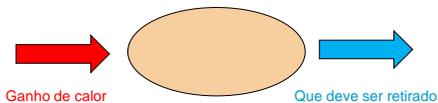


3. Cálculo de carga térmica

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 ⇒ 1º Passo é avaliar a 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 termo-físicas dos produtos/embalagens;
- localização (cidade) (condições climáticas);
- aspectos construtivos da câmara frigorífica;
- dimensões e acabamento das superfícies;
- orientação;



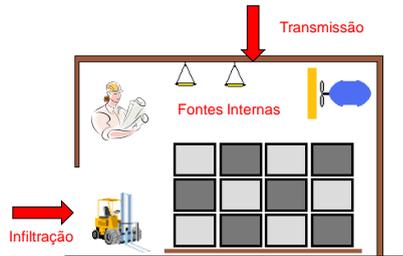
3.2. Cálculo de Carga térmica

➤ 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 consequentemente, 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 consequentemente, 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:

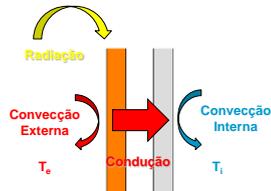
- Diminuir o fluxo de calor;
- Prevenir condensação nas paredes externas da câmara (barreira de vapor).



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

Dada em:

- kW/24h;
- kcal/24h;
- BTU/24h.

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

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, convecção e radiação)

- 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, E, W)
 - 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/m².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

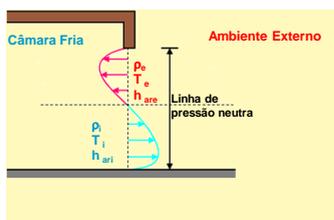
- A carga térmica por transmissão é calculada através de cada uma das paredes;
- Paredes com materiais diferentes tem U diferentes;
- Paredes com materiais iguais, U são iguais, entretanto deve-se atentar ao ΔT que nem sempre será o mesmo (T_e diferente para cada parede, teto e piso e ainda há o ΔT_{rad} 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 (m³) | Troca de ar em 24h (n) | Volume interno (m³) | 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 ⇒ mesmo volume e pressões parciais
 - $p = p_a + p_v$

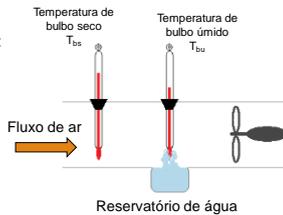
3.4. Carga térmica por infiltração

- Propriedades termodinâmicas da mistura:
 - entalpia (kJ/kg de ar seco)

$$h = h_a + \omega h_v$$

- umidade absoluta (kg/kg de ar seco)

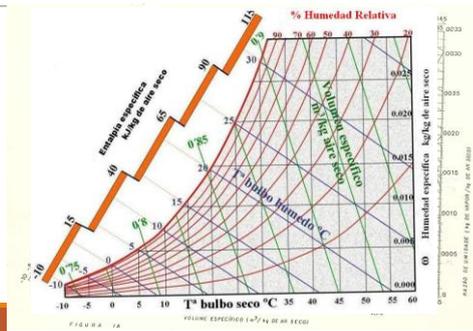
$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v}$$



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 \Rightarrow 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:

$$Q_a = m c_{p_{\text{resf}}} (T_i - T_c)$$

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:

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

- 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 liq. | -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:

$$Q_r = mR$$

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

Calor da embalagem:

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

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 Especifico e condutividade térmica de alguns materiais

| Material | k, W/m.K | cp, kJ/kg.K |
|-----------------------------|----------|-------------|
| Aluminio | 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 |
| Poliétileno Alta Densidade | 0,48 | 2,30 |
| Poliétileno 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 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/hm²°C. O coeficiente de película de ar interno e externo será de 7 kcal/hm²°C.
- 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 – considere 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 |
