

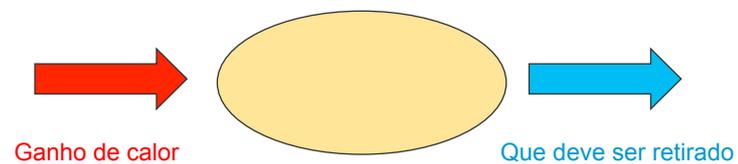
3. Cálculo de carga térmica

Profa. Dra. Alessandra Lopes de Oliveira

Departamento de Engenharia de Alimentos (ZEA)
Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA)
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP

3.1. Conceitos de Carga Térmica

- Projeto de Refrigeração \Rightarrow 1º Passo é avaliar a carga térmica



[3.1. Conceitos de Carga Térmica]

- A carga térmica define a capacidade do sistema;

Projeto Frigorífico ⇒ Carga Térmica

[3.1. Conceitos de Carga Térmica]

- Conservação e Congelamento de Alimentos é a principal aplicação de refrigeração comercial e industrial;
- O estudo de Câmaras frigoríficas é o principal enfoque no estudo da carga térmica (didática);
- Os conceitos básicos poderão ser extrapolados para outras aplicações;

[3.1. Conceitos de Carga Térmica]

- Exemplos de outras aplicações:
 - equipamentos para congelamento e resfriamento rápido (túneis de congelamento) que além da carga térmica, parâmetros do processo terá influência como:
 - tempo;
 - velocidade do ar;
 - temperatura do ar, ...

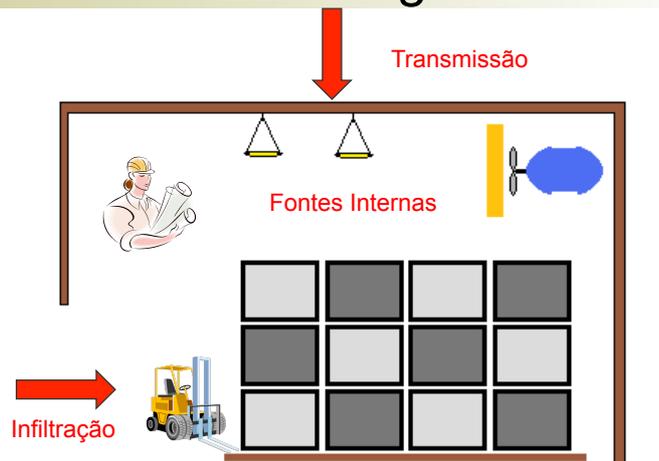
[3.1. Conceitos de Carga Térmica]

- No estudo da carga térmica de câmaras frigoríficas deve-se saber:
 - o que armazenar/conservar;
 - quantidades, movimentação, condições de entrada;
 - temperatura e umidade desejadas;
 - propriedades termofísicas dos produtos/embalagens;
 - localização (cidade) (condições climáticas);
 - aspectos construtivos da câmara frigorífica;
 - dimensões e acabamento das superfícies;
 - orientação;

3.2. Cálculo de Carga térmica

- Para o cálculo da carga térmica ou da capacidade frigorífica do sistema (Q_e) necessita-se conhecer:
 - O calor transferido através das paredes, piso e teto;
 - O calor relativo à infiltração de ar;
 - O calor relativo ao produto;
 - O calor misto (pessoas, iluminação, empilhadeira, etc)

3.2. Cálculo de Carga térmica



[3.2. Cálculo de Carga térmica]

- Dados necessários para o cálculo da Carga térmica e conseqüentemente, dimensionamento de uma câmara fria:
 - Clima:
 - Temperaturas média e máxima do mês mais quente;
 - Umidade relativa média;
 - INPE → Dados estatístico do clima regional.
 - Disponibilidade de água e energia
 - Produto:
 - Tipo e quantidade;
 - Embalagem;
 - Fluxo diário na câmara (movimentação).

[3.2. Cálculo de Carga térmica]

- Dados necessários para o cálculo da Carga térmica e conseqüentemente, dimensionamento de uma câmara fria:
 - Descrição da instalação:
 - Localização;
 - Dimensões.
 - Condições do local:
 - Liberdade de Planejamento.

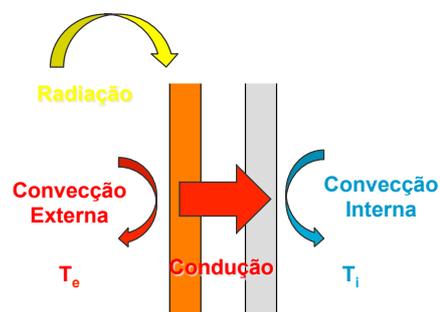
3.3. Carga térmica de transmissão

- Área fria deverá ser devidamente isolada, caso contrário:
 - Calor extra deverá ser contabilizado para remover esta carga térmica;
 - Maiores deverão ser o evaporador e o compressor.
- Finalidades do isolamento:
 - Diminuir o fluxo de calor;
 - Prevenir condensação nas paredes externas da câmara (barreira de vapor).

3.3. Carga térmica de transmissão

- Fenômenos combinados:

- Condução
- Convecção
- Radiação



3.3. Carga térmica de transmissão

- A escolha do isolante depende:
 - Da sua condutividade térmica;
 - Densidade;
 - Economia;
 - Risco de fogo (inflamabilidade);
 - Odores e vapores indesejáveis;
 - Facilidade de instalação;
 - Resistência à decomposição, a insetos e microrganismos.

3.3. Carga térmica de transmissão

- Propriedades de dois isolantes comuns

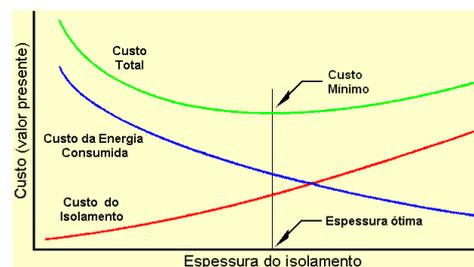
Propriedades	Poliestireno expandido	Poliuretano expandido
Densidade (kg/m ³)	10-30	40
Condutividade térmica (kcal/mh°C)	0,030	0,020
Resistência a passagem de água	boa	boa
Resistência a difusão do vapor em relação ao ar parado (%)	70	100
Segurança ao fogo	pobre	pobre
Resistência à compressão (kgf/m ²)	2000	3000
Custo	baixo	alto

3.3. Carga térmica de transmissão

- Espessura adequada do isolamento:
 - Depende da temperatura média e máxima do local;
 - **Resfriamento:** aumento ou diminuição do isolante não ocasionará mudança substancial na capacidade frigorífica;
 - **Congelamento:** a principal carga térmica provém da condução através do isolamento

3.3. Carga térmica de transmissão

- Espessura ótima de isolamento
 - Compromisso entre custos iniciais e operacionais



[3.3. Carga térmica de transmissão]

$$Q_T = SU[(T_e + \Delta T_{rad}) - T_i]$$

- Dada em:
 - kW/24h;
 - kcal/24h;
 - BTU/24h.
- S: área externa da parede piso e teto;
- U: coeficiente global de transferência de calor;
- T_e e T_i : temperaturas externas e internas da câmara.

[3.3. Carga térmica de transmissão]

- O coeficiente global de transferência de calor combina todos os mecanismos (condução e convecção)
 - A radiação é considerada na variação da temperatura;

3.3. Carga térmica de transmissão

- Efeito da Radiação
 - T_e adicionando ΔT_{rad} em função:
 - da orientação (N, L, O)
 - da cor da superfície

Cor da superfície	Parede Leste, °C	Parede Norte, °C	Parede Oeste, °C	Teto Plano, °C
Escura	5,0	3,0	5,0	11,0
Média	4,0	3,0	4,0	9,0
Clara	3,0	2,0	3,0	5,0

3.3. Carga térmica de transmissão

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{f_e} + \frac{e}{k} + \frac{e_i}{k_i} + \dots + \frac{1}{f_i}$$

- Onde:
 - f_e : coeficiente de convecção do ar externo;
 - e : espessura do tijolo, ou bloco, etc;
 - k : condutividade térmica do tijolo;
 - e_i : espessura do isolante;
 - k_i : condutividade térmica do isolante;
 - f_i : coeficiente de convecção do ar interno.

3.3. Carga térmica de transmissão

- Condutividade térmica de materiais

Material	Condutividade Térmica (W/m.K)
Espuma de Poliuretano	0,023-0,026
Poliestireno Expandido	0,037
Cortiça	0,043
Fibra de Vidro	0,044
Concreto	0,94
Tijolo	0,72

3.3. Carga térmica de transmissão

- Coeficiente de transferência de calor por convecção

Orientação da superfície e condição	Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m ² .K)
Superfície externa	
Velocidade do vento 6,7 m/s	34,0
Velocidade do vento 3,4 m/s	23,0
Superfícies externas e internas, ar parado	
superfície vertical, fluxo de calor horizontal	8,3
superfície horizontal, fluxo de calor ascendente	9,3
superfície horizontal, fluxo de calor descendente	6,1

3.3. Carga térmica de transmissão

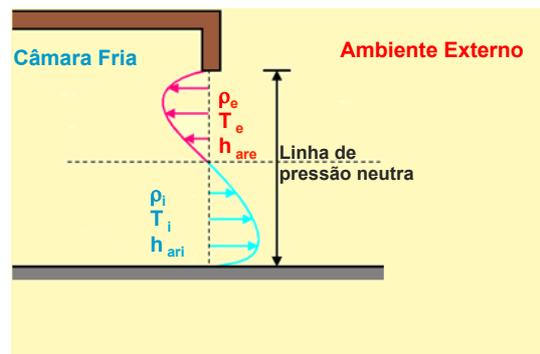
- A carga térmica por transmissão é calculada através de cada uma das paredes;
- Paredes com materiais diferentes tem U diferentes;
- Paredes com materiais iguais, U são iguais, entretanto deve-se atentar ao ΔT que nem sempre será o mesmo (T_e diferente para cada parede, teto e piso e ainda há o ΔT_{rad} que também é);
- Piso/solo: na falta de informação utilizar $T_{solo} = T_e - 10^\circ\text{C}$ ou T_{BU}

3.4. Carga térmica por infiltração

- Carga térmica adicional que entra quando a câmara é aberta;
 - O número de vezes que a porta de uma câmara é aberta em 24h é difícil de se conhecer, mas estima-se em função do volume da câmara

3.4. Carga térmica por infiltração

- Ganhos por Infiltração por convecção natural.



3.4. Carga térmica por infiltração

- O cálculo de carga térmica por infiltração em 24h se dá pela seguinte expressão:

$$Q = \frac{V}{v} n (h_e - h_i)$$

- V = volume interno da câmara;
- v = volume específico do ar externo;
- n = número de troca de ar em 24h.

3.4. Carga térmica por infiltração

- Troca de ar em uma câmara em função do seu volume (n)

Volume interno (m ³)	Troca de ar em 24h (n)	Volume interno (m ³)	Troca de ar em 24h (n)
10	31	200	6
20	21	250	5
30	17	500	4
40	14	750	1
50	13	1000	2,5
100	9	1250	2,0
150	7	1800	1,7
		2400	1,4

3.4. Carga térmica por infiltração

Volume da Câmara Fria		Renovações de Ar em 24 horas	
pés cúbicos	metros cúbicos	TA ≥ 0	TA < 0
250	7,1	38,0	29,0
300	8,5	34,5	26,2
500	14,2	26,0	20,0
600	17,0	23,0	18,0
800	22,7	20,0	15,3
1000	28,3	17,5	13,5
1500	42,5	14,0	11,0
2000	56,6	12,0	9,3
3000	85,0	9,5	7,4
4000	113,3	8,2	6,3
5000	141,6	7,2	5,6
6000	169,9	6,5	5,0
8000	226,6	5,5	4,3
10000	283,2	4,9	3,8
15000	424,8	3,9	3,0

3.4. Carga térmica por infiltração

- O ar úmido é uma mistura de duas “substâncias puras”
 - ar seco
 - vapor d’água
- Ar úmido a baixas pressões tem comportamento de mistura de gases perfeitos:
 - Lei de Dalton \Rightarrow mesmo volume e pressões parciais
 - $p = p_a + p_v$

3.4. Carga térmica por infiltração

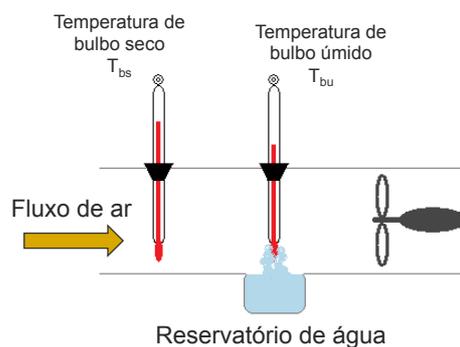
- Propriedades termodinâmicas da mistura:

- entalpia (kJ/kg de ar seco)

$$h = h_a + \omega h_v$$

- umidade absoluta (kg/kg de ar seco)

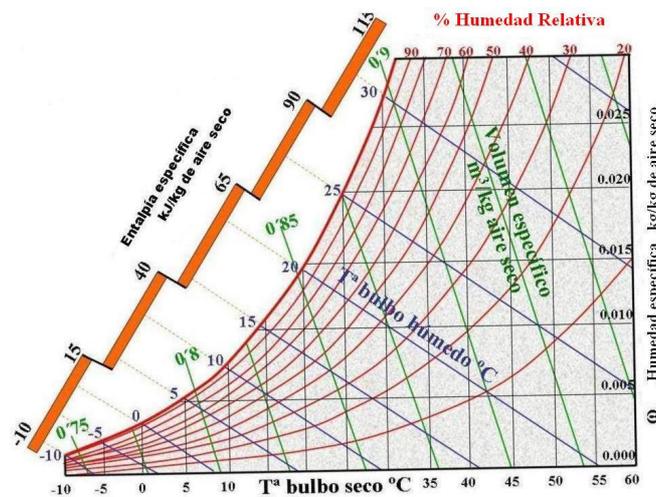
$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v}$$



3.4. Carga térmica por infiltração

- Para conhecer o estado termodinâmico do ar úmido, três propriedades são necessárias:
 - p
 - T (T_{bs})
 - UR ou T_{bu}
- Diagrama psicrométrico
 - todas as propriedades reunidas num único diagrama desenvolvido para uma dada p

3.4. Carga térmica por infiltração



[3.5. Carga térmica do produto]

- Na carga térmica do produto considera-se:
 - movimentação ⇒ resfriamento/congelamento dos produtos
 - resfriamento das embalagens
 - metabolismo/respiração de vegetais “in natura” vegetais continuam “vivos”

[3.5. Carga térmica do produto]

- A carga térmica do produto é composta por:
 - a) Calor removido no resfriamento:
$$Q_a = m c_{p_{\text{resf}}} (T_1 - T_c)$$
 - b) Calor removido no congelamento:
$$Q_b = m L$$
 - c) Calor removido abaixo do do congelamento:
$$Q_c = m c_{p_{\text{cong}}} (T_c - T_f)$$

[3.5. Carga térmica do produto]

- O calor removido no resfriamento e congelamento é dado por:

$$Q = m[cp_{\text{resf}}(T_1 - T_c)] + L + [cp_{\text{cong}}(T_c - T_f)]$$

- Onde L é a h_{SL} é o calor latente de transição S-L da água.

[3.5. Carga térmica do produto]

- Propriedades térmicas dos alimentos

Produto	T (início cong. °C)	Água (%)	Cp (kcal/ kg°C)	Cp* (kcal/ kg°C)	L (kcal/ kg)
Abacaxi	-1,4	85,3	0,88	0,45	68
Pêra	-2,0	83,5	0,86	0,45	65
Carne	-1,7	60-77	0,7-0,8	0,39-0,43	50-62
Frango	-2,8	74	0,80	0,42	60
Salmão	-2,2	64	0,72	0,39	52
Camarão	-2,2	76	0,84	0,44	66
Sorvete	-6	63	0,70	0,39	49
Gema líq.	-2,2	55	0,65	0,36	45

[3.5. Carga térmica do produto]

- Para frutas e hortaliças considera-se o calor produzido pelo metabolismo (vivos): calor de respiração:

$$Q_r = m R$$

- R = calor de respiração (kcal/ton 24h)
- m = massa (ton)

- Calor da embalagem:

$$Q_{emb} = m_{emb} C_p \Delta T$$

[3.5. Carga térmica do produto]

- Calor de respiração

Frutas e hortaliças	Calor de Respiração R (kcal/ton 24h)					
	0°C	2°C	5°C	10°C	15°C	20°C
Abacaxi	-	-	826-937	1361-1461	1562-1663	1713-1841
Pêssego	262-393	363-453	524-847	1310-1915	1814-2721	2923-1613
Banana	-	-	826-1209	1361-2419	1814-3427	2016-5040
Maçã	201-358	292-433	322-655	857-1260	1109-1915	1209-2520
Alface	655-806	706-907	857-1058	1462-2117	2268-3931	5242-7056
Couve	958-1310	1209-1411	1532-1813	3226-3780	5393-6098	8064-9072
Cenoura	202-585	454-706	535-806	655-907	1512-2016	1865-2822

3.5. Carga térmica do produto

Calor Específico e condutividade térmica de alguns materiais

Material	$k, W/m.K$	$cp, kJ/kg.K$
Alumínio	210	0,92
Aço Inox	16	0,50
Lata	61	0,25
Madeira (pinho)	0,15	2,72
Nylon	0,24	1,72
Papelão Plano	0,14	1,26
Papelão Corrugado	0,07	1,26
Papel Encerado	0,22	1,34
Polietileno Alta Densidade	0,48	2,30
Polietileno Baixa Densidade	0,33	2,30
Polipropileno	0,16	1,93
Vidro	1,10	0,84

3.6. Carga térmica mista

- Carga mista ou ganhos internos vêm de elementos que dissipam calor no interior do espaço refrigerado:
 - Empilhadeiras
 - Equipamentos de processamento de alimentos (moedores, misturadores, empacotadoras, etc.)
 - Motores elétricos de ventiladores e empilhadeiras
 - Sistemas de controle de umidade
 - Sistemas de degelo
 - Iluminação
 - Pessoas

[3.6. Carga térmica mista]

- Carga proveniente da iluminação:
 - Quanto maior a intensidade da lâmpada ⇒ maior a carga térmica;
 - Normalmente se considera: 260 kcal/h p/ cada 100 m² de câmara.
- Calor dissipado para diferentes tipos de lâmpadas e intensidade luminosa (kcal/h)

Intensidade (lux)	Vapor de mercúrio	Fluorescente	Sódio	Incandescente
75	5,0	6,7	2,3	15,3
125	8,3	11,1	3,8	25,4
250	17,0	22,2	7,6	50,7

[3.6. Carga térmica mista]

- Carga proveniente da iluminação:
 - Quanto maior a intensidade da lâmpada ⇒ maior a carga térmica;
 - Normalmente se considera: 260 kcal/h p/ cada 100 m² de câmara.
- Calor dissipado (kcal/h) para diferentes tipos de lâmpadas e intensidade luminosa (-20°)

Intensidade (lux)	Vapor de mercúrio	Fluorescente	Sódio	Incandescente
75	5,0	6,7	2,3	15,3
125	8,3	11,1	3,8	25,4
250	17,0	22,2	7,6	50,7

3.6. Carga térmica mista

- Carga proveniente de motores:
 - A carga proveniente de empilhadeiras, irá depender do motor, hoje em dia as empilhadeiras à combustão estão sendo substituídas pelas elétricas.
- Carga proveniente de motores elétrico (ventiladores e empilhadeiras) (kW/kW)

Motor (kW)	Motor no espaço refrigerado	Motor fora do espaço refrigerado
0,1 a 0,4	1,8	1,0
0,4 a 2,2	1,5	1,0
2,2 a 15,0	1,3	1,0

3.6. Carga térmica mista

- Carga proveniente de pessoas:
 - O calor proveniente de pessoas depende do número, da movimentação, da roupa e da temperatura.
- Calor equivalente de uma pessoa no espaço refrigerado

Temperatura (°C)	kcal/h
0,1 a 0,4	1,8
0,4 a 2,2	1,5
2,2 a 15,0	1,3

[3.7. Carga térmica total]

- A carga térmica total corresponde:
 - Ao calor calculado em cada item anterior;
 - Referir estes valores para 24h;
 - O equipamento frigorífico nunca opera durante 24h consecutivas, períodos para paradas devem ser previstos (de 16 à 22h).

$$Q_T = \frac{Q}{24h} \times \text{tempo}$$

[Apresentação]

Fonte de Carga Térmica	Q (BTU ou kcal ou kJ)/24h
Transmissão	
Infiltração	
Produto	
	Resfriamento
	Respiração
	Embalagem
Iluminação	
Pessoas	
Empilhadeiras	
Sub-Total (1)	
Ventiladores (10%)	
Sub-Total (2)	
Segurança (10%)	
Capacidade frigorífica (24h, h, tempo de operação)	

[Fixação dos conceitos]

- **Exercício de carga térmica**
- Um navio pesqueiro resolveu investir em uma instalação frigorífica que possa sustentar os peixes abatidos em alto mar. Você foi contratado para executar a engenharia (fornecer a base de cálculos) da instalação frigorífica. Os investidores lhes passaram os seguintes dados:
 - A câmara irá estocar 100 ton de peixe, a carga diária será de 50 ton. Os peixes entrarão a aproximadamente 20°C e ao final de 24h estarão a -5°C.
 - A temperatura externa à câmara (no porão do navio) será de 18°C (UR 60%) e a interna de -5°C (UR 85%).
 - A câmara deverá ter 20m de comprimento x 10m de largura e 3m de altura.
 - As paredes, teto e piso serão de folhas de PVC com núcleo isolante em PUR (Poliuretano) injetado, com condutância térmica de 0,025 kcal/hm²C. O coeficiente de película do ar interno e externo será de 7 kcal/hm²C.
 - Determine:
 - a) **Carga térmica de transmissão:** neste caso considere que a câmara, de paredes claras, se encontra no centro do porão com 4m de pé direito.
 - b) **Infiltração;**
 - c) **Iluminação:** considere que em cada 30m² de teto há 100W (86kcal/h) e que o período de iluminação seja de 8 horas por dia;
 - d) **Produto:** utilizando o Diagrama de Mollier para peixe magro com 83% de conteúdo de água determine a carga térmica total proveniente do produto e indique a carga térmica diária durante três dias e acrescente ao valor da carga térmica 10% referente à embalagem;
 - e) **Carga mista:** pessoas – considerar 2 pessoas trabalhando durante 8h/dia e suponha que cada uma representa 250kcal/h;
 - g) Monte o quadro geral considerando ainda 10% de carga proveniente dos ventiladores dos evaporadores e mais 10% de segurança.

[Resolução do exercício]

Fonte de Carga Térmica	Q (kcal)/24h
Transmissão	7.368,24
Infiltração	16.157,38
Produto	3.740.000,00
Mista	
Iluminação	4.586,67
Pessoas	4.000,00
Sub-Total (1)	3.772.122,29
Ventiladores (10%)	377.212,23
Sub-Total (2)	4.149.334,52
Segurança (10%)	414.933,45
Total	4.564.267,97
Capacidade frigorífica / h	190.177,83
Capacidade frigorífica em 18h de operação	3.423.200,98/24h