

REFRIGERAÇÃO

3^a Edição

ENNIO CRUZ DA COSTA

Blucher

REFRIGERAÇÃO

3ª edição

Blucher

ENNIO CRUZ DA COSTA

Engenheiro Mecânico, Eletricista e Civil
Professor Titular da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS)

REFRIGERAÇÃO

3ª edição

Refrigeração

© 1982 Ennio Cruz da Costa

3ª edição - 1982

10ª reimpressão - 2013

Editora Edgard Blücher Ltda.

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-012 - São Paulo - SP - Brasil

Tel 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

É proibida a reprodução total ou parcial
por quaisquer meios, sem autorização
escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela Editora
Edgard Blücher Ltda.

FICHA CATALOGRÁFICA

C837r Costa, Ennio Cruz da,
Refrigeração/ Ennio Cruz da Costa -
São Paulo: Blucher, 1982.

v. ilust.

Bibliografia.

ISBN 978-85-212-0104-5

1. Refrigeração - Tecnologia I. Título.

CDD-621.56

CDU-621.56/59

Índices para catálogo sistemático:

1. Refrigeração: Tecnologia 621.56/59

PREFÁCIO DA TERCEIRA EDIÇÃO

Este volume faz parte de nossa obra sobre Termodinâmica, constituída das seguintes publicações:

TERMODINÂMICA
MECÂNICA DOS FLUIDOS
TRANSMISSÃO DE CALOR
COMPRESSORES
CALEFAÇÃO
REFRIGERAÇÃO
VENTILAÇÃO
CONFORTO TÉRMICO ARTIFICIAL (Física Aplicada à Construção)
CONFORTO TÉRMICO NATURAL (Arquitetura Ecológica)

A refrigeração surgiu em sua primeira edição, em 2 volumes, em 1975, como decorrência da experiência de 28 anos de magistério superior e atividade profissional, na especialidade, assim como, curso de aperfeiçoamento em Técnicas Frigoríficas que realizamos na França.

Apenas 7 anos decorridos surge a 3ª edição desta obra, agora em volume único, em trabalho esmerado da Editora Edgard Blücher Ltda.

Fazem parte desta publicação estudos tanto sobre a produção como a conservação e utilização do frio.

Na produção do frio é tratada com detalhes a refrigeração mecânica, com seus respectivos equipamentos, e os demais processos de refrigeração como a ejeção do vapor d'água, a absorção e a refrigeração termoeleétrica.

Na conservação do frio são estudados os isolantes, as técnicas de isolamento e os dispositivos para armazenagem de produtos refrigerados.

Na aplicação do frio são abordados assuntos como a fabricação de gelo, a criogenia e a conservação dos alimentos pelo frio dando-se ênfase especial ao projeto de enterpostos frigoríficos.

Toda obra é orientada no sentido teórico-prático de modo a dar tanto ao estudante como ao profissional, a par de um bom embasamento teórico, os elementos de cálculo indispensáveis para a elaboração de projetos objetivos.

Para isto, todos os assuntos, além de estudados teoricamente com detalhes, são acompanhados de tabelas, dados práticos, exemplos numéricos que, estamos certos, tornam esta obra um auxiliar valioso para o engenheiro que se dedica a esta parte da termodinâmica.

O AUTOR

ÍNDICE

1 — GENERALIDADES	18
1.1 — Definição	18
1.2 — Produção do frio	19
1.3 — Distribuição do frio	19
1.4 — Conservação do frio	19
1.5 — Aplicações do frio	20
2 — REFRIGERAÇÃO MECÂNICA POR MEIO DE GASES	22
2.1 — Princípios de funcionamento	22
2.2 — Elementos da instalação	22
2.3 — Ciclo	23
2.4 — Elementos de cálculos	24
2.5 — Exemplo numérico	25
2.6 — Dados práticos	25
2.7 — Emprego	27
3 — REFRIGERAÇÃO MECÂNICA POR MEIO DE VAPORES	28
3.1 — Princípio de funcionamento	28
3.2 — Elementos da instalação	29
3.3 — Ciclo	29
3.4 — Regime úmido e regime seco	33
3.5 — Sub-resfriamento e superaquecimento	34
3.6 — Ciclo de refrigeração a duas temperaturas de vaporização	37
3.7 — Ciclo com compressão por estágios	38
3.7.1 — Exemplo	44
3.8 — Ciclo binário ou em cascata	52
3.9 — Ciclo para a produção de gelo seco	53
3.9.1 — Exemplo	57
3.10 — Ciclos frigorígenos para a liquefação de gases	58
3.11 — Fluidos frigorígenos	61
3.12 — Compressores	76
3.12.1 — Generalidades	76
3.12.2 — Compressores alternativos	77
3.12.3 — Compressores alternativos em 2 estágios	81
3.12.3.1 — Exemplo	82
3.12.4 — Comportamento dos compressores alternativos no ciclo	82
3.12.5 — Compressores centrífugos	84
3.12.5.1 — Exemplo	84
3.13 — Condensadores	89
3.13.1 — Condensadores à água	92
3.13.1.1 — Submersos	93
3.13.1.2 — De duplo tubo	93
3.13.1.3 — De serpentina e carcaça (<i>Shell and coil</i>)	94
3.13.1.4 — De tubo e carcaça horizontal (<i>shell and tube</i> , fechado)	94
3.13.1.5 — De tubo e carcaça vertical (<i>shell and tube</i> , aberto)	96
3.13.2 — Condensadores à água e ar em contato	96
3.13.2.1 — Condensador atmosférico	98
3.13.2.2 — Condensador evaporativo	99
3.13.3 — Condensadores a ar	102
3.13.3.1 — Exemplo	104

3.14 — Resfriadores	104
3.14.1 — Resfriador de expansão direta para o ar	111
3.14.1.1 — Tipo placa	111
3.14.1.2 — Tubos lisos com circulação natural do ar	111
3.14.1.3 — Tubos aletados com circulação natural do ar ...	112
3.14.1.3.1 — Exemplo	112
3.14.1.4 — Tubos molhados com circulação natural do ar ..	113
3.14.1.5 — Superfície seca com circulação forçada de ar ...	113
3.14.1.5.1 — Exemplo	117
3.14.1.6 — Superfície molhada com circulação forçada de ar	119
3.14.2 — Resfriadores de expansão direta para líquidos	121
3.14.2.1 — Submersos	121
3.14.2.2 — Duplo tubo	121
3.14.2.3 — Tubo e carcaça tipo inundado	122
3.14.2.4 — Tubo e carcaça tipo seco	123
3.14.2.5 — Cascata ou Baudelot	125
3.14.2.6 — Tanque aberto	125
3.14.3 — Resfriadores de expansão indireta	129
3.15 — Válvulas de expansão	131
3.15.1 — Generalidades	131
3.15.2 — Classificação	132
3.15.2.1 — Válvulas de expansão manuais	132
3.15.2.2 — Tubos capilares	132
3.15.2.2.1 — Exemplo	135
3.15.2.3 — Válvula de expansão tipo bóia de baixa pressão .	136
3.15.2.4 — Válvulas de expansão tipo bóia de alta pressão ..	137
3.15.2.5 — Válvulas de expansão pressostáticas	137
3.15.2.6 — Válvulas de expansão termostáticas	137
3.15.3 — Distribuidores de líquido	140
3.16 — Controles secundários	141
3.16.1 — Válvulas de ação instantânea	141
3.16.2 — Válvulas de pressão constante	141
3.16.3 — Válvulas termostáticas de pressão de aspiração	141
3.16.4 — Reguladores servo-controlados da pressão de aspiração	142
3.16.5 — Válvulas de retenção	143
3.16.6 — Válvulas de injeção termostáticas	143
3.16.7 — Reguladores de partida	144
3.16.8 — Reguladores de capacidade	144
3.16.9 — Válvulas solenóides	144
3.16.10 — Termostatos de máxima	145
3.16.11 — Pressostatos	146
3.16.12 — Manômetros	147
3.16.13 — Termômetros	147
3.17 — Aparelhos auxiliares	147
3.17.1 — Generalidades	147
3.17.2 — Registros e válvulas manuais	148
3.17.3 — Válvulas de segurança	150
3.17.4 — Indicadores de líquido	150
3.17.5 — Filtros e secadores	150
3.17.6 — Intercambiadores de calor	151
3.17.7 — Separadores de óleo	151
3.17.8 — Separadores de líquido	152
3.17.9 — Purgadores de incondensáveis	152
3.17.10 — Depósito ou receptores de líquido	152

3.18 — Canalizações	153
3.18.1 — Generalidades	153
3.18.2 — Cálculo	156
3.18.2.1 — Exemplo	157
3.18.3 — Traçado da rede	159
3.19 — Sistema elétrico	165
3.20 — Testes, carga, lubrificação e manutenção	169
3.20.1 — Testes	169
3.20.2 — Carga	171
3.20.3 — Lubrificação	173
3.20.4 — Manutenção	174
4 — REFRIGERAÇÃO POR MEIO DO VAPOR D'ÁGUA	175
4.1 — Generalidades	175
4.2 — Ciclo teórico	176
4.2.1 — Exemplo	177
4.3 — Caso real	178
4.4 — Cálculo do ejetor	179
5 — REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO	181
5.1 — Generalidades	181
5.2 — Tipos de aparelhos	182
5.3 — Cálculos	187
5.4 — Exemplo de cálculo de um sistema de refrigeração à absorção, utilizando a solução $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$	190
5.5 — Largura do processo	195
5.6 — Exemplo de cálculo de um sistema de refrigeração à absorção, utilizando a solução $\text{H}_2\text{O} - \text{LiBr}$	197
5.7 — Dados práticos	203
6 — REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO	206
6.1 — Generalidades	206
6.2 — Capacidade de adsorção	206
6.3 — Influência da temperatura e da pressão sobre a adsorção	207
6.4 — Calor de adsorção	208
6.5 — Desumidificação do ar úmido por meio de materiais adsorventes	209
6.5.1 — Exemplo	212
7 — REFRIGERAÇÃO TERMOELÉTRICA	215
7.1 — Histórico	215
7.2 — Efeitos termoeletricos	216
7.3 — Materiais empregados	220
7.4 — Vantagens e desvantagens da refrigeração termoeletrica	220
8 — CONSERVAÇÃO DO FRIO	222
8.1 — Isolantes	222
8.1.1 — Definição	222
8.1.2 — Propriedades	222
8.1.3 — Isolantes usados na técnica da refrigeração	222
8.1.4 — Cálculo da espessura do isolamento	224
8.1.5 — Condensação interna	226
8.1.5.1 — Exemplo	228
8.1.6 — Isolamento de equipamentos e canalizações	230
8.1.7 — Espessura econômica de isolamento	232
8.1.7.1 — Exemplos	233
8.1.8 — Técnica de execução do isolamento	234

8.2 — Portas frigoríficas	240
8.3 — Recipientes e recintos para a conservação do frio	242
8.3.1 — Refrigeradores domésticos	242
8.3.2 — Refrigeradores comerciais	244
8.3.3 — Câmaras frigoríficas	251
8.3.4 — Transportes frigoríficos	252
9 — CONSERVAÇÃO DOS ALIMENTOS	255
9.1 — Generalidades	255
9.2 — Alimentos	255
9.3 — Alterações dos alimentos	256
9.4 — Influência da temperatura	257
9.5 — Influência da umidade relativa e da movimentação do ar	258
9.6 — Vantagens do congelamento	259
9.6.1 — Exemplo	261
9.7 — Métodos de congelamento	262
α — Por meio de túneis	262
β — Por meio de banhos líquidos	262
γ — Por meio de placas	263
σ — Por meio de nitrogênio líquido	263
9.8 — Descongelamento	264
9.9 — Atmosfera controlada	264
9.10 — Agentes químicos	266
9.11 — Radiações	267
9.12 — Condições ótimas para a conservação dos alimentos	267
9.13 — Liofilização	268
9.13.1 — Generalidades	268
9.13.2 — Instalações de liofilização	269
9.13.3 — Dados práticos	271
9.13.4 — Conservação dos produtos liofilizados	272
10 — ENTREPÓSOS FRIGORÍFICOS	273
10.1 — Definição	273
10.2 — Classificação	273
10.3 — Concepção geral	273
10.3.1 — Tamanho	273
10.3.2 — Formas	274
10.3.3 — Construção	275
10.3.4 — Tipos de câmaras	277
10.3.5 — Instalações complementares	279
10.3.6 — Sistema de controle	279
10.4 — Projetos de frigoríficos	279
10.4.1 — Dados iniciais	279
10.4.2 — Escolha do tipo e das áreas das câmaras	280
10.4.3 — Cálculo do isolamento	280
10.4.4 — Cálculo da carga térmica de refrigeração	280
10.4.5 — Escolha do ciclo de refrigeração e lançamento do circuito correspondente	285
10.4.6 — Cálculo e especificação dos equipamentos	285
10.4.6.1 — Exemplo	285
10.4.7 — Dados	285
10.4.8 — Escolha das áreas	286
10.4.9 — Cálculo do isolamento	287
10.4.10 — Cálculo da carga térmica de refrigeração	288
10.4.11 — Escolha do ciclo de refrigeração	290
10.4.12 — Cálculo dos equipamentos	292

10.4.12.1	— Resfriadores	292
10.4.12.2	— Condensadores	297
10.4.12.3	— Compressores	299
10.4.12.4	— Válvulas de expansão	299
10.4.12.5	— Canalizações de NH ₃	300
10.4.12.6	— Separadores de líquido SL ₁ e SL ₂	301
10.4.12.7	— Depósito de líquido	301
10.4.12.8	— Isolamento das canalizações e acessórios	302
10.4.12.9	— Sistema de comando, controle e segurança ...	303
11	— FABRICAÇÃO DE GELO D'ÁGUA	305
11.1	— Generalidades	305
11.2	— Processos de fabricação de gelo d'água	305
11.2.1	— Fabricação de gelo em barras	305
11.2.2	— Processo Rapid-Ice	306
11.2.3	— Processo Richelli da Samifi (Itália)	306
11.2.4	— Processo Grasso (Holanda)	307
11.2.5	— Fabricação de gelo em placas	307
11.2.6	— Processo Pack-Ice	307
11.2.7	— Processo Flack-Ice	308
11.2.8	— Processo Tube-Ice	308
11.2.9	— Fabricação de gelo sob vácuo	309
11.3	— Frio necessário a fabricação do gelo d'água	309
11.4	— Conservação de gelo d'água	310
11.5	— Pistas de gelo para patinação (Rinks)	310
12	— CRIOGENIA	314
12.1	— Generalidades	314
12.2	— Liquefação dos gases	314
12.2.1	— Sistema Linde	314
12.2.2	— Sistema Claude	315
12.2.3	— Produção de O ₂ e do N ₂ líquido	316
12.2.4	— Liquefação do H ₂ e do H _e	317
	a — Sistema Linde	317
	b — Sistema Claude	317
	c — Sistema Misto	317
12.2.5	— Máquina Philips	318
12.2.6	— Ciclo em cascata	320
	BIBLIOGRAFIA	322

NOTAÇÕES

<p>A – Equivalente calorífico do trabalho mecânico (1/427 kcal/kgfm).</p> <p>B – Energia utilizável (kcal/kgf).</p> <p>B_i – Módulo de Biot.</p> <p>C – Calor específico (kcal/kgf°C), Concentração (kgf/m³), Condutividade elétrica (mhos/m).</p> <p>C_v – Calor específico a volume constante referido à unidade de massa.</p> <p>C_p – Calor específico à pressão constante referido à unidade de massa.</p> <p>C_v' – Calor específico a volume constante referido à unidade de volume.</p> <p>C_p' – Calor específico à pressão constante referido à unidade de volume.</p> <p>C_m – Calor específico médio.</p> <p>D – Diâmetro (m).</p> <p>De – Diâmetro equivalente.</p> <p>D' – Coeficiente de difusão (m²/h).</p> <p>E – Energia (kgfm, kcal), Empuxo (kgf), Módulo de elasticidade (kgf/m²), Poder de emissão (kcal/m².h).</p> <p>Eλ – Poder de emissão monocromática (kcal/m².h).</p> <p>F – Força, Energia livre, Coeficiente de correção de Δt_{ln}.</p> <p>F_c – Fator de contato, Força centrífuga.</p> <p>F_e – Fator de emissividade.</p> <p>F_d – Fator de disposição ou de forma.</p> <p>F_{BP} – Fator de by-pass.</p> <p>G – Peso (kgf ou N), Entalpia livre (kcal/kgf).</p> <p>G_h – Descarga em peso por hora.</p> <p>G_s – Descarga em peso por segundo.</p> <p>G_r – Número de GRASHOF.</p> <p>G_z – Número GRATZ.</p> <p>H – Entalpia (kcal/kgf), Altura total (m).</p> <p>H_e – Entalpia equivalente.</p> <p>H_p – Entalpia equivalente à energia potencial.</p> <p>H_c – Entalpia equivalente à energia cinética.</p> <p>H_l – Entalpia do líquido.</p> <p>H_v – Entalpia do vapor.</p> <p>I – Momento de inércia (m⁴).</p> <p>J – Equivalente mecânico do calor (427 kgfm/kcal).</p> <p>K – Coeficiente geral de transmissão de calor, (kcal/m².h°C), Constante, Coeficiente de rugosidade.</p> <p>K' – Coeficiente de evaporação.</p> <p>K_D – Coeficiente de empuxo.</p> <p>L – Trabalho (kgfm), Comprimento (m).</p> <p>L_u – Trabalho utilizável.</p> <p>L_i – trabalho não utilizável de contrapressão.</p> <p>L_e – Trabalho externo.</p>	<p>L_m – Trabalho utilizável externo.</p> <p>L_R – Trabalho de atrito.</p> <p>L_v – Comprimento virtual.</p> <p>L_e – Número de LEWIS.</p> <p>M – Massa (kg).</p> <p>M_h – Descarga em massa por hora, Velocidade de massa (kg/m².h).</p> <p>M_s – Descarga em massa por segundo, Velocidade de massa (kg/m²s).</p> <p>N – Número de mol, Número de AVOGADRO, Número de rotações (RPM).</p> <p>Nu – Número de NUSSELT.</p> <p>NTU – Número de unidades de transferência.</p> <p>P – Perímetro, Permeabilidade (gm/m².h mmHg), Potência.</p> <p>Pe – Potência efetiva, Número de PECLET.</p> <p>Pr – Número de PRANDTL.</p> <p>P_t – Potência teórica.</p> <p>P_i – Potência indicada.</p> <p>P_f – Potência frigorífica (fg/h, TR).</p> <p>P_c – Potência calorífica (kcal/h).</p> <p>Q – Quantidade de calor (kcal).</p> <p>Q_e – Quantidade de calor externo.</p> <p>Q_R – Quantidade de calor de atrito.</p> <p>Q' – Quantidade de calor não compensado.</p> <p>R – Constante específica dos gases (m/K).</p> <p>Re – Número de REYNOLDS.</p> <p>R_t – Resistência térmica (°C h/kcal).</p> <p>R_v – Resistência à passagem do vapor (mmHgh/g).</p> <p>S – Entropia (kcal/K), Superfície (m²).</p> <p>S_m – Superfície média.</p> <p>S_a – Superfície das aletas.</p> <p>S_p – Superfície primária.</p> <p>S_e – Superfície externa, Entropia externa.</p> <p>S_i – Superfície interna, Entropia interna.</p> <p>S_l – Entropia do líquido.</p> <p>S_v – Entropia do vapor.</p> <p>Sc – Número de SCHMIDT.</p> <p>St – Número de STANTON.</p> <p>Sh – Número de SHERWOOD.</p> <p>T – Temperatura absoluta (K).</p> <p>T_o – Temperatura absoluta correspondente a 0°C (273,15K).</p> <p>T_s – Temperatura absoluta de saturação.</p> <p>T_c – Temperatura absoluta do ponto crítico.</p> <p>T_t – Temperatura absoluta de estagnação.</p> <p>TTS – Temperatura do termômetro seco (ts).</p> <p>TTU – Temperatura do termômetro úmido (tu).</p>
---	--

V	– Volume (m^3).	P	– Pressão absoluta (kgf/m^2).
V_h	– Vazão por hora (m^3/h).	P_e	– Pressão efetiva.
V_s	– Vazão por segundo (m^3/s).	P_a	– Pressão atmosférica.
V_{ar}	– Volume do ar.	P_o	– Pressão atmosférica normal.
V_e	– Vazão do ar exterior.	P_c	– Pressão cinética, Pressão crítica.
V_i	– Vazão do ar de insuflamento.	P_s	– Pressão de saturação, Pressão estática ou dinâmica.
V_R	– Vazão do ar de retorno.	P_t	– Pressão total ($p_s + p_c$).
V_m	– Vazão do ar de mistura, volume molecular.	P_v	– Pressão parcial do vapor d'água.
U	– Energia interna ($kcal/kgf$).	P_{ar}	– Pressão parcial do ar seco.
U_t	– Energia interna cinética.	Q	– Calor de aquecimento de um líquido ($kcal/kgf$).
U_p	– Energia interna potencial.	r	– Raio, Calor de vaporização ($kcal/kgf$), Coeficiente de reflexão.
U_ℓ	– Energia interna do líquido.	r_e	– Raio externo, Relação de expansão.
U_v	– Energia interna do vapor.	r_i	– Raio interno.
a	– Difusibilidade térmica (m^2/h), Relação de estrangulamento, Número de cilindros, Velocidade angular, Aceleração, Coeficiente de absorção.	r_c	– Raio crítico, Relação de compressão.
b	– Constante.	r_h	– Raio hidráulico.
c	– Velocidade absoluta (m/s).	t	– Temperatura em $^{\circ}C$, Coeficiente de transmissão.
c_o	– Velocidade do fluxo não perturbado, Velocidade reduzida às condições normais.	t_s	– Temperatura de saturação, Temperatura de saída.
c_f	– Velocidade de face.	t_i	– Temperatura do ar de insuflamento, Temperatura da interface.
c_v	– Velocidade crítica.	t_r	– Temperatura do ar de retorno.
d	– Distância.	t_e	– Temperatura do ar externo, Temperatura de entrada.
div.	– Divergente.	t_m	– Temperatura do ar de mistura, Temperatura média.
e	– Base neperiana, Espessura de camada limite turbulenta.	t_f	– Temperatura do fluido.
e_o	– Espessura da camada limite laminar.	t_p	– Temperatura da parede.
e_s	– Espessura da subcamada laminar.	t_{ar}	– Temperatura do ar.
f	– Coeficiente de atrito médio em placas, Forças.	t_v	– Temperatura do vapor.
f'	– Coeficiente de atrito local em placas.	u	– Volume diferencial do vapor ($v_s - \sigma_s$) m^3/kgf , Velocidade periférica (m/s), Velocidade tangencial (m/s).
f_d	– Fator de disposição de feixe de tubos.	v	– Volume específico (m^3/kgf).
g	– Aceleração da gravidade, Componente em peso.	v_s	– Volume específico do vapor saturado seco (m^3/kgf).
h	– Altura, Constante de PLANCK.	v_c	– Volume específico crítico (m^3/kgf).
i	– Número de efeitos, Grau de isolamento, Perda de carga unitária (kgf/m^2m).	x	– Umidade absoluta ou conteúdo de umidade do ar úmido, Título de um vapor, Coordenada.
j	– Perda de carga em condutos ou acessórios (jc, ja).	y	– Coordenada.
k	– Coeficiente de condutividade, Coeficiente de POISSON, Constante de BOLTZMANN, Constante.	z	– Coordenada, Número de pás, Relação de expansão.
l	– Comprimento, Espessura, Largura do rotor.	α	– Coeficiente de condutividade externa, Coeficiente de película na convecção, Coeficiente de contração, Coeficiente de temperatura.
l_e	– Comprimento equivalente, Espessura equivalente.	α'	– Coeficiente de compressibilidade (m^2/kgf).
l_a	– Distância axial.	α_c	– Coeficiente de película na convecção ($kcal/m^2 \cdot h^{\circ}C$).
l_n	– Distância normal.		
m	– Peso molecular, Número de estágios de compressão.		
mR	– Constante geral dos gases.		
n	– Número de fileiras, Expoente politrópico, Índice de renovação do ar.		

α_i	- Coeficiente de transmissão de calor por irradiação ($\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$).	π	- Relação entre circunferência e diâmetro.
β	- Coeficiente de dilatação ($1/^\circ\text{C}$), Ângulo das pás dos ventiladores.	σ	- Volume específico do líquido, Tensão, Tensão tangencial, Constante de irradiação.
γ	- Peso específico (kgf/m^3).	σ_n	- Constante de irradiação de um corpo negro.
δ	- Densidade, Massa específica (kg/m^3).	σ_R	- Tensão tangencial de REYNOLDS (turbulência), Tensão de ruptura.
ϵ	- Coeficiente de espaço nocivo, Índice de compressão, Emissividade, Altura das asperezas, Eficiência de um intercambiador.	σ_o	- Volume específico do líquido a 0°C .
η	- Rendimento.	σ_s	- Volume específico do líquido saturado, Tensão de segurança.
η_t	- Rendimento térmico, Rendimento teórico, Rendimento total.	τ	- Tempo em horas.
η_g	- Rendimento gravimétrico.	φ	- Coeficiente de velocidade, Umidade relativa.
η_v	- Rendimento volumétrico.	ψ	- Grau higrométrico.
η_m	- Rendimento mecânico.	ω	- velocidade relativa (m/s).
η_a	- Rendimento adiabático, Rendimento das aletas.	Ω	- Seção (m^2).
Θ	- Componente volumétrico, Fator de temperatura.	Ω_e	- Seção equivalente, Abertura equivalente.
λ	- Comprimento de onda, Coeficiente de atrito de condutos, Calor de formação de um vapor.	Ω_f	- Seção de face.
λ'	- Coeficiente de atrito dos acessórios dos condutos.	Ω_p	- Seção de perfil.
μ	- Coeficiente de fluxo, Viscosidade absoluta ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$), (kgfs/m^2).	Ω_o	- Seção livre.
ν	- Viscosidade cinemática (m^2/s).	Δt	- Diferença de temperatura ($^\circ\text{C}$).
		ΔT	- Diferença de temperatura (K).
		Δt_m	- diferença de temperatura média aritmética.
		Δt_{ℓ_n}	- Diferença de temperatura média logarítmica.
		∇	- Gradiente (grad.).
		∇^2	- Laplaciano.

EQUIPAMENTOS



EXPANSOR



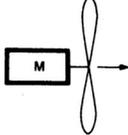
COMPRESSOR



BOMBA



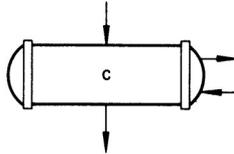
VENTILADOR AXIAL



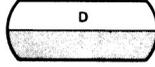
VENTILADOR CENTRÍFUGO



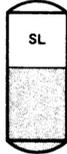
CONDENSADOR



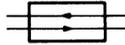
DEPÓSITO



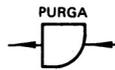
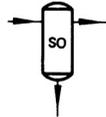
SEPARADOR DE LÍQUIDO



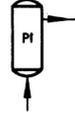
INTERCAMBIADOR



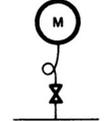
SEPARADOR DE ÓLEO



PURGA DE
INCONDENSÁVEIS



MANÔMETRO



TERMÔMETRO



VÁLVULAS E ACESSÓRIOS

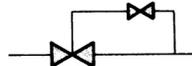
VÁLVULA OU REGISTRO



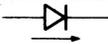
VÁLVULA DE EXPANSÃO



VÁLVULA PRINCIPAL COM
VÁLVULA PILOTO



VÁLVULA DE RETENÇÃO



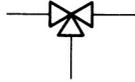
VÁLVULA DE
EXPANSÃO MANUAL



CURVA OU JOELHO



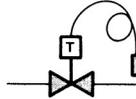
VÁLVULA DE 3 VIAS



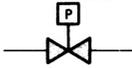
VÁLVULA DE EXPANSÃO AUTOMÁTICA



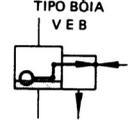
VÁLVULA DE EXPANSÃO TERMOSTÁTICA



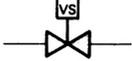
VÁLVULA DE REDUÇÃO DE PRESSÃO



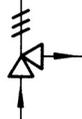
VÁLVULA DE EXPANSÃO TIPO BÓIA



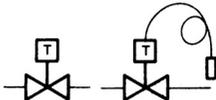
VÁLVULA SOLENÓIDE



VÁLVULA DE SEGURANÇA



VÁLVULA TERMOSTÁTICA DE PRESSÃO DE ASPIRAÇÃO



CONTROLES ELÉTRICOS

FUSÍVEL



CONTATO ELÉTRICO NORMALMENTE FECHADO



SOLENÓIDE



TERRA



BOBINA DE CONTADOR MAGNÉTICO



BOBINA DE RELÉ AUXILIAR



LÂMPADA SINALEIRA



CONTATO AUTOMÁTICO QUALQUER



PRESSOSTATO DE ALTA



CONTATO ELÉTRICO NORMALMENTE ABERTO



TERMOSTATO



PRESSOSTATO DE BAIXA



UMIDOSTATO



PRESSOSTATO DIFERENCIAL DE ÓLEO



1. GENERALIDADES

1.1 – Definição

Embora a retirada de calor de um corpo seja designada, de uma maneira geral, de refrigeração, podemos fazer as seguintes distinções:

Arrefecimento

Abaixamento da temperatura de um corpo até a temperatura ambiente (TTS ou eventualmente TTU).

Resfriamento

Abaixamento da temperatura de um corpo da temperatura ambiente até a temperatura de congelamento ($\sim 0^{\circ}\text{C}$).

Congelamento

Abaixamento da temperatura de um corpo aquém da sua temperatura de congelamento.

Com base nas considerações acima, é preferível reservar o termo refrigeração para os processos de retirada de calor dos corpos com dispêndio de energia (resfriamento e congelamento), embora esta definição não elimine a hipótese de se intensificar o arrefecimento de um corpo por meios artificiais, isto é, por meio da refrigeração.

Considerando que a tendência natural do calor é passar do corpo quente para o corpo frio, podemos concluir que o arrefecimento de um corpo, em relação ao ambiente, pode dar-se naturalmente; enquanto que o resfriamento e o congelamento necessitam, normalmente, da criação de um fluxo de calor em sentido contrário ao do gradiente térmico natural, o qual exige, de acordo com o segundo princípio da termodinâmica, dispêndio de energia utilizável.

Conforme veremos, esta pode ser de natureza mecânica, elétrica ou mesmo calorífica.

A quantidade de calor a ser retirada do sistema a refrigerar, na unidade de tempo, toma o nome de *potência frigorífica* ou *carga térmica de refrigeração* e é medida em frigorias por hora (fg/h). A frigoria corresponde a uma quilocaloria retirada ou, quilocaloria negativa, de acordo com a convenção de sinais já adotada no estudo da Termodinâmica.

Na prática, a potência frigorífica é avaliada em *Toneladas de Refrigeração* (TR), unidade que equivale à quantidade de calor a retirar da água a 0°C , para formar uma tonelada de gelo a 0°C , em cada 24 horas.

De acordo com o valor da tonelada adotada nos diversos países e, lembrando que:

$$1 \text{ Btu} = 0,25198 \text{ kcal}$$

$$1 \text{ lb} = 0,453592 \text{ kgf}$$

$$1 \text{ ton.} = 1000 \text{ kgf}$$

$$1 \text{ short ton} = 2000 \text{ lb} = 907,184 \text{ kgf}$$

$$1 \text{ long ton} = 2240 \text{ lb} = 1016,047 \text{ kgf}$$

Calor latente de solidificação da água = $144 \text{ Btu/lb} = 80 \text{ kcal/kgf}$

podemos relacionar as seguintes unidades de refrigeração com seus respectivos valores:

NOME	SÍM- BOLO	PESO		VALOR	
		lb	kgf	Btu/h	fg/h
Tonelada Standard Comercial Americana de Refrigeração	TR	2000	907,184	12.000	3023,95
Tonelada Métrica de Refrigeração	TRM	-	1000	13.228,4	3333,3
Tonelada Comercial Britânica de Refrigeração	TBR	-	1001,91	13.253,3	3339,7
Unidade Britânica Teórica de Refrigeração	UBR	-	1080	14.285,8	3600

Tabela 1.1

A técnica de refrigeração engloba quatro problemas distintos: o da produção, o da distribuição, o da conservação e o da aplicação do frio.

1.2 – Produção do frio

Teoricamente, qualquer fenômeno físico ou químico de natureza endotérmica pode ser aproveitado para a produção do frio.

Entre os processos endotérmicos usados na refrigeração, podemos citar:

- a – a fusão de sólidos, como o gelo comum (0°C) e o gelo seco (neve carbônica $-78,9^{\circ}\text{C}$);
- b – a mistura de certos corpos com água (-20 a -40°C), com gelo de água (-20 a -50°C), ou com gelo seco (-100°C), as quais tomam o nome de misturas criogênicas;
- c – a expansão de um gás com produção de trabalho;
- d – a vaporização de um líquido puro ou de uma solução binária;
- e – os fenômenos de adsorção;
- f – os fenômenos termelétricos.

Os dois primeiros processos são descontínuos e se restringem a pequenas produções de frio (uso doméstico, em laboratórios, etc.), enquanto que os demais podem ser associados aos seus inversos, de modo a permitir a produção contínua do frio. Assim, a expansão de um gás associada à sua compressão é adotada nas máquinas frigoríficas a ar e na indústria da liquefação dos gases.

A vaporização contínua de um líquido puro, por sua vez, pode ser obtida:

- por meios mecânicos, nas chamadas máquinas frigoríficas de compressão de vapor;
- por meio de ejeção de vapor, usada nas máquinas frigoríficas de vapor-d'água;
- por meio de aquecimento, método usado nas chamadas instalações de absorção.

Os fenômenos de adsorção são aplicados nas máquinas de Sílica-gel, cujo funcionamento se assemelha ao das máquinas de absorção.

Os fenômenos termelétricos, por sua vez, são atualmente aplicados na técnica do frio apenas em pequena escala (pequenos refrigera-

dores domésticos e de laboratório), estando os estudos a respeito do aproveitamento direto da eletricidade para produção do frio ainda na sua fase de aprimoramento.

1.3 – Distribuição do frio

A distribuição do frio nas instalações frigoríficas convencionais, de uma maneira geral, pode ser feita:

- a – por circulação direta do fluido que efetua o ciclo de refrigeração (fluido frigorígeno), seja este o ar (caso em que a circulação pode ser feita a circuito aberto ou fechado) ou um vapor. Neste caso, a refrigeração é dita *a expansão direta*, e o elemento que serve para a retirada do calor toma o nome de resfriador de expansão direta (evaporador, quando se trata de um ciclo que funciona com vapor);
- b – por circulação de um líquido frigorígeno secundário (água ou salmoura), o qual refrigera o ambiente por meio de um resfriador de superfície (refrigeração seca), ou diretamente por mistura (refrigeração úmida). A refrigeração, neste caso, é dita *a expansão indireta*;
- c – por circulação do ar frio, previamente refrigerado, por expansão direta ou indireta (água ou salmoura) em dispositivos apropriados chamados condicionadores.

1.4 – Conservação do frio

A conservação de um sistema a uma temperatura inferior à do meio ambiente exige a criação de resistências térmicas elevadas, a fim de reduzir o fluxo natural de calor que tende a uniformizar as temperaturas dos corpos.

Resistências térmicas elevadas são obtidas por meio dos isolamentos térmicos. Assim, a técnica da conservação de frio está ligada à construção de ambientes isolados e a problemas relacionados com o cálculo da carga térmica de manutenção da temperatura dos mesmos.

Os ambientes isolados podem ser:

- simples caixas;
- armários;
- câmaras móveis;
- câmaras fixas;
- containers;
- caminhões;
- vagões;
- barcos;
- aviões, etc, etc.

De acordo com o recurso de que dispõem esses ambientes isolados para a manutenção do frio, os mesmos podem ser classificados em:

- *isotérmicos*, quando simplesmente isolados;
- *refrigerados*, quando utilizam gelo comum (0°C), soluções eutéticas (-55°C), gelo seco ($-78,9^{\circ}\text{C}$);
- *frigoríficos*, quando dispõem de equipamentos de produção contínua de frio.

1.5 - Aplicações do frio

Modernamente, são inúmeras as aplicações do frio, o qual é aproveitado praticamente em todos os ramos da atividade humana.

Assim, podemos citar:

- a - *na indústria de alimentos*, seja na sua manufatura, tratamento térmico (pasteurização) como na sua armazenagem ou transporte, como acontece:
 - na fabricação de bebidas (vinhos, cervejas, etc.);
 - na industrialização do leite;
 - na fabricação do leite condensado e do leite em pó;
 - na fabricação da manteiga e da margarina;
 - na fabricação de queijos;
 - na fabricação de sorvetes;
 - na indústria de pão e de doces (chocolates, etc.);
 - na conservação de produtos agrícolas (cereais, etc.);
 - na conservação de frutas e legumes em atmosfera controlada;
 - na industrialização e conservação de produtos do mar;
 - na industrialização e conservação de carnes;
 - na elaboração e conservação de alimentos supergelados;
 - na liofilização do café, sucos de frutas, *champignons*, etc.

b - *na fabricação de gelo*:

- gelo em blocos, em escamas, em cubos ou em cilindros;
- seco (neve carbônica);
- em pistas para patinação.

c - *na indústria de construção*:

- na cura de grandes estruturas de concreto, como barragens, fundações, etc.;
- no congelamento do solo para abertura de poços e túneis, ou na consolidação de fundações abaladas.

d - *na metalurgia*:

- no tratamento térmico de aços rápidos;
- na supressão da austenita residual dos aços;
- na redução do endurecimento de certas ligas (alumínio);
- na refrigeração de ferramentas durante o corte;
- na refrigeração de eletrodos dos fornos elétricos e dos soldadores elétricos;
- na solidificação de moldes de mercúrio;
- na anodização;
- na ligação de peças mecânicas por contração.

e - *na indústria química*:

- na remoção de calor em reações químicas exotérmicas, a fim de garantir uma temperatura adequada durante o processo;
- na extração de sais por diluição e refrigeração, a qual intensifica a cristalização, como acontece na obtenção, por cristalização, do Na_2SO_4 , FeSO_4 , etc. (pigmentos);
- na separação de misturas de líquidos, como desparafinação de óleos, estabilização de perfumes, desidratação do éter, destilação de fluidos voláteis, etc.;
- na separação de misturas gasosas, como recuperação de solventes, fabricação de NH_3 por síntese, etc.;
- na filtração de soluções aquosas contendo suspensões coloidais (pela refrigeração, a natureza coloidal das suspensões pode ser modificada, facilitando-se assim a sua filtração);

- na solidificação de materiais, como ceras, graxas, etc.;
 - na intensificação da dissolução de um gás num líquido (absorção);
 - na intensificação da fixação de gases e vapores por sólidos (adsorção);
 - na secagem de gases;
 - na desumidificação do ar para a produção de ácido fosfórico, de soda cáustica granulada, etc.;
 - nos processos eletrolíticos, como o de anodização, de obtenção do hipoclorito de sódio, etc.;
 - na produção de reações químicas a baixas temperaturas, como na fabricação de explosivos, na polimerização, etc.;
 - na fabricação da amônia anidra;
 - na fabricação da borracha sintética e dos adubos sintéticos;
 - na armazenagem de substâncias sensíveis às temperaturas elevadas, como explosivos, polímeros, etc.;
 - na liquefação de gases combustíveis, como CH_4 , C_3H_8 , C_4H_{10} , etc., ou dos gases industriais, como o ar, N_2 , O_2 , H_2 , Cl_2 , He, etc.
- f** – *no condicionamento do ar:*
- para conforto em residências, escritórios, fábricas, transportes, recreação, hospitais, sanatórios, etc.;
 - para a refrigeração de minas profundas;
 - para a indústria têxtil, fotográfica, etc.
- g** – *no aquecimento por bomba de calor:*
- para conforto no inverno;
 - para o aquecimento de líquidos (piscinas, indústrias químicas, concentração de sucos de frutas, leite, etc.).
- h** – *na medicina:*
- na conservação de cadáveres (morgues);
 - no congelamento de peças anatômicas;
 - na liofilização de tecidos;
 - na elaboração do plasma sanguíneo;
- na anestesia hipotérmica e na chamada anestesia local por congelamento, usada com sucesso atualmente;
 - na hibernação artificial: o congelamento rápido do organismo vivo permite a sua recuperação após espaços de tempo bastante longos (congelamento rápido sem luta do organismo contra o frio);
 - na cultura de fungos (antibióticos), na fabricação da insulina;
 - na criodessecação;
 - no endurecimento rápido de certos medicamentos em pasta;
 - na conservação de certos vírus (alguns só vivem em temperaturas baixas).
- *aplicações diversas:*
- na conservação de produtos vários, como: couros, peles, tapetes, tecidos, flores, mudas, grãos, fumos, cigarros, baterias de acumuladores, material de embalagem;
 - na descolagem de lentes;
 - na fabricação de bolas de golfe;
 - na dessalinização da água do mar;
 - na produção de chuva artificial (neve carbônica);
 - na obtenção de vácuos elevados;
 - na refrigeração das pilhas atômicas e reatores;
 - nos testes de baixas temperaturas em laboratórios;
 - nos testes de resistência humana nas câmaras estratosféricas;
 - nos testes sobre redução da atividade vital para a recuperação de pacientes (hibernação artificial);
 - nos testes sobre semicondutores e supercondutores;
 - nas temperaturas muito baixas obtidas com o hidrogênio e o hélio, tem sido possível o estudo das propriedades da matéria como, por exemplo, a resistividade elétrica (a qual tende para zero) e o calor específico (o qual tende para zero) nas proximidades do zero absoluto.