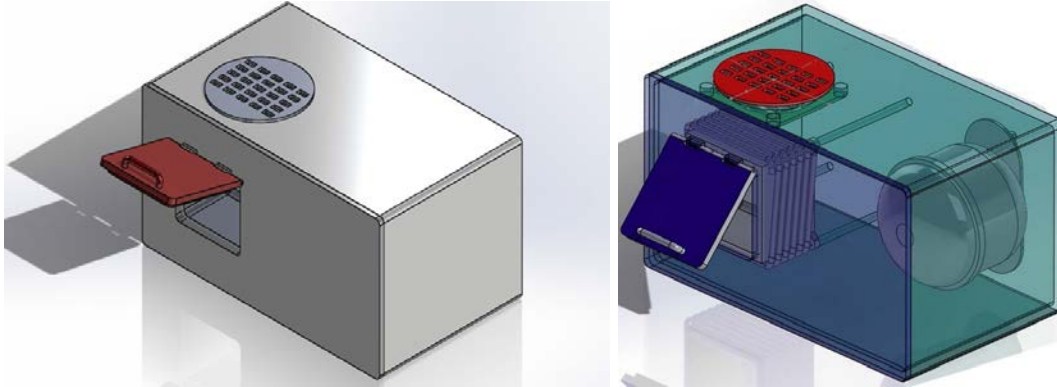
Figura 22 – componentes do ciclo térmico (estrutura, câmara fria, compressor e condensador)



Fonte: Autoria própria.

A Figura 23 representa a máquina pronta.

Figura 23 – máquina de ultracongelamento. Dimensão 550 x 320 x 230 mm.



Fonte: Autoria própria.

4.4 ANÁLISE DE CUSTOS

A Tabela 4 apresenta as dimensões e o custo para compra unitária dos componentes principais da máquina, os componentes do ciclo térmico. O custo total foi de 1371 reais. Neste montante não estão incluídos o custo com painel, tubulação, sensores, fiação, evaporador, por não ser encontrado no mercado um evaporador que atenda às necessidades dimensionais do projeto, carcaça, montagem e distribuição. Sendo assim, a máquina possuiria um custo de produção maior que 1400 reais. Visando a produção em larga escala, os preços sofreriam variação, tornando-se mais baratos devido ao maior volume de compra.

Tabela 4 – Custo de compra unitária de cada componente

Componente	Custo (R\$)
Compressor	828
Condensador	283
Válvula de expansão	260
Evaporador	-
Total	1371

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

O presente projeto dimensionou e definiu os componentes do ciclo térmico teórico para uma máquina de ultracongelamento para uso residencial, com capacidade de ultracongelar 2 kg de alimento, atingindo a temperatura de -18°C em 30 minutos. Não foi encontrado no mercado um evaporador que atendesse as pré-definições dimensionais do produto proposto. A utilização do menor evaporador encontrado implicaria na necessidade da utilização de alguma tecnologia para adequar o ciclo devido ao superdimensionamento térmico desta máquina. Além disso implicaria também em uma máquina maior, com dimensões próximas das menores máquinas já existentes hoje no mercado.

Um estudo de marketing seria de interesse para a continuação deste projeto, de modo a determinar dimensões e preços que tornariam o produto bem aceito no mercado residencial. Além disso, o estudo permitiria dimensionar a quantidade de pessoas que conhecem o processo de ultracongelamento, podendo assim definir um projeto de marketing para a divulgação deste processo e suas vantagens.

Propõe-se para projetos futuros: o redimensionamento do ciclo térmico de modo a aproxima-lo do real, ou seja, considerando perdas de cargas, subresfriamento e superaquecimento do fluido, definição do isolante térmico para a câmara de refrigeração etc, e o projeto de um evaporador mais compacto que atenda às necessidades do ciclo.

REFERÊNCIAS

AGOULON, A. **Impact of freezing parameters on the characteristics of food.** Air Products, United Kingdom, 2010. Disponível em: <http://www.airproducts.co.uk/~media/Files/PDF/microsites/freshthinking/UK_Agoulon-white-paper.pdf?la=en-GB>. Acesso em: 30 out. 2018.

ALDIFRIO. **Catálogo de produtos de refrigeração e ar condicionado.** Disponível em: <http://aldifrio.com/wp/wp-content/uploads/2016/11/15_Valvulas_e_acessorios.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2018.

CLAUS, B; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica.** 7. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

DAMODARAN S., PARKIN K. L, OWEN R. F. **Química de alimentos.** 4. ed. Artmed, 2009. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=bdAVu_tQGi0C&pg=PA53&lpg=PA53&dq=diagrama+concentra%C3%A7%C3%A3o+de+%C3%A1gua+congelada+alimento&source=bl&ots=Ghlp_PkBop&sig=CZ3tDNNh3G8BuyrECQsteJCR13c&hl=pt-BR&sa=X&ved=2ahUKEwio7oiXtqTeAhVBHJAKHRPNDLkQ6AEwDnoECAMQAQ#v=onepage&q=diagrama%20concentra%C3%A7%C3%A3o%20de%20%C3%A1gua%20congelada%20alimento&f=false>. Acesso em: 03 dez. 2018.

ESTADÃO. **Pesquisas de mercado apontam maior preocupação com alimentação saudável.** CARREIRO, J. Disponível em: <<https://emails.estadao.com.br/blogs/comida-de-verdade/pesquisas-de-mercado-apontam-maior-preocupacao-com-alimentacao-saudavel/>> Acesso em: 03 dez. 2018.

FAO. **30% de toda a comida produzida no mundo vai parar no lixo,** 2017. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/fao-30-de-toda-a-comida-produzida-no-mundo-vai-parar-no-lixo/>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

FIESP. **A mesa dos brasileiros:** transformações, confirmações e contradições. Disponível em: <<http://hotsite.fiesp.com.br/amesadosbrasil/amesadosbrasil.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

FREITAS, A. C.; FIGUEIREDO, P. **Conservação de alimentos,** Lisboa, 2000. Disponível em: <<http://www.unirio.br/dmp/nutricao-integral/fontes-de-consulta-complementar/FREITAS-%20FIGUEIREDO-%202000%20-%20Conservacao%20dos%20Alimentos%20-%20Livro.pdf/view>>. Acesso em: 08 dez. 2018.

INCROPERA, F. P. **Fundamentos da transferência de calor.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

JOHO a. **Máquina de ultracongelamento,** Disponível em: <https://www.joho.p.free.fr/EC/ENERGIE/_Ressources/FROID%20Les%20Surgele%C3%A9s%20et%20les%20Glaces/Ficur/tech3.htm> Acesso em: 03 dez. 2018.

JOHO b. **Diagrama pressão.** Disponível em: <http://joho.p.free.fr/EC/ENERGIE/_Ressources/FLUIDES%20Frigorig%C3%A8nes/Dupont%20de%20Nemours/www.dupont.com/suva/emea/products/technical/molier_pe.html>. Acesso em: 03 dez. 2018.

LEBAIL, A. et al. Evaluation of the mean ice ratio as a function of temperature in a heterogeneous food: Application to the determination of the target temperature at the end of freezing. **International Journal of Refrigeration**, Nantes, v. 31, n. 5, p. 816-821, 2008.

MARTINS, I. M. G. **Segurança alimentar e controlo da produção na indústria de pastelaria ultracongelada**, 2013. Relatório de Estágio Profissionalizante (Mestrado em Engenharia Alimentar) – Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra, 2013.

MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N., BOETTNER, D. D., BAILEY, M.B. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Água presente nos alimentos.** Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/curiosidades/agua-presente-nos-alimentos.htm>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

ONU a. **Conheça os novos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU**, 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/conheca-os-novos-17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-da-onu/>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

ONU b. **Objetivo 12**, 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/ods12/>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

PIECESFRIGO. **Condenseur LU-VE GROUP FCE avec cache NCE 7.2.210 586 W.** Disponível em: <<http://www.piecesfrigo.com/condenseur-lu-ve-group-fce-avec-cache-nce-72210-586-w-c2x14231203>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

RAHMAN, M. S. **Handbook of food preservation**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2007. p. 637.

RÉMY, J. **Modern freezing facilities**. Ing. ECP-IFFI, Paris, France, jun. 1986, p. 168.

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

TECUMSEH a. **Reciprocating Compressors.** Disponível em: <<https://www.tecumseh.com/en/europe/Products/Reciprocating-Compressors/AE4430Y-FZ1A?fromsearch=1&fromsearch=1>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

TECUMSEH b. **Evaporadores Linhas TFTC / TDFTC / RC.** Disponível em: <<https://www.tecumseh.com/~media/South-America/Files/Portuguese-Library/Evaporador---Cat%C3%A1logo.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

WIKIWAND. **Refrigeração.** Disponível em: <<http://www.wikiwand.com/pt/Refrigera%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 03 dez. 2018.