

Revista Brasileira de Engenharias

Data de aceite: 07/10/2025

DIMENSIONAMENTO DE UM RACK PARA TÚNEL DE RESFRIAMENTO APLICADO PARA CONGELAMENTO DE PÃO DE QUEIJO

Lucas Eduardo Fischer

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque, Brusque/SC

Andrei Buse

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque, Brusque/SC

Igor dos Santos Roik

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque, Brusque/SC

Ricardo Siewerdt

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque, Brusque/SC

Luciano Pinotti

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque, Brusque/SC

Enéias Maffezzolli

UNIFEBE – Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque, Brusque/SC

Todo o conteúdo desta revista está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).



Resumo: A refrigeração industrial é um dos principais recursos utilizados para garantir a conservação e segurança de alimentos perecíveis, sendo essencial para manter a qualidade durante o armazenamento e transporte. Dentro as tecnologias mais empregadas nesse setor, destaca-se o uso de túneis de congelamento helicoidais (Girofreezers), que proporcionam congelamento rápido, uniforme e contínuo. Este trabalho tem como objetivo o dimensionamento de um sistema de refrigeração centralizado (rack) voltado para o congelamento contínuo de pão de queijo, considerando uma produção de 1.100 kg/h. A metodologia baseou-se na aplicação de conceitos de termodinâmica, transferência de calor e análise de carga térmica, contemplando também perdas por isolamento, acionamentos e infiltrações. Com base na carga térmica total estimada, foram selecionados os principais componentes do sistema de forma a garantir desempenho operacional adequado e eficiência energética. Ressalta-se que o sistema proposto não foi fisicamente implementado, sendo o projeto desenvolvido de forma teórica. A análise dos resultados foi realizada com base em cálculos e comparações com dados de referência da literatura e estudos correlatos. A comparação com essas referências reforçou a coerência dos parâmetros adotados, confirmando a viabilidade técnica da solução proposta e evidenciando sua aplicabilidade em processos industriais de alta produtividade.

Palavras-chave: Refrigeração industrial; Girofreezer; Carga térmica; Dimensionamento térmico

INTRODUÇÃO

A refrigeração de alimentos é uma tecnologia essencial para a preservação de produtos perecíveis, desempenhando um papel crucial na manutenção de sua qualidade e segurança alimentar. Desde os tempos antigos, com o uso de gelo para armazenagem, até os avanços

modernos, a refrigeração tem sido um fator determinante na ampliação da vida útil dos alimentos, retardando processos de deterioração causados por fatores biológicos e químicos (Çengel, 2012).

A refrigeração desacelera os processos químicos e biológicos nos alimentos, além de reduzir a deterioração e a perda de qualidade. A vida útil de alimentos perecíveis frescos, como carnes, peixes, frutas e vegetais, pode ser estendida por vários dias com o resfriamento e por várias semanas ou meses com o congelamento (Çengel, 2012).

O controle da temperatura é o método mais eficaz para reduzir a taxa de crescimento de microrganismos, como bactérias, leveduras e fungos nos alimentos. O congelamento, que consiste na solidificação da água presente nos alimentos em temperaturas entre -18°C e -35°C, permite armazená-los por longos períodos, preservando suas propriedades nutritivas por vários meses, dependendo do tipo de alimento (Çengel, 2012).

O girofreezer, é um equipamento amplamente utilizado na indústria alimentícia para o congelamento rápido e eficiente de grandes volumes de produtos. Seu design compacto e vertical, com esteiras em espiral, permite maximizar o uso do espaço, sendo ideal para instalações com área limitada. A tecnologia de congelamento rápido empregada nesses sistemas assegura que os alimentos sejam congelados de maneira uniforme, preservando sua textura, sabor e valor nutricional. Além disso, os girofreezers são projetados para facilitar a limpeza e manutenção, atendendo aos rigorosos padrões de higiene exigidos no processamento de alimentos (NTSQUARE, 2023).

Este trabalho tem como objetivo explorar os conceitos fundamentais do resfriamento de alimentos. O dimensionamento do sistema de resfriamento correto é essencial para garantir que os sistemas sejam capazes de atender às necessidades térmicas específicas de diferen-

tes tipos de alimentos, otimizando a eficiência energética e assegurando a preservação ideal dos produtos.

Através de uma análise detalhada dos princípios termodinâmicos, técnicas de resfriamento e práticas de dimensionamento, este estudo visa fornecer um entendimento sobre o dimensionamento de um sistema de resfriamento utilizado dentro das indústrias alimentícias.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

RESFRIAMENTO DE ALIMENTOS

A conservação de alimentos pelo frio já era conhecida há muito tempo, utilizando métodos como adegas subterrâneas, gelo natural e neve com sais. No entanto, a invenção da máquina frigorífica no século XIX impulsionou essa técnica. Inicialmente, os alimentos eram apenas resfriados, mas, a partir de 1860, percebeu-se que a redução da temperatura abaixo de 0°C prolongava ainda mais sua conservação, dando origem à técnica do congelamento. Diferente de outros métodos, o frio mantém inalterado o sabor, o odor e o aspecto natural dos alimentos (Costa, 1982).

A desidratação e a perda de sabor são minimizadas por meio de embalagens adequadas (que devem ser livres de ar) durante os processos de congelamento e armazenamento. As menores perdas de umidade ocorrem quando o ar do túnel está quase saturado e os ventiladores estão desligados, ou seja, quando o ar está em repouso (Dossat, 2004).

Atualmente, a técnica de conservação pelo frio é complementada por outros métodos, como o uso de atmosfera controlada, agentes químicos, proteções superficiais com óleos, sais e açúcares, além de envoltórios de papel tratado quimicamente (Costa, 1982).

A vida útil de alimentos perecíveis frescos, como carnes, peixes, vegetais e frutas, pode ser prolongada por vários dias ao armazená-

-los em temperaturas ligeiramente acima do ponto de congelamento, geralmente entre 1°C e 4°C. Já o congelamento e armazenamento em temperaturas abaixo de zero, geralmente entre -18°C e -35°C, podem estender a conservação dos alimentos por vários meses, dependendo do tipo de alimento (Çengel, 2012).

TÚNEL HELICOIDAL DE CONGELAMENTO

O congelamento de alimentos por meio de tuneis espirais/helicoidais é um dos métodos mais utilizados industrialmente. Foi desenvolvido para um congelamento IQF, ou para embalagens congeladas individualmente, considerando-se a temperatura mínima de -30°C (Leitão, 2015).

Os alimentos são transportados em esteiras metálicas flexíveis e auto empilháveis, operando de forma automática. Esse sistema permite o processamento simultâneo de diversos alimentos. O congelamento ocorre de maneira contínua, sendo projetado para reduzir perdas e preservar a qualidade durante todo o processo. Os produtos são distribuídos de forma uniforme, indo diretamente da linha de produção para a esteira do congelador (Leitão, 2015).

Os freezers em espiral são sistemas avançados de congelamento que utilizam uma correia transportadora posicionada em um padrão espiral. O princípio de funcionamento gira em torno da circulação de ar frio por todo o freezer enquanto os produtos se movem ao longo da esteira transportadora. Esse fluxo contínuo permite um congelamento rápido e uniforme, mantendo a qualidade e integridade dos produtos. Principais vantagens, o projeto de fluxo contínuo permite um aumento significativo nas capacidades de produção. Os freezers espirais podem lidar com quantidades maiores de produtos em comparação com os sistemas de congelamento convencionais (CFBI, 2025).



Figura 1 - Girofreezer (Túnel Helicoidal de Resfriamento).

Fonte: Brusinox (2025).

Devido à ampla superfície da esteira, os produtos podem ser congelados em uma única camada, permitindo um congelamento rápido e individual (IQF – Individual Quick Freezing). Como a ordem de carregamento é mantida ao longo de todo o processo, a separação de produtos mistos congelados simultaneamente torna-se mais fácil (Leitão, 2015).

Este método é amplamente utilizado na indústria alimentar para produções de grande envergadura devido à sua conveniência, flexibilidade e eficiência (Dempsey; Bansal, 2010)

EVAPORADORES

Um evaporador é qualquer superfície de transferência de calor onde um líquido volátil é vaporizado para remover calor de um espaço ou produto refrigerado (Dossat, 2004).

Dentro do evaporador, o refrigerante se vaporiza para um estado gasoso. Essa mudança de estado requer calor latente, que é extraído do ambiente (Singh; Heldman, 2009)

Os evaporadores, devido à ampla gama de aplicações da refrigeração mecânica, são fabricados em diversos tipos, formatos, tamanhos e designs. Sua classificação pode ser feita de diferentes formas, considerando aspectos como o tipo de construção, o método de alimentação do refrigerante, a condição de operação, o modo de circulação de ar ou líquido,

o tipo de controle do refrigerante e a aplicação específica (Dossat, 2004)

Os evaporadores podem ser divididos em 3 modelos principais e mais comuns:

I. Evaporador de tubo liso: são os mais comuns, simples, fácil descongelamento e de fácil limpeza;

II. Evaporador com aletas: as aletas instaladas nele possibilitam uma maior superfície de contato, aumentando assim a transferência de calor;

III. Evaporador de placa: permite um contato indireto entre o produto a ser resfriado e o refrigerante. Muito comum em refrigeradores domésticos.

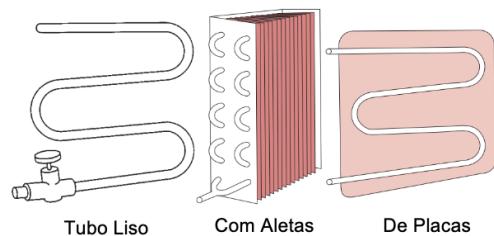


Figura 2 - Diferentes modelos de evaporadores.

Fonte: Adaptado de Singh e Heldman (2009).

Os evaporadores são componentes essenciais nos sistemas de refrigeração e podem ser classificados, quanto ao método de alimentação do refrigerante, em dois tipos principais: expansão direta (ou seca) e inundados. Nos evaporadores de expansão direta, o refrigerante entra no evaporador em estado líquido e evapora-se à medida que percorre os tubos, absorvendo calor do meio a ser resfriado. Neste processo, não há recirculação do refrigerante no interior do evaporador, e todo o fluido é vaporizado antes de retornar ao compressor. Já nos evaporadores do tipo inundado, o evaporador permanece parcialmente cheio de refrigerante líquido, garantindo que toda a superfície interna esteja em contato com o fluido. O refrigerante que não evapora é recirculado por meio de um separador de líquido, proporcionando uma transferência de calor

mais eficiente, embora exija uma maior carga de refrigerante e um sistema mais complexo (Jabardo; Stoecker, 2007).

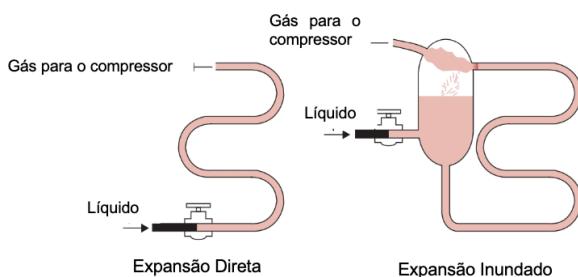


Figura 3 - Evaporadores de expansão direta e inundado.

Fonte: Adaptado de Singh e Heldman (2009).

FLUIDOS REFRIGERANTES

Fluidos refrigerantes são substâncias utilizadas em sistemas de refrigeração e ar-condicionado para transferir calor de um local para outro, garantindo que o ambiente ou produto seja resfriado ou congelado. O funcionamento de um sistema de refrigeração depende da troca de calor entre os componentes, e o fluido refrigerante desempenha um papel crucial nesse processo.

De acordo com Rapin (2001), um fluido refrigerante perfeito deve apresentar entre outras as seguintes características:

1. Não ter ação sobre os metais componentes do circuito;
2. Não ser inflamável nem explosivo misturado com o ar;
3. Não ser prejudicial à saúde do pessoal;
4. Inodoro ou tendo apenas um leve cheiro não desagradável;
5. Emanações fáceis de detectar e de localizar por método visual;

CARGA TÉRMICA

A carga térmica de um ambiente é definida como a quantidade de calor que deve ser removida, para o caso de resfriamento, ou adicionada, para aquecimento, para manutenção de determinadas condições térmicas além

disso a análise da carga térmica segue um padrão, deve-se conhecer o produto, seu estado inicial, calor específico, massa, temperatura de congelamento e calor latente (Ashrae, 2018).

O calor sempre se transfere da região de maior temperatura para a de menor temperatura, ou seja, do corpo mais quente para o mais frio, nunca no sentido contrário. Como o calor é uma forma de energia, ele não é destruído nem consumido em nenhum processo. Assim, a energia térmica perdida por um corpo é absorvida por outro cuja temperatura seja mais baixa. Além disso, a taxa de transferência de calor é proporcional à diferença de temperatura entre os corpos, sendo esse o fator que impulsiona o processo (Dossat, 2004).

Condução

A condução térmica ocorre quando a energia é transferida pelo contato direto entre as moléculas de um único corpo ou entre moléculas de dois ou mais corpos em contato térmico. Nesse processo, as moléculas aquecidas transferem sua energia para as moléculas vizinhas, promovendo a propagação do calor (Dossat, 2004)

Condução térmica pode ser calculada como:

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad \text{Eq.(1)}$$

Onde:

Q = carga térmica devida à condução (W);

K = condutividade térmica (W/m.K)

A = área de troca térmica (m^2);

ΔT = diferença de temperatura (K);

L = espessura do material (m);

O regime de transmissão de calor por condução é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre as regiões de alta e bai-

xa temperatura. No entanto, a capacidade de condução do calor varia entre os materiais. Metais, por exemplo, conduzem o calor rapidamente, enquanto materiais como cristal, madeira e cortiça apresentam alta resistência à condução térmica (Dossat, 2004).

Assim, para uma mesma diferença de temperatura, o fluxo de calor por condução dependerá das propriedades específicas de cada material. Essa capacidade relativa de condução térmica é chamada de condutividade térmica. Materiais com alta condutividade são bons condutores de calor, enquanto aqueles com baixa condutividade funcionam como isolantes térmicos (Dossat, 2004).

Convecção

A convecção térmica ocorre quando o calor é transferido de um local para outro por meio do movimento de um fluido. Esse processo acontece devido à formação de correntes de convecção, que surgem da variação de densidade causada pela expansão da parte aquecida do fluido (Dossat, 2004).

Quando uma parte do fluido é aquecida, ela se expande, aumentando seu volume em relação ao seu peso. Como resultado, essa porção aquecida se torna mais leve e tende a subir, enquanto uma porção mais fria e densa do fluido ocupa seu lugar (Dossat, 2004).

De acordo com Çengel (2012), a convecção pode ser classificada como natural (ou livre) ou forçada, dependendo do modo como o movimento do fluido é gerado.

A transferência de calor por convecção pode ser classificada em dois tipos principais: convecção forçada e convecção natural. Na convecção forçada, o movimento do fluido é induzido por fontes externas, como ventiladores ou bombas, promovendo uma transferência de calor mais eficiente. Já na convecção natural, o movimento do fluido ocorre devido a diferenças de densidade causadas por variações de temperatura, resultando em correntes

de empuxo que facilitam a transferência de calor (Incropera et al., 2008).

Além disso, a convecção pode ser classificada como interna ou externa: a convecção interna ocorre quando o fluido escoa dentro de dutos ou tubos, enquanto a convecção externa acontece quando o fluido escoa sobre superfícies externas de sólidos (Incropera et al., 2008).

Apesar da complexidade da convecção, a taxa de transferência de calor por esse processo é proporcional à diferença de temperatura e é adequadamente descrita pela Lei do Resfriamento de Newton como:

$$Q = h \cdot A \cdot (\Delta T)$$

Eq.(2)

Onde:

Q = taxa de transferência de calor por convecção (W);

h = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²·°C);

A = área da superfície de troca térmica (m²);

ΔT = diferença de temperatura entre a superfície e o fluido (°C).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

DIMENSIONAMENTO DO RACK E CARGA TÉRMICA

O rack de refrigeração de um girofreezer é um sistema centralizado responsável por gerar e distribuir o frio necessário para congelar os produtos rapidamente. Ele é composto por compressores, condensadores, evaporadores e controles automatizados que garantem uma operação eficiente e estável (Silva, 2019).

Para o dimensionamento desse sistema, é essencial seguir etapas específicas que envolvem o cálculo da carga térmica, a seleção adequada dos equipamentos e a consideração das

condições operacionais, visando atender à demanda térmica do processo de resfriamento ou congelamento (Silva, 2019).

Podemos separar por 3 passos principais, determinação do compressor, separador de óleo e o condensador.

A carga térmica de um sistema representa a quantidade de calor que precisa ser extraída do ambiente refrigerado. Quanto mais baixa for a temperatura exigida no interior do equipamento, maior será o consumo de energia necessário, resultando em uma carga térmica mais elevada. Além das características do produto a ser resfriado, diversos fatores influenciam essa carga, como o tipo e a espessura do isolamento térmico, a presença de componentes internos (motores, ventiladores, luminárias), e a frequência de abertura das portas. O controle adequado desses elementos é fundamental para otimizar o desempenho do sistema e reduzir o consumo energético (Neto et al., 2018).

A escolha do produto, o pão de queijo, e a produção necessária foram definidas com base na demanda do cliente. Esses dados são essenciais para o cálculo da carga térmica, pois determinam a quantidade de produto a ser resfriado, o tempo de processo e as temperaturas de entrada e saída. A capacidade do túnel de resfriamento foi dimensionada considerando tanto as propriedades térmicas do pão de queijo quanto a necessidade de atender à produção contínua e ao volume diário exigido.

Para o cálculo da carga térmica precisa ser levado em consideração vários fatores como o isolamento, o número de níveis presentes no túnel helicoidal, fator de altitude etc.

A carga térmica necessária para o congelamento do pão de queijo foi determinada com o auxílio das equações (3) e (5), conforme descrito.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad \text{Eq.(3)}$$

Onde:

Q = carga térmica (kJ);

m = massa do produto (kg);

c = calor específico (kJ/kg.K);

ΔT = variação de temperatura (°C).

$$Q = m \cdot L \quad \text{Eq.(5)}$$

Q = calor latente (kJ);

m = massa do produto (kg);

L = calor latente específico (kJ/kg);

A carga térmica requerida para o processo em questão será de 125.000kcal/h, para chegar nesse valor foi considerado os seguintes fatores:

- Produto a ser congelado: Pão de queijo (25g);
- Produção requerida: 1.100kg/h;
- Largura total da esteira: 665mm;
- Número de níveis no Girofreezer: 14;
- Altura Interna do túnel: 4.200mm;
- Fator de segurança: 5%;

Considerando que o Pão de queijo possui:

$$\text{Calor específico acima de zero} = 2,93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\text{Calor específico abaixo de zero} = 1,72 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\text{Calor latente} = 239,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Ponto de congelamento} = -2,2^\circ\text{C}$$

Sendo assim a carga térmica total do produto será encontrada através das equações abaixo.

- Resfriamento do produto até o ponto de congelamento:

$$Q_1 = m \cdot c_1 \cdot \Delta T_1 \quad \text{Eq.(3)}$$

$$Q_1 = 1100 \cdot 2,93 \cdot (25 - (-2,2))$$

$$Q_1 = 1100 \cdot 2,93 \cdot 27,2$$

$$Q_1 = 87.665,6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

- Resfriamento do produto congelado até a temperatura final:

$$Q_2 = m \cdot c_2 \cdot \Delta T_2 \quad \text{Eq.(4)}$$

$$Q_2 = 1100 \cdot 1,72 \cdot (-18 - (-2,2))$$

$$Q_2 = 1100 \cdot 1,72 \cdot 15,8$$

$$Q_2 = 29.893,6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

- Calor latente (congelamento do produto):

$$Q_3 = m \cdot L \quad \text{Eq.(5)}$$

$$Q_3 = 1100 \cdot 239,7$$

$$Q_3 = 263.670 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

A partir desses valores é possível encontrar o valor da carga térmica total necessária para congelar 1.100kg/h do produto de 25°C até -18°C.

$$Q_{\text{total, produto}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad \text{Eq.(6)}$$

$$Q_{\text{total, produto}} = 87.665,6 + 29.893,6 + 263.670$$

$$Q_{\text{total, produto}} = 381.229,2 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \text{ ou } 105,89 \text{ kW}$$

Após encontrar a carga térmica total do produto, é possível encontrar a carga térmica total do sistema.

Para isso será necessário considerar alguns pontos importantes como:

A perda térmica no isolamento de um equipamento refere-se à quantidade de calor que atravessa as paredes isoladas de um sistema refrigerado devido à diferença de temperatura entre o ambiente interno (frio) e o ambiente externo (quente).

Mesmo com o uso de materiais isolantes, uma parte do calor externo consegue penetrar no interior do equipamento, resultando em uma carga térmica adicional que o sistema de refrigeração precisa remover.

- Perda térmica no isolamento do equipamento = 2,48kW

A carga térmica dos acionamentos refere-se à quantidade de calor gerada pelos motores, ventiladores, compressores, bombas e outros dispositivos eletromecânicos instalados no interior de um sistema refrigerado. Esse calor é resultado das perdas energéticas dos próprios equipamentos, que transformam parte da energia elétrica consumida em calor dissipado no ambiente interno.

- Carga térmica dos acionamentos = 24,85kW

Para que o produto possa entrar e sair do Girofreezer será necessárias duas aberturas que também acabando influenciando no cálculo de perda de calor.

- Infiltração de ar = 5kW
- Fator de segurança = 5%

Com isso temos:

$$Q_{\text{total}} = (105,89 + 2,48 + 24,85 + 5) \cdot (1,05)$$

$$\text{Eq.(7)}$$

$$Q_{\text{total}} = 145,131 \text{ kW} \text{ ou } 124.790 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

Os valores utilizados para perda térmica no isolamento do equipamento, carga térmica dos acionamentos, infiltração de ar e o fator de segurança foram obtidos a partir de testes e levantamentos anteriores realizados pela própria empresa, com base em experiências práticas de operação de sistemas semelhantes. Por questões de confidencialidade e proteção de informações estratégicas, os detalhes desses cálculos não podem ser destrinchados, sendo considerados parte de dados internos sob sigilo industrial.

FLUIDO REFRIGERANTE

O R-404A é um fluido refrigerante do tipo hidrofluorocarbono (HFC), composto por R-125, R-134a e R-143a. Desenvolvido como substituto do R-502 e do R-22, é amplamente utilizado em sistemas de refrigeração comercial de médias e baixas temperaturas. Suas características o tornam ideal para aplicações como expositores refrigerados, transporte friográfico, máquinas de gelo e outros equipamentos (Freon, 2025).

É um fluido refrigerante não inflamável e de baixa toxicidade, classificado como ASHRAE A1 em termos de segurança. Apresenta propriedades semelhantes aos refrigerantes que substitui, além de possuir potencial zero de degradação da camada de ozônio (ODP). No entanto, seu potencial de aquecimento global (GWP) é de 3920 (Freon, 2025).

COMPRESSOR

O compressor desempenha um papel fundamental no ciclo de refrigeração por compressão de vapor, sendo responsável por captar o gás refrigerante de baixa pressão proveniente dos evaporadores e comprimí-lo, elevando sua pressão e temperatura. Esse processo permite que o refrigerante, agora em alta pressão e temperatura, seja direcionado ao condensador, onde ocorre a dissipação do calor para o ambiente externo. Dessa forma,

o compressor garante a continuidade do ciclo de refrigeração, assegurando o resfriamento eficiente do sistema (Ferraz, 2013).

Para a seleção do compressor ideal para o sistema precisamos começar pela carga térmica requerida para o processo, com base nela podemos selecionar o compressor ideal e a quantidade necessária para que o sistema seja eficiente.

A BITZER, fabricante de compressores, possui um software que auxilia o selecionamento do compressor com base nas informações requeridas para o processo.

Compressor a ser utilizado:

- Marca: BITZER;
- Tipo: Semi-Hermético de Duplo Estágio (Figura 4);

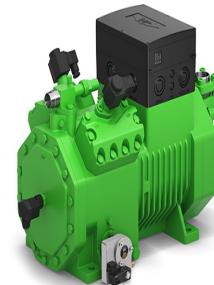


Figura 4 - Compressor Semi-Hermético

Fonte: BITZER (2025)

No software colocamos as informações que temos para começarmos a seleção do compressor ideal.

Valores de entrada:	
Capac. Frigorífica	146,0 kW
Refrigerante	R404A
Temperatura de referência	Ponto de Orvalho
Temp. Evaporação SST	-35,00 °C
Temp. Condensação SDT	45,0 °C
Modo de operação	Com Sub-Resfriador
Superaquecimento do gás Sucção	10,00 K
Superaquecimento útil	6,00 K
Tensão Elétrica	380V-60Hz

Tabela 1 - Valores de entrada do software.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Resultados (1 compressor):		
Compressor	S66F-60.2Y-40P	
Etapas de capacidade	100%	
Capac. Frigorífica	64,1	kW
Capac. Frigorífica *	50,1	kW
Capacidade Evaporador	62,5	kW
Potência absorvida	53,5	kW
Corrente (460V)	75,2	A
Faixa de Tensão	360 - 400V	
Capacidade do Condensador	117,6	kW
COP/EER	1,17	
COP/EER*	0,94	
Vazão em massa LP	1711	kg/h
Vazão em massa HP	2525	kg/h
Pressão intermediária	5,97	bar(a)
Temperatura Média	-0,4	°C
Temp. do líquido	13,67	°C

Tabela 2 - Resultados encontrados no software.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Após chegarmos aos resultados da tabela 2, foi necessário fazer um ajuste no modelo do compressor para que fosse possível alcançar melhores resultados, com isso foi alterado para o compressor S6F-30.2Y-20D.

Resultados (1 compressor):		
Compressor	S6F-30.2Y-20D	
Etapas de capacidade	100%	
Capac. Frigorífica	32,1	kW
Capac. Frigorífica *	25,1	kW
Capacidade Evaporador	31,3	kW
Potência absorvida	26,7	kW
Corrente (380V)	45,5	A
Faixa de Tensão	360 - 400V	
Capacidade do Condensador	58,8	kW
COP/EER	1,17	
COP/EER*	0,94	
Vazão em massa LP	856	kg/h
Vazão em massa HP	1262	kg/h
Pressão intermediária	5,97	bar(a)
Temperatura Média	-0,4	°C

Temp. do líquido	13,67	°C
------------------	-------	----

Tabela 3 - Resultados após o ajuste de modelo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Modelo do compressor definido: S6F-30.2Y-20D.

A carga térmica requerida pelo sistema é de 146kW, cada compressor atende a 32,1kW, ou seja, será necessário a utilização de 5 compressores para suportar a carga requerida.

SEPARADOR DE ÓLEO

O separador de óleo é um componente essencial nos sistemas de refrigeração, projetado para minimizar a quantidade de óleo circulante no circuito. A presença excessiva de óleo no evaporador pode prejudicar a transferência de calor, reduzindo a eficiência térmica do sistema. Além disso, o acúmulo de óleo pode interferir no funcionamento adequado da válvula de expansão, comprometendo o controle preciso do fluxo de refrigerante e, consequentemente, a estabilidade operacional do sistema (Souza, 2009).

No separador, a mistura de óleo e fluido refrigerante quente vindo do compressor entra e atravessa um tubo perfurado. A mistura bate contra a tela onde o óleo geralmente se separa do vapor. O óleo é drenado pela parte inferior da tela para um pequeno reservatório no separador. O vapor passa através da tela e deixa o separador pela parte superior. Quando o nível do óleo sobe no reservatório, a boia do flutuador também sobe e o óleo volta ao compressor através de um orifício. O dimensionamento deve ser feito pela vazão volumétrica do refrigerante no estado superaquecido.

A vazão em massa do sistema, conforme tabela 3, é de 856kg/h, isso considerando apenas um compressor. Como no sistema serão necessários a utilização de 5 compressores, devemos multiplicar esse valor por 5.

$$Q_{total} = Q \cdot n \quad \text{Eq.(8)}$$

Onde:

Q = vazão em massa de um compressor (kg/h);

n = número de compressores que serão necessários;

$$Q_{total} = 856 \cdot 5$$

$$Q_{total} = 4.280 \frac{kg}{h}$$

A temperatura do vapor na entrada do Oil Pack do fluido em questão será utilizada como base 70°C, volume específico do fluido nessa temperatura é de 0,0111/kg.

R404A VAPOR SUPERAQUECIDO - PRESSÃO CONSTANTE		
Temperatura do vapor superaquecido na entrada do Oil Pack °C	Pressão Man. = 15 kgf/cm²	Pressão Man. = 19 kgf/cm²
	Temperatura de saturação (condensação) 35°C	Temperatura de saturação (condensação) 45°C
	Volume Específico (m³/kg)	Volume Específico (m³/kg)
70	0,0149	0,0111
75	0,0153	0,0115
80	0,0157	0,0119
85	0,0161	0,0122
90	0,0165	0,0125
95	0,0168	0,0129
100	0,0172	0,0132
105	0,0176	0,0135
110	0,0179	0,0138
115	0,0182	0,0141

Tabela 4 - Volume específico x Temperatura do Fluido

Fonte – Adaptada de RACBRASIL (2025).

Com esse valor determinado é possível calcular a vazão volumétrica:

$$V_v = V_m \cdot V \quad \text{Eq.(9)}$$

Onde:

Vv = vazão volumétrica (/h);

Vm = vazão em massa total (kg/h);

V = volume específico (/kg);

$$V_v = 4.280 \frac{kg}{h} \cdot 0,0111 \frac{m^3}{kg}$$

$$V_v = 47,508 \frac{m^3}{h}$$

Levando em consideração a temperatura de condensação de -30°C e a vazão volumétrica de 47,508/kg, é possível selecionar o Oil-pack ideal para esse sistema, RAC OILPACK 1.5/8" – 6".

CONDENSADOR

Os condensadores são trocadores de calor nos quais o refrigerante, proveniente do compressor em alta pressão e temperatura, transfere calor para um meio externo, como água ou ar, resultando na mudança de estado do refrigerante de vapor para líquido-condensado.

Esse processo ocorre em três etapas: resfriamento sensível do gás superaquecido, condensação e sub-resfriamento do líquido. A condensação é a etapa predominante, sendo responsável por aproximadamente 83% da rejeição de calor em aplicações normais de refrigeração (Jabardo; Stoecker, 2007).

	R 404A				
	- 40°C	- 30°C	- 10°C	5°C	(m³/h)
RAC OILPACK 7/8" - 4"	22	24	27	29	
CAPAC. MÍNIMA DE FUNCIONAMENTO	7	8	9	10	10
RAC OILPACK 1.1/8" - 4"	26	28	32	34	
CAPAC. MÍNIMA DE FUNCIONAMENTO	9	10	11	12	13
RAC OL PACK 1.1/8" - 4" x 6" VPlus	26	28	32	34	
CAPAC. MÍNIMA DE FUNCIONAMENTO	9	10	11	12	13
RAC OILPACK 1.3/8" - 6"	44	46	51	55	
CAPAC. MÍNIMA DE FUNCIONAMENTO	14	15	17	18	23
RAC OILPACK 1.5/8" - 6"	62	65	74	79	
CAPAC. MÍNIMA DE FUNCIONAMENTO	20	22	24	26	34
RAC OILPACK 2.1/8" - 6"	79	85	91	100	
CAPAC. MÍNIMA DE FUNCIONAMENTO	26	28	30	33	51
RAC OILPACK 2.1/8" - 8,5"	113	123	134	146	
CAPAC. MÍNIMA DE FUNCIONAMENTO	38	41	45	49	63
RAC OILPACK 2.5/8" - 8,5"	154	164	183	198	
CAPAC. MÍNIMA DE FUNCIONAMENTO	51	54	60	65	72
RAC OILPACK 2.5/8" - 11"	230	244	273	296	
CAPAC. MÍNIMA DE FUNCIONAMENTO	77	81	91	99	126
RAC OILPACK 3.1/8" - 11"	314	333	372	405	
CAPAC. MÍNIMA DE FUNCIONAMENTO	104	110	123	134	195

Tabela 5 – Dados para seleção Oilpack.

Fonte: Adaptada de RACBRASIL (2025).



Figura 5 – Condensador modelo VCR.

Fonte: Refrio (2025).

Dessuperaquecimento e Condensação

O dessuperaquecimento é a primeira etapa do processo de condensação em sistemas de refrigeração. Após ser comprimido, o refrigerante sai do compressor em estado de vapor superaquecido, ou seja, a uma temperatura superior à sua temperatura de condensação (Silva, 2012).

O objetivo do dessuperaquecimento é reduzir essa temperatura, removendo o calor sensível do refrigerante ainda no estado gasoso, até que ele atinja a temperatura de saturação, ponto em que começa a condensar. Esse processo é fundamental para garantir a eficiência do ciclo de refrigeração e proteger os componentes do sistema contra temperaturas excessivas (Silva, 2012).

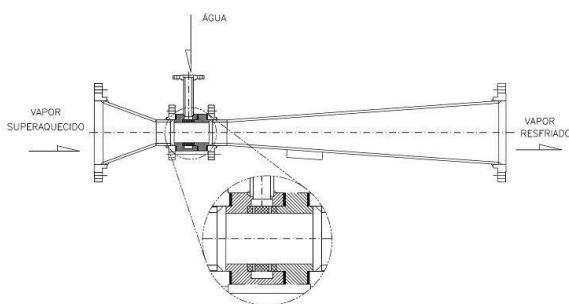


Figura 6 - Processo de dessuperaquecimento

Fonte - Vácuo Industrial (2025)

Quando o refrigerante atinge a temperatura de condensação, inicia-se o processo de mudança de fase, no qual o calor latente é removido do fluido. Durante essa etapa, a temperatura do refrigerante permanece constante até que toda a substância passe do estado gasoso para o líquido. Esse fenômeno é fundamental para a eficiência do ciclo de refrigeração, pois garante a liberação de energia térmica necessária para a liquefação completa do refrigerante (Jabardo; Stoecker, 2007).

Sub-Resfriamento

Após a condensação do refrigerante, agora no estado líquido (líquido saturado), é resfriado mais alguns graus, em torno de 4 a 5K. Essa técnica é essencial para garantir que o refrigerante permaneça em estado líquido até entrar no dispositivo de expansão, evitando a presença de vapor.

Será utilizado o fator de correção de altitude de 300m acima do nível do mar. Esse valor de altitude foi considerado devido ao Brasil estar a uma altitude média de aproximadamente 368m acima do nível do mar;

O fator de correção de altitude para a altitude considerada será de 0,98 e o fator de conversão do fluido para o fluido em questão, R-404A, é de 0,98 (dados retirados dos catálogos da Heatcraft Compressores).

Para a seleção do condensador ideal para atender os requisitos necessários pode ser utilizado a fórmula abaixo para o cálculo da capacidade do condensador:

$$Q_{cond.} = Q_{rej.} \cdot \frac{\Delta T 1}{\Delta T 2} \cdot \frac{1}{fr} \cdot \frac{1}{fa} \quad \text{Eq.(10)}$$

Onde:

$Q_{cond.}$ = capacidade de condensação (kW);

$Q_{rej.}$ = calor rejeitado (kW);

$\Delta T 1$ = variação de temperatura indicado no catálogo do fornecedor (K);

$\Delta T 2$ = variação de temperatura desejado (K);

fr = fator refrigerante;

fa = fator altitude;

$$Q_{cond.} = 146 \times \left(\frac{10}{5}\right) \times \left(\frac{1}{0,98}\right) \times \left(\frac{1}{0,98}\right)$$

$$Q_{cond.} = 146 \times 2 \times 1,0204 \times 1,0204$$

$$Q_{cond.} = 303,99 \text{ kW}$$

Levando em consideração o valor da capacidade de condensação encontrada, o condensador selecionado foi o VCR 276AC804.

Condensador VCR 276AC804	
Capacidade Máx.	320,4 kW
Corrente a 380V	15,28A
Vazão de ar	93.000 m ³ /h
Pressão sonora (10m)	54 dB(A)

Tabela 6 - Informações técnicas condensador.

Fonte: Adaptado catálogo Refrio (2025).

ANÁLISE DOS RESULTADOS

ANÁLISE DOS DADOS

Com base nos dados levantados e nas necessidades térmicas do processo de congelamento de 1.100 kg/h de pão de queijo, foi possível dimensionar os principais componentes do sistema de refrigeração do Girofreezer.

Ressalta-se que o sistema proposto não foi fisicamente implementado, sendo este estudo de caráter teórico. Os cálculos, dimensionamentos e seleções de equipamentos foram realizados com base em parâmetros técnicos, normas da engenharia térmica, catálogos de fabricantes, além de estudos correlatos e projetos anteriores já executados pela empresa. Dessa forma, assegura-se que o projeto é tecnicamente viável e condizente com a realidade operacional, caso venha a ser executado futu-

ramente.

A carga térmica total do sistema foi estimada em 146 kW, já considerando perdas por isolamento, acionamentos, infiltração de ar e o fator de segurança. Com base nessa carga, foram selecionados cinco compressores do modelo BITZER S6F-30.2Y-20D, cada um com capacidade frigorífica de 32,1 kW, totalizando 160,5 kW de capacidade instalada, garantindo assim uma margem segura de operação.

Para o sistema de retorno de óleo, foi dimensionado o separador RAC OILPACK 1.5/8" - 6", com base na vazão volumétrica do fluido refrigerante (47,5 m³/h) e nas condições de operação do sistema. A escolha visa garantir a eficiência do ciclo e proteger os evaporadores de contaminação por óleo.

O condensador selecionado foi o modelo VCR 276AC804, com capacidade máxima de 320,4 kW, adequado à necessidade de 303,9 kW obtida após os ajustes de correção por fluido refrigerante (R-404A) e altitude (300 m). Este equipamento atende com folga a carga de rejeição térmica do sistema, assegurando bom desempenho mesmo em condições adversas.

A seleção dos componentes foi feita com base em dados técnicos confiáveis de fabricantes, garantindo que o sistema proposto opera dentro dos parâmetros ideais de desempenho e segurança. Com isso, é possível afirmar que o dimensionamento apresentado é tecnicamente viável e adequado às exigências do processo de congelamento industrial do produto estudado.

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DURANTE O CONGELAMENTO

A abaixo (Figura 7) apresenta um gráfico de temperatura em função do tempo obtido a partir de testes práticos realizados com um equipamento similar ao projetado neste trabalho.

Embora não represente exatamente o túnel dimensionado, o gráfico serve como referência para ilustrar o comportamento térmico típico de um sistema Girofreezer em operação, demonstrando o tempo necessário para atingir a faixa de congelamento recomendada. A análise permite observar a tendência de estabilização térmica e reforça a importância de um controle preciso das variáveis operacionais.

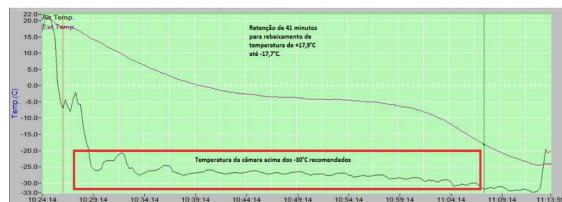


Figura 7 - Gráfico Temperatura x Tempo Congelamento.

Fonte: Testes práticos elaborado pelo autor.

A curva de temperatura do produto evidencia uma redução da temperatura inicial de +17,9 °C para -17,7 °C, temperatura final, em um intervalo de 41 minutos, caracterizando a fase de remoção de calor sensível seguida da extração do calor latente de solidificação. Essa etapa é crítica no processo, pois influencia diretamente na formação de cristais de gelo e, portanto, na preservação da textura e qualidade do alimento após o descongelamento.

É possível observar que, ao se aproximar de seu ponto de congelamento (aproximadamente -2,2 °C) o produto permanece por um intervalo de tempo com a temperatura praticamente constante. Esse comportamento é característico do processo de transição de fase, no qual a energia térmica retirada do sistema é utilizada predominantemente na remoção do calor latente de fusão, sem que haja variação significativa de temperatura. Esse patamar térmico, comumente denominado de «mesa térmica», persiste até que a totalidade da água livre do produto congele, permitindo a posterior continuidade da redução da temperatura.

Adicionalmente, observa-se que a temperatura da câmara de congelamento permaneceu majoritariamente acima dos -30 °C recomendados, conforme destacado na área delimitada em vermelho no gráfico. Esse comportamento sugere um possível subdimensionamento do sistema de refrigeração, insuficiência de troca térmica, ou variações operacionais (como aberturas de porta ou carga térmica excessiva) que limitaram o desempenho térmico do ambiente.

A estabilização da temperatura da câmara em torno de -22 °C a -25 °C pode ter comprometido a eficiência do congelamento rápido, resultando em tempos maiores de ciclo e possível deterioração da qualidade do produto em longos períodos de armazenamento.

Por fim, a elevação térmica observada nos minutos finais pode estar associada a ciclos de degelo automático, interrupções momentâneas do compressor ou influência externa (como abertura de porta), sendo esse comportamento relevante para avaliações de estabilidade térmica e eficiência energética do sistema.

ANÁLISE COMPARATIVA COM ESTUDO CORRELATO DE DIMENSIONAMENTO TÉRMICO

Um estudo correlato realizado por Oliveira Junior (2022) abordou o levantamento da carga térmica e a avaliação da capacidade de refrigeração em uma planta industrial de alimentos congelados, cujo principal produto também era o pão de queijo. Apesar de o objetivo do trabalho citado ser a análise de desempenho de uma instalação existente, e o presente estudo ter foco no dimensionamento projetado de um sistema novo para um Girofreezer, diversos parâmetros coincidem e permitem uma comparação técnica relevante.

No estudo de Oliveira Junior (2022), a carga térmica total do processo foi estimada em 91,55 kW para congelamento de 940 kg por lote, distribuídos ao longo de 16 horas diárias

de operação. Já no presente trabalho, o sistema foi dimensionado para uma operação contínua de 1.100 kg/h, com carga térmica total calculada em 146 kW, incluindo perdas por isolamento, acionamentos, infiltração de ar e aplicação de fator de segurança.

Enquanto o sistema existente analisado por Oliveira Junior (2022) operava com três compressores BITZER 6FE-44Y, totalizando cerca de 147 kW de capacidade de refrigeração, este estudo definiu o uso de cinco compressores BITZER S6F-30.2Y-20D, cada um com 32,1 kW, totalizando 160,5 kW, o que representa um superdimensionamento intencional para maior robustez e estabilidade térmica.

Destaca-se também que, enquanto o túnel analisado por Oliveira Junior (2022) operava a -30 °C estáveis, com controle por lotes e tempo de congelamento pré-definido, o sistema projetado neste trabalho evidenciou flutuações térmicas internas entre -22 °C e -25 °C, o que pode estar associado à operação contínua, ausência de buffer térmico ou necessidade de ajustes em ventilação e distribuição de ar.

Ambos os trabalhos utilizaram o fluido refrigerante R-404A, e adotaram premissas fundamentadas na literatura técnica e em softwares de simulação. Oliveira Junior empregou o Coolpack para analisar cenários operacionais e simular o COP, obtendo valores entre 1,27 e 1,78, enquanto este estudo baseou-se nas condições de operação fornecidas pelo software da BITZER, com foco na seleção e capacidade dos componentes.

A comparação entre os dois estudos permite concluir que, embora os regimes de operação e as abordagens sejam distintos, os valores estimados de carga térmica e as estratégias de seleção de equipamentos são coerentes entre si. Isso reforça a confiabilidade do modelo de dimensionamento adotado neste trabalho, evidenciando sua adequação técnica para atender à demanda de congelamento contínuo em aplicações industriais de alta produtividade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo dimensionar um rack de refrigeração para um túnel helicoidal (Girofreezer), destinado ao congelamento contínuo de pão de queijo em escala industrial.

A metodologia empregada garantiu coerência técnica e viabilidade prática, sendo possível observar que o sistema projetado atende com folga a demanda térmica do processo. A análise do comportamento térmico do produto durante o congelamento demonstrou a ocorrência da transição de fase com formação da “mesa térmica”, e indicou oscilações na câmara que sugerem ajustes futuros na ventilação ou controle de temperatura.

A comparação com o estudo de Oliveira Junior (2022) reforçou a consistência do dimensionamento adotado. Apesar das diferenças entre os regimes operacionais (contínuo x em lotes), os valores de carga térmica e as escolhas dos componentes foram compatíveis.

Como sugestões para trabalhos futuros, destaca-se a importância da validação do sistema projetado por meio de protótipos reais ou simulações experimentais, de modo a verificar o desempenho prático frente às condições operacionais estimadas.

Recomenda-se também a avaliação do desempenho energético do sistema em diferentes regimes operacionais, o que pode contribuir para otimizações no consumo e na eficiência do processo.

Além disso, o estudo da aplicação de diferentes fluidos refrigerantes pode revelar alternativas mais sustentáveis ou economicamente vantajosas, ampliando a aplicabilidade do projeto em distintos contextos industriais.

REFERÊNCIAS

ASHRAE. *ASHRAE Handbook: Refrigeration*. SI Edition. Atlanta: ASHRAE, 2018.

BARBOSA, Beatriz Duque. *Revalidação de parâmetros operacionais em túnel de congelação*. 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Segurança Alimentar) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2018.

BITZER. *Compressores alternativos*. Disponível em: <https://www.bitzer.de/br/pt-br/compressores-alternativos/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

BRUSINOX. *GiroFreezer: túnel helicoidal de congelamento*. Disponível em: <https://www.brusinox.com.br/girofreezer/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Heat and mass transfer: fundamentals and applications**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2011. cap. 17, p. 17-1 – 17-48.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Tradução de Fátima A. M. Lino. Porto Alegre: AMGH Editora, 2012.

COSTA, Énnio Cruz da. **Refrigeração**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982. 1. reimpressão, 1986.

DEMPSEY, Patrick; BANSAL, Pradeep. **Air Blast Freezers and Their Significance to Food Freezing. A Review**. In: 13th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), Uberlândia, MG, 2010.

DOSSAT, Roy J. **Princípios de Refrigeração**. 4. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2004.

FERRAZ, A. A. *Ciclos de Refrigeração*. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, n.16, p. 2878-2883, 2013.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JABARDO, Paulo José; STOECKER, Wilbert F. **Refrigeração Industrial**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007.

LEITÃO, Bruno Miguel Rodrigues. *Equipamentos de congelação industrial de produtos alimentares perecíveis: análise comparada de apoio à decisão*. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2015.

NETO, I. DE M. N. et al. **Roteiro técnico para cálculo da carga térmica em câmaras frigoríficas utilizadas em estabelecimentos comerciais**. p. 21, 2018.

NTSQUARE. **IQF frozen bread dough by spiral freezer – Square Technology**. Disponível em: <https://en.ntsquare.com/pt/congelador-em-espiral/iqf-frozen-bread-dough-by-spiral-freezer-square-technology>

OLIVEIRA JUNIOR, Baltazar Flavio de. **Levantamento da carga térmica e capacidade de refrigeração de uma indústria de alimentos congelados**. 2022. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Santa Catarina, Xanxeré, 2022.

RAPIN, P. **Manual do Frio : fórmulas técnicas de refrigeração e arcondicionado**. 8. ed. São Paulo: Hemus, 2001.

REFRIO COILS & COOLERS. **Condensador frigorífico VCR**. Disponível em: <https://www.refrio.com/condensadorfrigor%C3%ADficoVCR/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SILVA, Bruno Ordonio Praeiro. **Dimensionamento e seleção de equipamentos para um sistema de refrigeração de um supermercado utilizando fluidos refrigerantes naturais**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2019.

SILVA, J. R. da. **Sistemas de Refrigeração: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Editora Técnica, 2012.

SINGH, R. Paul; HELDMAN, Dennis R. **Introduction to Food Engineering**. 4. ed. Amsterdam: Academic Press, 2009.

SOUZA, A. C. **Manual de Refrigeração e Ar Condicionado**. São Paulo: Editora Técnica, 2009.

VÁCUO INDUSTRIAL. **Dessuperaquecedores**, Disponível em: <https://www.vacuoindustrial.com.br/dessuperaquecedores>. Acesso em: 10 jul. 2025.