

28, 29 e 30
de Outubro



XVI SENPEX

Inclusão e Diversidade Científica:
Democratizando o Conhecimento

SIMULAÇÃO DO CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA: UMA FERRAMENTA EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Engenharia e Tecnologia

**Alan Andrade Firmiano; Bruno Mendes dos Santos¹; Dimas Ailton Rocha;
Guilherme Cancelier dos Santos; Hiago König Benedet; Josué Alberton;
Solange Vandresen**

¹Engenharia mecânica. Centro Universitário Barriga Verde (Unibave).
e-mail: brunosm.bmds@gmail.com

Resumo: O trabalho teve como objetivo geral desenvolver uma ferramenta em Microsoft® Excel® para o cálculo da carga térmica em sistemas de refrigeração, oferecendo uma alternativa prática e acessível em comparação a softwares comerciais. Como objetivos específicos, buscou-se revisar bibliograficamente os métodos de cálculo e estruturar logicamente os procedimentos em planilha. A metodologia, de caráter descritivo, baseou-se em ampla revisão de literatura e análise de documentos técnicos de fontes confiáveis, como Google Acadêmico, Scielo e bibliotecas virtuais, com seleção criteriosa de artigos atualizados. Os resultados demonstraram que a ferramenta reduziu significativamente o tempo de cálculo, sem comprometer a precisão, apresentando valores similares aos obtidos em softwares especializados, como Danfoss®, Mipal® e Elgin®. Além disso, mostrou-se eficaz em evitar erros de superdimensionamento ou subdimensionamento, problemas que afetam a eficiência e os custos. Assim, a ferramenta contribui para otimização energética, redução de custos operacionais e maior competitividade das empresas.

Palavras-chave: câmara frigorífica; carga térmica; congelamento; refrigeração.

Introdução:

A importância da refrigeração é inegável em diversos setores, incluindo os industriais, comerciais e residenciais, onde desempenha um papel fundamental na preservação de alimentos, controle climático e processamento industrial. Estudos

como os de Tizzei et al. (2011) destacam a relevância do processo de armazenagem na agricultura, evidenciando que a redução da temperatura pode significativamente prolongar a vida útil dos produtos, diminuindo o metabolismo em até metade a cada 10 graus de resfriamento.

Para Ferreira (2017) existe os riscos causados pelo resfriamento excessivo, que pode levar a efeitos indesejáveis como o escurecimento de cascas. Assim, o cálculo de carga térmica emerge como um processo essencial para o dimensionamento adequado de sistemas de refrigeração, garantindo não apenas eficiência energética, mas também o desempenho otimizado e a preservação da qualidade dos produtos (Ferreira, 2017; Tizzei et al., 2011).

De acordo com a pesquisa realizada por Lima (2023), a carga térmica de uma câmara frigorífica compreende a avaliação de todas as formas de energia térmica provenientes de diversas fontes de calor. Essas fontes incluem infiltração de calor pelas portas e vãos; penetração de calor externo pela parede, teto e piso; calor dos produtos armazenados; iluminação; motores, podendo dividir entre motores de equipamentos diversos e os motores dos evaporadores; entre outras de menor impacto.

A consideração cuidadosa das variáveis de carga térmica permite o dimensionamento preciso dos equipamentos de refrigeração, atendendo às demandas específicas, como as de um túnel de congelamento, por exemplo. Neste caso, a precisão do dimensionamento é crucial para assegurar que o processo de congelamento seja uniforme e eficiente, influenciando diretamente a eficiência energética e reduzindo as perdas. Isso, por sua vez, aumenta a competitividade da empresa ao garantir a qualidade constante dos produtos congelados, beneficiando a indústria em termos de custos operacionais e posicionamento no mercado (Oliveira, 2021).

Para calcular o dimensionamento adequado de um ambiente que requer remoção de calor é essencial considerar todas essas cargas, sendo que cada uma delas necessita de uma fórmula específica para obter o melhor resultado. Além disso, é necessário levar em conta diversas variáveis, como temperatura, carta psicrométrica, características do produto e, não menos importante, o tipo de isolamento térmico (Lima, 2023).

Para a obtenção do valor da carga térmica é evidente que pode haver dificuldade e falta de agilidade na realização desses cálculos de maneira manual, além

do potencial desgaste físico e a probabilidade de ocorrerem erros humanos. Nesse contexto, surge uma clara necessidade de ferramentas que facilitem e acelerem esse processo, permitindo que os profissionais dediquem mais tempo a atividades estratégicas e menos a tarefas operacionais de menor valor agregado.

Santos (2023) ressalta que o Excel® pode desempenhar um papel fundamental nesse cenário, proporcionando automação, agilidade e redução de erros nos processos industriais. Através da utilização de fórmulas personalizadas, funções avançadas e recursos de visualização de dados, o Excel® possibilita a criação de planilhas automatizadas que simplificam e otimizam a realização de cálculos complexos, como os relacionados à carga térmica, tornando todo o processo mais eficiente e confiável.

Com a intenção de aprimorar continuamente os processos e buscar resultados mais eficientes, muitas empresas estão investindo em novos métodos tendo em vista reduzir o tempo das tarefas e diminuir os custos operacionais. Por isso, ao implementar esta ferramenta para cálculo de carga térmica, as empresas de refrigeração poderão otimizar seus processos, aumentar a produtividade e alcançar uma melhor eficiência operacional, resultando em benefícios econômicos. Ainda assim, as empresas comprometidas com a melhoria contínua estão posicionadas para se adaptar às mudanças do mercado e responder rapidamente às necessidades dos clientes, garantindo um desempenho a longo prazo (Meneghini; Bulgarelli, 2022).

Empresas de pequeno e médio porte frequentemente enfrentam desafios adicionais devido à limitação de recursos e tempo. Além disso, a falta de ferramentas automatizadas acessíveis e eficazes para o cálculo de carga térmica pode resultar em projetos subdimensionados ou superdimensionados, impactando negativamente a eficiência energética e os custos operacionais. Consequentemente, surge a necessidade de uma solução que simplifique esse processo, garantindo precisão e agilidade, ao mesmo tempo em que minimiza a possibilidade de erros humanos (Meneghini; Bulgarelli, 2022).

Sendo assim, o projeto proposto é altamente relevante tanto em termos técnicos quanto econômicos no setor de refrigeração industrial. Silva (2015) afirma:

O estado do produto, desde a matéria-prima ao produto acabado, a manipulação e o método de arrefecimento ou congelamento implementado vão ter influência na sua qualidade quando este chega ao consumidor final (Silva, 2015).

Considerando-se a contextualização apresentada, o presente trabalho pretende responder como a simulação do cálculo da carga térmica pode ser utilizada para otimizar o dimensionamento de sistemas de refrigeração em ambientes comerciais e industriais, considerando diferentes variáveis como temperatura ambiente, tipo de isolamento térmico, características dos produtos armazenados e eficiência energética?

Desenvolver uma ferramenta para simulação do cálculo da carga térmica em sistemas de refrigeração é essencial para atender às necessidades de empresas de pequeno a médio porte que buscam eficiência operacional e econômica. Como o processo de dimensionamento de sistemas de refrigeração pode ser complexo e demorado, justifica-se a implementação de uma ferramenta para simulação do cálculo da carga térmica não apenas para modernizar os processos de planejamento e projeto, mas também para fortalecer a competitividade das empresas ao oferecer soluções eficientes para suas necessidades em sistemas de refrigeração.

O objetivo geral do estudo foi desenvolver uma ferramenta para simulação do cálculo da carga térmica em sistemas de refrigeração. Como o dimensionamento adequado de sistemas de refrigeração proporciona o correto funcionamento em ambientes que dependem de climatização controlada, os objetivos específicos do trabalho foram realizar uma revisão bibliográfica dos métodos de cálculo da carga térmica, buscando identificar as variáveis e parâmetros relevantes, bem como desenvolver a estrutura lógica dos cálculos em uma planilha do *software* Microsoft® Office® Excel®.

Procedimentos Metodológicos

Métodos de pesquisa

Conforme abordam Ferrer e Dias (2023), a pesquisa quantitativa é conduzida com base na análise de dados numéricos. Ela possui um caráter descritivo e imparcial, destacando-se pela objetividade na coleta e análise de dados. Por outro lado, a pesquisa qualitativa se concentra na compreensão da qualidade dos fenômenos, buscando compreender a essência dos fenômenos estudados, explorando as perspectivas e experiências.

Deste modo, é evidente que a pesquisa adota uma abordagem mista, combinando métodos quantitativos e qualitativos para alcançar uma compreensão

abrangente da carga térmica em sistemas de refrigeração. A parte quantitativa envolverá cálculos detalhados e o uso de fórmulas específicas para determinar a carga térmica, enquanto a parte qualitativa discutirá a importância da refrigeração em diversos setores e seus impactos econômicos.

Assim, conforme Raupp e Beuren (2006), a pesquisa descritiva é entendida como um ponto intermediário entre a pesquisa exploratória e explicativa, não sendo tão aprofundada quanto a última e nem tão preliminar quanto a primeira. Além disso, a pesquisa descritiva se baseia na análise das características e relações entre suas variáveis. Portanto, com base nesses princípios, o estudo será classificado como descritivo, com o propósito de detalhar os processos subjacentes que determinam a carga térmica. Os métodos de coleta de dados envolveram pesquisa bibliográfica e análise documental para reunir informações relevantes sobre o tema.

A coleta de dados foi realizada principalmente por meio de pesquisa bibliográfica e análise documental. Foram buscadas as informações em sites confiáveis como Google Acadêmico, Scielo e bibliotecas virtuais de universidades federais e privadas para reunir informações relevantes e atualizadas sobre o cálculo de carga térmica. As palavras-chaves foram pesquisadas para cada etapa do artigo, como por exemplo: carga térmica; túnel de congelamento; câmara de congelados; planilha de cálculo; automação de planilha; câmara frigorífica; cálculo de carga térmica; entre outras. A análise e seleção dos dados coletados foi conduzida por meio da leitura direta do resumo das obras, análise do sumário, análise das fórmulas utilizadas, busca por palavras-chaves e leitura completa do texto.

Desenvolvimento da ferramenta

Com base nas fórmulas já estabelecidas, foi possível identificar todos os parâmetros necessários para garantir a aplicação correta e precisa no cálculo da carga térmica. A partir dessas definições, foi criada uma planilha estruturada em formato de questionário (Figura 1), onde estão reunidos campos importantes para o preenchimento. Os dados inseridos, são automaticamente conectados a outra planilha, responsável por realizar os cálculos. No questionário, as células em amarelo indicam as áreas onde os parâmetros podem ser alterados ou preenchidos, facilitando ainda mais a interação com a ferramenta.

Figura 1 - Questionário para coleta de dados.

CONDIÇÕES DA CÂMARA	
<i>Temperatura Interna Desejada</i>	-20°C
<i>Largura</i>	5,00 m
<i>Comprimento</i>	5,00 m
<i>Altura</i>	3,00 m
<i>Dimensões</i>	Internas

ISOLAMENTO DAS PAREDES	
<i>Isolamento</i>	PIR
<i>Espessura</i>	100 mm
<i>Temperatura Externa</i>	35°C

ISOLAMENTO DO TETO	
<i>Isolamento</i>	PIR
<i>Espessura</i>	100 mm
<i>Temperatura Externa</i>	35°C

ISOLAMENTO DO PISO	
<i>Piso Isolado</i>	Sim
<i>Isolamento do Piso</i>	EPS
<i>Espessura do Isolamento</i>	100 mm
<i>Temperatura embaixo do Piso</i>	10°C

PRODUTOS	
<i>Produto</i>	Sorvete
<i>Massa de Produto (Estoque)</i>	20.000 kg
<i>Massa de Produto por Processo</i>	4.000 kg
<i>Temperatura de Entrada do Produto</i>	-15°C
<i>Temperatura de Saída do Produto</i>	-20°C
<i>Tempo de Retenção</i>	14,00 h

INFILTRAÇÃO DE AR	
<i>Temperatura do Ar de Entrada</i>	35°C
<i>Umidade Relativa (Externa)</i>	70%
<i>Quantidade de Portas</i>	1 portas
<i>Altura do Vão da Porta</i>	2,10 m
<i>Largura do Vão da Porta</i>	1,00 m
<i>Tempo de Abertura da Porta</i>	1,00 h

CARGAS ADICIONAIS	
<i>Equipamentos</i>	3 cv
<i>Tempo de Equipamento por dia</i>	2,00 h
<i>Pessoas</i>	1 pessoas
<i>Tempo de Trabalho</i>	2 h
<i>Margem de Segurança</i>	0%

CONDIÇÕES DA CÂMARA	
<i>Tipo de Degelo</i>	Elétrico ou Gás Quente
<i>Tempo Total de Degelo</i>	2,00 h
<i>Tempo de Refrigeração</i>	12,00 h
<i>Processo</i>	Baixa Umidade
<i>Eventual Recuperação de Frio</i>	Não
<i>Umidade Relativa</i>	70%

Fonte: Autores, 2025.

A partir deste questionário, foi desenvolvida uma base de dados que reúne as principais propriedades térmicas e físicas dos produtos (Figura 2), como seus pontos de congelamento, calores específicos e outras características relevantes para o cálculo de câmaras frigoríficas.

Figura 2 - Base de dados dos produtos.

PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS PRODUTOS				
Categoria	PONTO DE CONGELAMENTO	CALOR ESPECÍFICO		CALOR LATENTE
		ANTES DO CONGELAMENTO	DEPOIS DO CONGELAMENTO	
Bebida	-2°C	0,94 kcal/kg.K	0,49 kcal/kg.K	75 kcal/kg
Laticínio	-1°C	0,84 kcal/kg.K	0,43 kcal/kg.K	64 kcal/kg
FLV	-1°C	0,88 kcal/kg.K	0,46 kcal/kg.K	66 kcal/kg
Carne bovina	-2°C	0,78 kcal/kg.K	0,44 kcal/kg.K	58 kcal/kg
Carne suína	-3°C	0,69 kcal/kg.K	0,42 kcal/kg.K	43 kcal/kg
Frango	-3°C	0,67 kcal/kg.K	0,38 kcal/kg.K	63 kcal/kg
Congelado	-2°C	0,78 kcal/kg.K	0,42 kcal/kg.K	57 kcal/kg
Massa	-2°C	0,60 kcal/kg.K	0,47 kcal/kg.K	50 kcal/kg
Sorvete	-6°C	0,70 kcal/kg.K	0,39 kcal/kg.K	48 kcal/kg

Fonte: Adaptado de Heatcraft, [s.d.].

Além disso, foi considerada a carta psicrométrica (Figura 3) e as propriedades dos materiais isolantes (Figura 4). Também foi criada uma lista de dados para facilitar a validação de campos específicos nos questionários, apresentando as opções em formato de lista para simplificar a entrada de informações e garantir consistência nos resultados. As imagens anexas ilustram essa base de dados.

Figura 3 - Carta psicrométrica.

TABELA DE VALORES PSICROMETRICOS PARA CÂMARAS FRIGORÍFICAS										
TEMP	UMIDADE RELATIVA									
	50%		60%		70%		80%		90%	
	<i>h</i>	<i>γ</i>	<i>h</i>	<i>γ</i>	<i>h</i>	<i>γ</i>	<i>h</i>	<i>γ</i>	<i>h</i>	<i>γ</i>
35°C	19,49	0,90	21,54	0,90	23,82	0,91	26,12	0,91	28,46	0,92
32°C	16,83	0,89	18,71	0,89	20,61	0,89	22,67	0,90	24,47	0,90
30°C	15,37	0,88	17,00	0,88	18,68	0,88	20,37	0,89	22,09	0,89
25°C	12,29	0,86	13,50	0,86	14,84	0,86	16,13	0,87	17,45	0,87
20°C	9,20	0,84	10,00	0,84	10,99	0,84	11,89	0,85	12,80	0,85
15°C	6,94	0,82	7,57	0,83	8,30	0,83	8,98	0,82	9,66	0,83
10°C	4,68	0,81	5,14	0,81	5,60	0,81	6,06	0,80	6,52	0,81
5°C	2,81	0,79	3,13	0,79	3,46	0,79	3,78	0,79	4,11	0,79
1°C	1,45	0,78	1,69	0,78	1,93	0,78	2,17	0,78	2,42	0,78
-5°C	-0,46	0,76	-0,32	0,76	-0,16	0,76	-0,02	0,76	0,12	0,76
-10°C	-1,92	0,75	-1,83	0,75	-1,73	0,75	-1,64	0,75	-1,54	0,75
-15°C	-3,27	0,73	-3,20	0,73	-3,14	0,73	-3,07	0,73	-3,00	0,73
-20°C	-4,61	0,72	-4,57	0,72	-4,54	0,72	-4,50	0,72	-4,46	0,72
-25°C	-5,87	0,70	-5,85	0,70	-5,82	0,70	-5,80	0,70	-5,77	0,70
-30°C	-7,13	0,69	-7,12	0,69	-7,10	0,69	-7,09	0,69	-7,08	0,69
-35°C	-8,53	0,67	-8,56	0,67	-8,59	0,67	-8,61	0,67	-8,64	0,67
-40°C	-9,86	0,66	-9,91	0,66	-9,97	0,66	-10,02	0,66	-10,07	0,66

Fonte: Adaptado de Heatcraft, [s.d.].

Figura 4 - Base de dados dos isolantes

MATERIAIS E ISOLANTES		
ISOLANTE	CONDUTIVIDADE TÉRMICA	
PIR	0,022 W/m.k	0,019 kcal/m.k
EPS	0,036 W/m.k	0,031 kcal/m.k
CONCRETO	1,750 W/m.k	1,505 kcal/m.k

Fonte: Adaptado de Kingspan Isoeste (2019); ABNT Projeto 02:135.07-001/2 (2003).

Cada etapa do cálculo é realizada de forma separada (Figura 5), com as fórmulas inseridas em diferentes células no Excel®. Por exemplo, o cálculo da carga térmica referente à transferência de calor pelas paredes foi desenvolvido de forma independente do cálculo da transferência de calor do produto em movimento, assim como os demais cálculos foram tratados individualmente, seguindo o mesmo princípio de separação e precisão. Dessa forma, foi possível organizar e realizar cada uma dessas contas de maneira clara e ordenada, como descrito ao longo deste trabalho.

Figura 5 - Área de aplicação automática dos cálculos.

CARGA TÉRMICA DE PENETRAÇÃO PELAS PAREDES			
Variável	Descrição	Grandeza	Área de Cálculo
Qppa	Carga térmica por penetração pelas paredes	kcal/dia	Qp = 15.281 kcal/dia
Sparedes	Superfície total das paredes	m ²	61,20 m ²
Ki	Condutividade térmica do material isolante	kcal/h.m°C	0,019 kcal/m.k
ei	Espessura do material isolante	m	0,10 m
te	Temperatura externa	K	308 K
ti	Temperatura Interna	K	253 K

CARGA TÉRMICA DE PENETRAÇÃO PELO TETO			
Variável	Descrição	Grandeza	Área de Cálculo
Qpte	Carga térmica por penetração pelo teto	kcal/dia	Qp = 6.242 kcal/dia
Steto	Superfície total do teto	m ²	25 m ²
Ki	Condutividade térmica do material isolante	kcal/h.m°C	0,019 kcal/m.k
ei	Espessura do material isolante	m	0,10 m
te	Temperatura externa	K	308 K
ti	Temperatura Interna	K	253 K

CARGA TÉRMICA DE PENETRAÇÃO DO PISO			
Variável	Descrição	Grandeza	Área de Cálculo
Qppi	Carga térmica por penetração pelo piso	kcal/dia	Qp = 5.219 kcal/dia
Spiso	Superfície total do piso	m ²	25 m ²
Ki (Isolamento)	Condutividade térmica do material	kcal/h.m.K	0,031 kcal/m.k
Ki (Concreto)	Condutividade térmica do material	kcal/h.m.K	0,688 kcal/m.k
ei	Espessura do material isolante	m	0,10 m
te	Temperatura externa	K	283 K
ti	Temperatura Interna	K	253 K

INFILTRAÇÃO DE AR			
Variável	Descrição	Grandeza	Área de Cálculo
Qa	Carga térmica pela infiltração de ar	kcal/dia	Qa = 1.405 kcal/dia
n	Índice de renovação do ar externo	renovações/h	n = 0,73
p	Quantidade de Portas	nº	1
Sp	Superfície do vão livre de cada porta	m ²	2,1
tp	Tempo de abertura de cada porta por dia	h	1
V	Volume do ambiente	m ³	75
He	Entalpia do ar externo	kcal/kg	23,82
Hi	Entalpia do ar Interno	kcal/kg	-4,540
(ye)	Peso específico do ar externo	kg/m ³	0,9082

CARGA TÉRMICA DOS EQUIPAMENTOS			
Variável	Descrição	Grandeza	Área de Cálculo
Qe	Carga térmica dos equipamentos	kcal/dia	Qe = 5.056 kcal/dia
Pmot	Potência dissipada pelos equipamentos	cv	3
632	Conversão de cv para kcal/h		632
η mot	Rendimento do motor	%	75%
t	Tempo que os equipamentos irão funcionar	h	2

CARGA TÉRMICA DOS MOTORES DOS EVAPORADORES			
Variável	Descrição	Grandeza	Área de Cálculo
Qm	Carga térmica dos motores dos evaporadores	kcal/dia	Qm = 10.112 kcal/dia
Pmot	Potência total instalada dos motores dos evaporadores	cv	1cv
3023,95	Conversão de kcal/h para TR		3023,95
632	Conversão de cv para kcal/h		632
η mot	Rendimento do motor	%	75%
t	Tempo que os evaporadores irão funcionar	h	12

CARGA TÉRMICA DE PESSOAS			
Variável	Descrição	Grandeza	Área de Cálculo
Qpe	Carga térmica de pessoas	kcal/dia	Qpe = 0.510 kcal/dia
N	Número de pessoas no ambiente	nº	1
q met	Calor liberado pelo metabolismo destas pessoas	Kcal/h.pessoa	340
t	Tempo por dia em cada pessoa fica no ambiente refrigerac	h	1,5

CARGA TÉRMICA DO PRODUTO ESTOCADO			
Variável	Descrição	Grandeza	Área de Cálculo
Qhe	Carga térmica do Produto estocado	kcal/dia	Qh = 0.000 kcal/dia
m	Massa do produto	kg	20000 kg
c'	Calor específico do produto após o congelamento	kcal/kg°C	0,39 kcal/kg.°C
ti	Temperatura de entrada do produto	K	253 K
tf	Temperatura final do produto	K	253 K

CARGA TÉRMICA DE ILUMINAÇÃO			
Variável	Descrição	Grandeza	Área de Cálculo
Qi	Carga térmica de iluminação	kcal/dia	Qi = 0.310 kcal/dia
W	Potência de iluminação	W	50

CARGA TÉRMICA DO PRODUTO EM MOVIMENTO			
<i>Variável</i>	<i>Descrição</i>	<i>Grandeza</i>	<i>Área de Cálculo</i>
Q _{hm}	Carga térmica do Produto em movimento	kcal/dia	7.800 kcal/dia
m	Massa do produto	kg	4000 kg
c	Calor específico do produto antes do congelamento	kcal/kg°C	0,70 kcal/kg.°C
c'	Calor específico do produto após o congelamento	kcal/kg°C	0,39 kcal/kg.°C
r	Calor latente de congelamento do produto	kcal/kg°C	48 kcal/kg
t _i	Temperatura de entrada do produto	K	258 K
t _c	Temperatura de congelamento do produto	K	267 K
t _f	Temperatura final do produto	K	253 K
t	Tempo de processo	h	12 h

Figura 5 - Área de aplicação automática dos cálculos (continuação).

CARGA TÉRMICA TOTAL		
Variável	Descrição	Área de Cálculo
QPPA	Carga térmica de penetração pelas paredes	1.273 kcal/h
QPTE	Carga térmica de penetração pelo teto	0.520 kcal/h
QPPI	Carga térmica de penetração pelo piso	0.435 kcal/h
QHE	Carga térmica do produto estocado	0.000 kcal/h
QHM	Carga térmica do produto em movimento	0.650 kcal/h
QIA	Carga térmica de infiltração de ar	0.117 kcal/h
QIL	Carga térmica de iluminação	0.026 kcal/h
QME	Carga térmica dos motores dos evaporadores	0.843 kcal/h
QEQ	Carga térmica dos equipamentos de uso	0.421 kcal/h
QPE	Carga térmica de pessoas	0.043 kcal/h
QMS	Carga térmica de margem de segurança	0.000 kcal/h
QTO	Carga térmica total	4.328 kcal/h
TR	Tempo de Refrigeração (processo)	12 h
TD	Tempo de Degelo	2 h

Fonte: Autores, 2025.

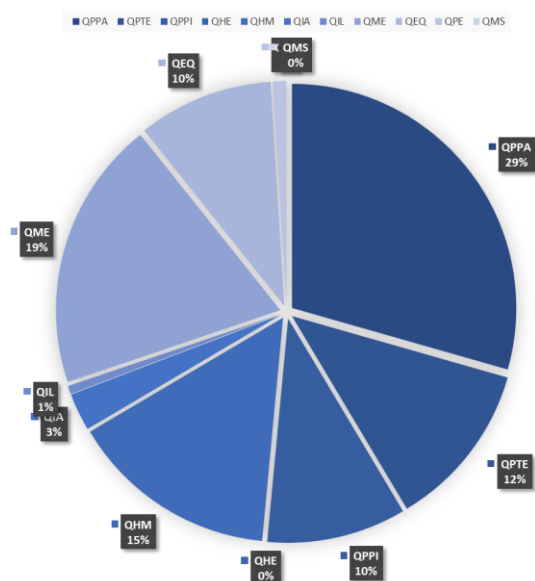
Após a aplicação das fórmulas, os resultados individuais são somados automaticamente, obtendo-se assim a capacidade total de refrigeração necessária por hora (Figura 6). Esse resultado está vinculado à planilha principal, onde os dados do questionário são inseridos, garantindo que qualquer alteração nos parâmetros atualize o resultado instantaneamente. Dessa forma, ao preencher os campos com as novas informações, o Excel® recalcula automaticamente a carga térmica. Além disso, foi utilizado um gráfico de pizza (Figura 7) para identificar visualmente quais cargas térmicas são mais significativas para aquele projeto, com conversões diretas de kcal/h para BTU/h e kW, amplamente usadas comercialmente.

Figura 6 - Representação final dos resultados de carga térmica obtidos.

RELAÇÃO DE CARGA TÉRMICA				
DESCRIÇÃO	ID	kW	BTU/h	kcal/h
Carga térmica de penetração pelas paredes	QPPA	1,48	5.053	1.273
Carga térmica de penetração pelo teto	QPTE	0,60	2.064	0.520
Carga térmica de penetração pelo piso	QPPI	0,51	1.726	0.435
Carga térmica do produto estocado	QHE	0,00	0.000	0.000
Carga térmica do produto em movimento	QHM	0,76	2.579	0.650
Carga térmica de infiltração de ar	QIA	0,14	0.465	0.117
Carga térmica de iluminação	QIL	0,03	0.102	0.026
Carga térmica dos motores dos evaporadores	QME	0,98	3.344	0.843
Carga térmica dos equipamentos de uso	QEQ	0,49	1.672	0.421
Carga térmica de pessoas	QPE	0,05	0.169	0.043
Carga térmica de margem de segurança	QMS	0,00	0.000	0.000
Carga térmica total	QTO	5,03 kW	17.173 BTU/h	4.328 kcal/h

Fonte: Autores, 2025.

Figura 7 - Representação em gráfico de pizza.



Fonte: Autores, 2025.

Resultados e Discussão

Resultados Obtidos

Os resultados da simulação do cálculo de carga térmica utilizando o Excel®, foram consistentes com os cálculos manuais, conforme as condições previamente estabelecidas. A ferramenta desenvolvida atendeu às expectativas e se revelou eficaz em minimizar o tempo de projeto e minimizar erros humanos. Essa eficiência ajuda a evitar tanto o subdimensionamento quanto o superdimensionamento de sistemas de refrigeração, fundamentais para a otimização de processos.

Para validar a eficiência, foram realizados 10 cálculos manualmente e, em paralelo, utilizando a ferramenta simuladora. A ferramenta se mostrou muito eficiente, entregando resultados em média de 1 minuto, sendo o tempo dedicado apenas ao preenchimento do questionário. Por outro lado, o cálculo manual levou em média de 6 minutos. Com isso, fica evidente que a ferramenta é eficaz, proporcionando a redução no tempo em 83% para a realização do cálculo de carga térmica.

Com o mesmo objetivo foi realizado um comparativo de resultados com três *softwares* comerciais: Danfoss® (Figura 8), Mipal® (Figura 9) e Elgin® (Figura 10).

Figura 8 - Comparativos entre os resultados do *software* da Danfoss® e o Simulador.

COMPARATIVOS SOFTWARE DANFOSS X SIMULADOR				
ITEM 01	SITUAÇÃO	DANFOSS	SIMULADOR	DIFERENÇA
1	CARNES	5,71 kW	5,69 kW	-0,40%
2	CONGELADOS	5,02 kW	5,07 kW	1,10%
3	CONGELAMENTO	33,25 kW	35,93 kW	8,06%
4	LATICÍNIO	4,63 kW	4,65 kW	0,52%
5	RESFRIAMENTO	63,95 kW	64,47 kW	0,81%
6	SORVETE P100	5,37 kW	5,03 kW	-6,24%
7	BEBIDAS	12,86 kW	13,02 kW	1,24%

Fonte: Autores, 2024; Danfoss, 2024.

Figura 9 - Comparativos entre os resultados do *software* da Mipal® e o Simulador.

COMPARAÇÃO SOFTWARE MIPAL X SIMULADOR				
ITEM 01	SITUAÇÃO	MIPAL	SIMULADOR	DIFERENÇA
1	CARNES	5,73 kW	5,69 kW	-0,78%
2	CONGELADOS	4,67 kW	5,07 kW	8,62%
3	CONGELAMENTO	31,70 kW	35,93 kW	13,35%
4	LATICÍNIO	4,86 kW	4,65 kW	-4,26%
5	RESFRIAMENTO	59,87 kW	64,47 kW	7,68%
6	SORVETE P100	5,38 kW	5,03 kW	-6,43%
7	BEBIDAS	13,30 kW	13,02 kW	-2,13%

Fonte: Autores, 2024; Mipal, 2024.

Figura 10 - Comparativos entre os resultados do *software* da Elgin® e o Simulador.

COMPARATIVOS SOFTWARE ELGIN X SIMULADOR				
ITEM 01	SITUAÇÃO	ELGIN	SIMULADOR	DIFERENÇA
1	CARNES	5,14 kW	5,69 kW	10,76%
2	CONGELADOS	4,76 kW	5,07 kW	6,48%
3	CONGELAMENTO	44,15 kW	35,93 kW	-18,62%
4	LATICÍNIO	4,63 kW	4,65 kW	0,53%
5	RESFRIAMENTO	82,30 kW	64,47 kW	-21,66%
6	SORVETE P100	4,95 kW	5,03 kW	1,62%
7	BEBIDAS	13,54 kW	13,02 kW	-3,82%

Fonte: Autores, 2024; Elgin, 2024.

A partir dos resultados obtidos foram testados 07 cenários, utilizando os mesmos parâmetros tanto na ferramenta desenvolvida no Excel® quanto nos *softwares* de comparação. Os resultados mostraram que o simulador apresentou precisão satisfatória em relação aos *softwares*. Porém, foi possível observar a necessidade de adotar uma margem de segurança de pelo menos 15% nos futuros cálculos.

As variações observadas podem ser explicadas por diversos fatores, como as diferentes suposições feitas por cada *software*, que impactam diretamente a precisão

dos cálculos. Por exemplo, aspectos como a espessura e o tipo de material usado no isolamento do piso, as dimensões das portas e a frequência com que elas são abertas influenciam diretamente a carga térmica, por exemplo, e alguns desses parâmetros não foram solicitados por certos *softwares*, o que pode ter gerado diferenças nos resultados.

Limitações do Modelo

A escolha dos parâmetros e métodos usados na simulação teve um impacto significativo na precisão dos resultados, ressaltando a necessidade de que o usuário tenha experiência ou treinamento adequado para preencher a ferramenta corretamente. Além disso, é essencial que o usuário esteja familiarizado com todos os dados a serem inseridos, incluindo informações detalhadas e precisas sobre o produto estocado, o produto em movimento, o tipo de isolamento utilizado, entre outros fatores relevantes do questionário.

Portanto, embora o modelo de simulação tenha demonstrado eficácia, existem algumas limitações que merecem atenção. A precisão dos resultados está diretamente ligada à qualidade dos dados de entrada. Qualquer erro na inserção dos dados pode comprometer a confiabilidade dos resultados. Além disso, o modelo pode não capturar todas as variáveis dinâmicas que ocorrem em um ambiente real, como variações repentinas nas condições externas ou mudanças nas operações de abertura de portas, por exemplo.

Outra limitação é a simplificação de alguns processos que podem ser mais complexos em um ambiente real. Por exemplo, a dinâmica do processo de degelo pode variar, e a forma como isso é implementado pode afetar significativamente a eficiência do sistema. Portanto, é importante realizar simulações periódicas para garantir que os modelos permaneçam precisos e relevantes à medida que novas informações e alterações no ambiente são adotadas.

Considerações Finais

Neste trabalho, abordou-se o problema enfrentado por empresas de pequeno e médio porte na área de refrigeração, que frequentemente lidam com a complexidade e o tempo demandado para o dimensionamento de carga térmica em sistemas de refrigeração. A pesquisa teve como objetivo desenvolver uma ferramenta de simulação em Excel® para simplificar esse processo, buscando atender às

necessidades específicas do setor. Os resultados obtidos mostraram que a ferramenta proposta não apenas atendeu às expectativas, mas também se mostrou eficaz na redução de tempo e na minimização de erros humanos, evitando assim projetos superdimensionados ou subdimensionados.

As principais contribuições da pesquisa incluem a validação da ferramenta através de comparações com *softwares* comerciais, como os da Danfoss® da Mipal® e da Elgin®. Além, disso a simulação mostrou-se coerente com os valores teóricos. Essa eficácia reflete a relevância da escolha dos parâmetros e métodos utilizados na simulação, que foram otimizados para garantir uma maior aderência à realidade operacional das câmaras frigoríficas.

Os resultados obtidos na simulação mostraram-se alinhados com os valores teóricos previstos, mantendo-se dentro da margem de erro aceitável para esse tipo de cálculo. Os resultados da simulação têm implicações significativas para a eficiência dos sistemas de refrigeração. Ao considerar variáveis detalhadas e aplicáveis ao contexto real das câmaras frigoríficas, a ferramenta permite um dimensionamento mais preciso. Isso significa que as empresas podem operar com sistemas que consomem a quantidade de energia necessária para manter as condições ideais de temperatura, resultando em economias substanciais nos custos operacionais e melhoria no desempenho geral dos sistemas.

Entretanto, a pesquisa também apresentou limitações, como a dependência da qualidade dos dados de entrada e a simplificação de alguns processos complexos que podem ocorrer em situações reais. Para estudos futuros, sugere-se a inclusão de variáveis dinâmicas e o desenvolvimento de algoritmos mais robustos, além da realização de simulações periódicas para aprimorar a precisão e a aplicabilidade da ferramenta. Com isso, espera-se contribuir ainda mais para a eficiência operacional no setor de refrigeração, possibilitando melhorias contínuas e adequações às novas exigências do mercado.

Concluindo, os resultados obtidos podem ser aplicados na prática no dimensionamento de sistemas de refrigeração. A ferramenta desenvolvida permitiu otimizar o dimensionamento dos equipamentos, assegurando que sejam adequadamente especificados para atender às necessidades reais de carga térmica.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Rio de Janeiro). **Desempenho térmico de edificações Parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. 2003. NBR 15220.
- DANFOSS. **Coolselector®2**. Disponível em: <<https://www.danfoss.com/pt-br/service-and-support/downloads/dcs/coolselector-2/>>. Acesso em: 20 set. 2024.
- ELGIN. **Software de Carga Térmica**. Disponível em: <<https://lp.elgin.com.br/software-carga-termica>>. Acesso em: 20 set. 2024.
- FERREIRA, M. D. **Instrumentação pós-colheita em frutas e hortaliças**. Brasília: [s.n.].
- FERRER, W. M. H.; DIAS, J. A. **Manual prático de metodologia da pesquisa científica: noções básicas**. [s.l.: s.n.].
- HEATCRAFT Refrigeration Products. **Treinamento Técnico Avançado**. Heatcraft do Brasil. Brasil, [s.d.].
- KINGSPAN ISOESTE. **Estudos de caso EPS X PIR**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://kingspan-isoeste.com.br/wp-content/uploads/2019/02/EPS-X-PIR.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2024.
- LIMA, L. R. DE S. **Desenvolvimento de programa para dimensionamento da carga térmica e seleção das unidades condensadora e evaporadora: sistemas frigoríficos de pequeno porte**. Recife: [s.n.].
- MIPAL. **Programa Seletor Mipal**. Disponível em: <<https://www.mipal.com.br/seletor/>>. Acesso em: 20 set. 2024.
- MENEGHINI, C.; BULGARELLI, F. Análise da eficácia na redução do tempo de projeto de rosca tubular através do método de modularização. Em: **Open Science Research II**. [s.l.] Editora Científica Digital, 2022. v. 2p. 1–14.
- OLIVEIRA, T. A. B. O. **Projeto de um túnel de congelamento e uma câmara de armazenamento para filé de tilápia congelado**. Fortaleza: [s.n.]. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/61897/3/2021_tcc_taboliveira.pdf>. Acesso em: 9 jun. 2024.
- RAUPP, F. M.; BEUREN, I. M. **Metodologia de pesquisa aplicável as ciências sociais**. 2006.
- SANTOS, P. DE B. **Automação de processos com o uso de excel: implementação em uma autarquia federal**. Natal: 2023.
- SILVA, L. I. D. DA. **Perfis de temperatura de produtos refrigerados e congelados durante o armazenamento, Picking e distribuição: impacto na qualidade**. Lisboa, 2015.

TIZZEI, A. et al. **Sistema para estudos de estratégias de controle aplicadas em câmaras frias**Aprovado pelo Conselho Editorial em. Jaboticabal: [s.n.].
Disponível em:
<<https://www.scielo.br/j/eagri/a/N4KhvGqxYdc7y6jRnHwtYfz/?format=pdf&lang=en>>.
Acesso em: 9 jun. 2024.