



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CARGAS TÉRMICAS EN REFRIGERACIÓN

Apellidos y nombre: Velázquez Martí, Borja (borvemar@dmta.upv.es)¹

Departamento/Centro: ¹Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria
Universitat Politècnica de València

Índice general

1. Resumen de las ideas clave	2
2. Introducción	2
3. Objetivos	2
3.1. Cálculo del calor que pasa a través de un paramento	2
3.2. Cálculo de aislamientos	3
4. Entradas de calor por las renovaciones de aire	3
5. Calor debido luminarias, motores y personas	5
5.1. Calor cedido por luminarias	5
5.2. Calor cedido por motores	6
5.3. Calor cedido por personas	6
6. Calor por la carga de los productos a refrigerar, congelar o conservar	7
7. Cierre	10
8. Ejercicio propuesto	10
9. Bibliografía	10

1 Resumen de las ideas clave

Los datos de partida en el diseño de una instalación de refrigeración son la temperatura del foco frío, la temperatura del foco caliente y la potencia frigorífica. En este artículo se va a enseñar a calcular este último valor. La potencia frigorífica corresponderá a la suma todas las cargas térmicas que tiene el recinto que se desea refrigerar. Es decir, la instalación frigorífica debe compensar todos los aportes de calor, extrayendo la misma cantidad para que la temperatura interior permanezca constante. Las fuentes de calor se dividen en cuatro tipos: las debidas a la transferencia de calor a través de los paramentos; las debidas a la entrada de aire del exterior; las debidas a la presencia de luminarias, motores y personas; las debidas al enfriamiento y congelación de los productos a conservar en la cámara.

2 Introducción

Para mantener la temperatura constante en un sistema, la energía que entra dentro del volumen de control debe ser igual a la que sale. Por tanto, si se desea mantener la temperatura de un recinto a temperatura más baja que su entorno, el sistema de refrigeración debe extraer el mismo calor que entra o se genera en el mismo. Se denomina *carga térmica* de una instalación frigorífica a cualquier fuente de calor dentro del recinto que se desea refrigerar. A la cantidad de calor que hay que extraer del recinto a refrigerar se denomina potencia frigorífica y equivale al calor que debe ser transferido al fluido refrigerante en los evaporadores.

3 Objetivos

Una vez que el alumno se lea con detenimiento este documento, será capaz de:

1. Calcular las cargas térmicas debidas a la transferencia de calor por los paramentos
2. Calcular las cargas térmicas debidas a la entrada de aire del exterior
3. Calcular las cargas térmicas debidas a la presencia de luminarias, motores y personas
4. Calcular las cargas térmicas debidas a procesos de enfriamiento y congelación de productos

3.1 Cálculo del calor que pasa a través de un paramento

Los paramentos de las cámaras frigoríficas suelen ser superficies planas constituidas por varias capas de materiales (materiales estructurales + capas de aislantes térmicos). Las superficies externa e interna de los paramentos están en contacto con un fluido en movimiento que es el aire. Por tanto, en las superficies externas e internas de los paramentos se producirán transferencias de calor por convección. Mientras que la transferencia de calor entre los materiales que conforman las capas internas se realizará por conducción. El calor que se transfiere por cada paramento se calcula con la ecuación 1 donde A es el área del mismo, T_{ext} y T_{int} son las temperaturas en el interior y exterior de la cámara en el lado de ese paramento, y K_g es una constante de proporcionalidad que se denomina *coeficiente global de transmisión*. Sus unidades en el SI son $W m^{-2} K^{-1}$. Para n capas de materiales en el paramento se tendía:

$$\dot{Q}_p = K_g \cdot A \cdot (T_{ext} - T_{int}) \quad (1)$$

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{h_{pint}} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \dots + \frac{e_n}{k_n} + \frac{1}{h_{pext}}}$$



Figura 1: Panel aislante cámaras frigoríficas



Figura 2: Vista cámara frigorífica con evaporadores y luminarias

Donde e_i es el espesor de cada capa que conforma el paramento, k_i es la conductividad térmica de cada material, h_{ext} y h_{int} son los coeficiente se transferencia de calor por convección exterior e interior.

Para calcular el calor transferido por un paramento, la superficie del mismo A siempre es conocida; lo mismo la diferencia de temperaturas entre el ambiente de un lado y del otro, que son valores de diseño. Por tanto, es necesario fijar el espesor y conductividad de los materiales que conforman las distintas capas, junto los coeficientes de transferencia por convección de ambos lados del paramento.

Los coeficientes de película en las superficies de cámaras frigoríficas suelen ser en el interior de $7,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ y en el exterior $25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

3.2 Cálculo de aislamientos

La recomendación del Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE) es que el calor transferido por los paramentos máximo admisible en una cámara sean los siguientes valores según el tipo de cámara:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{adm} &= 8 \text{ W/m}^2 \text{ para cámaras de conservación} \\ \dot{Q}_{adm} &= 6 \text{ W/m}^2 \text{ para cámaras de congelación} \end{aligned}$$

A partir de estos valores se pueden calcular los espesores de los aislantes.

4 Entradas de calor por las renovaciones de aire

El aire que entra en la cámara desde el exterior estará a mayor temperatura que el aire que está en el interior. Por tanto, el sistema de refrigeración debe tener potencia suficiente para bajar la temperatura del aire de entrada hasta la temperatura de la cámara. Esa potencia se calculará con el producto del flujo másico de aire de renovación \dot{m}_{aire} (kg/s) por la diferencia de entalpías específicas en las condiciones correspondientes $(h_{aire_{ext}} - h_{aire_{int}})$ (kJ/kg).

$$\dot{Q}_{aire} = \dot{m}_{aire} \cdot (h_{aire_{ext}} - h_{aire_{int}})$$

La entalpía del aire será el sumatorio de la correspondiente al aire seco y la del vapor de agua mezclado con el mismo.

$$h_{\text{aire humedo}} = h_{\text{aire}} + \omega_{\text{aire}} \cdot h_{\text{vapor}} \quad (2)$$

La entalpía específica del aire a presión atmosférica se puede calcular como el producto de la calor específico a esa presión por la temperatura ($C_{p_{\text{aire}}} = 1,005 \text{ kJ/kg as } ^\circ\text{C}$).

$$h_{\text{aire}} = C_{p_{\text{aire}}} \cdot T$$

$$h_{\text{aire}} = 1,005 \cdot T \quad \text{kJ/kg as}$$

La entalpía del vapor por unidad de masa de aire seco se calcula como el producto de la humedad específica del aire (ω_{aire}) por la suma del calor latente absorbido en el proceso de evaporación a presión atmosférica ($\lambda = 2503 \text{ kJ/kg agua}$) y el calor específico a esa presión por la temperatura.

$$h_{\text{vapor}} = \omega_{\text{aire}} \cdot (\lambda + C_{p_{\text{vapor}}} \cdot T)$$

$$\lambda = 2503 \quad \text{kJ/kg agua}$$

$$C_{p_{\text{vapor}}} = 1,86 \quad \text{kJ/kg agua } ^\circ\text{C}$$

De ahí se obtiene la Ecuación (2) por la que se puede calcular la entalpía del aire húmedo a partir de su temperatura y su humedad absoluta.

$$h_{\text{aire}} = C_{p_{\text{aire}}} \cdot T + \omega_{\text{aire}} \cdot (\lambda + C_{p_{\text{vapor}}} \cdot T) \quad (3)$$

Si se desea expresar la entalpía en relación al volumen de aire, se debe multiplicar por la densidad del mismo ρ .

$$h_{v \text{ aire}} = (C_{p_{\text{aire}}} \cdot T_{\text{aire}} + \omega_{\text{aire}} \cdot (\lambda + C_{p_{\text{vapor}}} \cdot T_{\text{vapor}})) \cdot \rho$$

La densidad se puede calcular con la ecuación:

$$\rho = \frac{PM_{\text{aire}}}{R \cdot T}$$

PM_{aire} peso molecular del aire (28,93 g/mol)

T temperatura del aire en K

R constante universal de los gases (0,082 litros Pa/mol K)

Sabiendo el volumen que se renueva periódicamente en la cámara, se puede calcular el calor empleado en el enfriamiento del aire mediante la ecuación:

$$\dot{Q}_{\text{aire}} = n \cdot V \cdot (h_{v \text{ aire}_{\text{ext}}} - h_{v \text{ aire}_{\text{int}}})$$

Tabla 1: Estimación del número de veces que se renueva el aire en las cámaras por día

Volumen (m ³)	Renovaciones por día		Volumen (m ³)	Renovaciones por día	
	T <0°C	T >0°C		T <0°C	T >0°C
2,5	52	70	100	6,8	9
3	47	63	150	5,4	7
4	40	53	200	4,6	6
5	35	47	250	4,1	5,3
7,5	28	38	300	3,7	4,8
10	24	32	400	3,1	4,1
15	19	26	500	2,8	3,6
20	16,5	22	600	2,5	3,2
25	14,5	19,5	800	2,1	2,8
30	13	17,5	1000	1,9	2,4
40	11,5	15	1500	1,5	1,95
50	10	13	2000	1,3	1,65
60	9	12	2500	1,1	1,45
80	7	10	3000	1,05	1,05

5 Calor debido luminarias, motores y personas

Los elementos que hay en el interior de las cámaras desprenden calor. Para mantener la temperatura constante el sistema de refrigeración debe compensar esas ganancias extrayendo la misma cantidad de energía.

5.1 Calor cedido por luminarias

Toda la potencia de las luminarias se transforma en calor. Este calor hay que considerarlo para el dimensionado del sistema de refrigeración.

$$\dot{Q}_{luminarias} = \sum (\dot{Q}_{lampi} \cdot t_{li}) \cdot \frac{1}{24}$$

Donde

$\dot{Q}_{luminarias}$ es la energía calorífica disipada por las luminarias en kW

\dot{Q}_{lampi} es la potencia de cada lámpara en kW

t_{li} es el número de horas de funcionamiento de cada lámpara al día

¡ojo! fijense en las unidades de la ecuación.

Cuando no hay certeza a priori del número y tipo de luminarias presentes en la cámara, pueden tomarse valores de referencia para la estimación del calor desprendido por el sistema de iluminación. Estos valores corresponden a 12 W/m² en zonas de almacenamiento refrigerado, 27 W/m² en zonas de trabajo refrigeradas.

5.2 Calor cedido por motores

Se considera que el 20% de la potencia del motor eléctrico se disipa en calor. Por tanto, la energía disipada por los motores viene dada por la ecuación siguiente

$$\dot{Q}_{motores} = 0,2 \cdot \sum (\dot{W}_{motor\ i} \cdot t_{mi}) \frac{1}{24}$$

Donde

$\dot{Q}_{motores}$ es la energía calorífica disipada por los motores en kW

$\dot{W}_{motor\ i}$ es la potencia de cada motor en kW

t_{mi} es el número de horas de funcionamiento de cada motores al día

5.3 Calor cedido por personas

Las personas emiten calor y su presencia en las cámaras frigoríficas hay que considerarlas. El calor emitido se calcula por:

$$\dot{Q}_{personas} = q_p \cdot \sum (t_{pi} \cdot n_{pi}) \frac{1}{24}$$

Donde

$\dot{Q}_{personas}$ es el calor desprendido por la presencia de personas en kW

q_p es el calor por hora desprendido por una persona en kW

t_{pi} es el número de horas al día en las que hay n_{pi} personas en la cámara

n_{pi} es el número de personas que están presentes en la cámara frigorífica en un determinado momento.

El calor emitido por una persona aumenta a medida que disminuye la temperatura de su entorno. En la siguiente tabla se presentan valores estimados de ese calor desprendidos en distintas temperaturas.

Tabla 2: Energía liberada por las personas según la temperatura ambiente

Temperatura de la cámara (°C)	Potencia liberada por persona (kW)
10	0,21
5	0,24
0	0,27
-5	0,30
-10	0,33
-15	0,36
-20	0,39
-25	0,42

6 Calor por la carga de los productos a refrigerar, congelar o conservar

La carga térmica más importante en una cámara proviene de los productos que se pretenden refrigerar. El calor empleado en el proceso depende de la temperatura de entrada de los productos y la temperatura a la que se desea realizar la conservación en frío. Este calor se puede dividir en cuatro partes:

- Calor de enfriamiento por encima del punto de congelación:

$$\dot{Q}_{enf1} = \dot{m} \cdot C_e \cdot (T_e - T_{cong})$$

- Calor de congelación

$$\dot{Q}_{cog} = \dot{m} \cdot L_{cong}$$

El calor latente de congelación de un producto (L_{cong}) puede ser obtenido en la bibliografía, donde existen numerosas tablas para diferentes tipos de productos; o puede ser estimado a partir de su contenido de agua con la siguiente fórmula:

$$L_{cong} = 3,335 \cdot a$$

- Calor de enfriamiento por debajo del punto de congelación

$$\dot{Q}_{enf2} = \dot{m} \cdot C_{econg} \cdot (T_{cong} - T_f)$$

- Calor de respiración del alimento

Las frutas y verduras continúan un proceso de maduración en el interior de la cámara, aportando calor adicional que, aunque generalmente es pequeño, es necesario considerar. Generalmente se calcula con la ecuación:

$$\dot{Q}_{resp} = \dot{m} \cdot L_{resp}$$

L_{resp} es el calor de respiración por unidad de masa.



Figura 3: Cámaras frigoríficas con productos, embalajes y palés

Ejemplo 1

Se desea calcular la carga térmica de una instalación destinada a almacenar pan precocido, para su posterior venta y distribución. El producto llegará envasado y se quiere conservar a una temperatura aproximada de -18°C con los siguientes datos:

	Símbolo	Valor	Unidades
Temperatura exterior	T_{ext}	38	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura interior	T_{int}	-18	$^{\circ}\text{C}$
Humedad relativa exterior	HR_{ext}	67	%
Humedad relativa interior	HR_{int}	70	%
Humedad absoluta exterior	ω_{ext}	0,029	kg/kg as
Humedad absoluta interior	ω_{int}	$4,7 \cdot 10^{-4}$	kg/kg as
Superficie en planta	S	20×24	m^2
Volumen	V	1200	m^3
Capacidad de carga	m_{carga}	62500	kg
Masa embalaje	m_{emb}	3125	kg
Masa palets	m_{palets}	6250	kg
Flujo de entrada de producto	\dot{m}_p	25000	kg/día
Flujo de entrada embalajes	\dot{m}_{emb}	1250	kg/día
Flujo de entrada palets	\dot{m}_{palets}	2500	kg/día
Temperatura entrada de alimentos	T_{ealim}	-15	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura entrada de embalaje	T_{eemb}	-3	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura de entrada de los palets	$T_{epalets}$	2	$^{\circ}\text{C}$

Flujo de calor admisible	\dot{Q}_{adm}	6	W/m^2
Calor latente de congelación	L_{cong}	115	kJ/kg
Calor de respiración	L_{resp}	1,97	kJ/kg día
Calor específico del cartón y madera	C_{cm}	2,71	kJ/kg $^{\circ}\text{C}$
Calor específico del pan ($T < 0^{\circ}\text{C}$)	$C_{e bpan}$	1,42	kJ/kg $^{\circ}\text{C}$
Calor específico del pan ($T > 0^{\circ}\text{C}$)	$C_{e apan}$	2,93	kJ/kg $^{\circ}\text{C}$
Densidad del aire	ρ	1,225	kg/ m^3
Calor específico del aire seco	C_{aire}	1,004	kJ/kg $^{\circ}\text{C}$
Calor latente de ebullición del agua	L_{ebull}	2501	kJ/kg
Calor específico del vapor de agua	C_{vapor}	1,86	kJ/kg $^{\circ}\text{C}$

Se va a utilizar como cerramiento de la cámara paneles con las siguientes características:

Espesor	200 mm
Conductividad térmica	0,02 W/m K
Barrera de acero galvanizado antivapor	0,50 mm
Densidad nominal	40 kg/ cm^3
Clasificación europea al fuego	Bs2 d0
Precio	99,60 €/m 2

Considerar que los coeficientes de película interno y externo son $7,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ y $25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ respectivamente.

Despreciense el calor aportado por motores de los ventiladores del evaporador, las luminarias y las personas.

Resolución

a) Flujo de calor por los cerramientos

$$\dot{Q}_p = K_g \cdot A \cdot (T_{ext} - T_{int})$$

La altura de la cámara sera: $a = \frac{1200}{20 \cdot 24} = 2,5 \text{ m}$

La superficie de las paredes es $A_p = 2 \cdot (20 + 25) \cdot 2,5 = 225 \text{ m}^2$

A esta superficie hay que añadir el suelo y el techo $A = 225 + 480 + 480 = 1185 \text{ m}^2$

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{h_{p \text{ int}}} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{1}{h_{p \text{ ext}}}} = \frac{1}{\frac{1}{7,5} + \frac{0,2}{0,02} + \frac{1}{25}} = 0,098 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\dot{Q}_p = 0,098 \cdot 1185 \cdot (38 - (-18)) = 6503,28 \text{ W} = 6,50 \text{ kW}$$

b) Flujo de calor entrante con las renovaciones de aire

$$\dot{Q}_{\text{aire}} = n \cdot V \cdot (h_{\text{aire ext}} - h_{\text{aire int}}) \cdot \rho$$

El aire de entrada se determina con el número de renovaciones por día n , que se mira en la tabla correspondiente.

Las entalpías específicas del aire se calculan a partir de:

$$h_{\text{aire}} = C_{p \text{ aire}} \cdot T + \omega_{\text{aire}} \cdot (\lambda + C_{p \text{ vapor}} \cdot T)$$

$$h_{\text{air int}} = 1,005 \cdot (-18) + 0,00047 \cdot (2501 + 1,83 \cdot (-18)) = -16,48 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{\text{air ext}} = 1,005 \cdot (38) + 0,00047 \cdot (2501 + 1,83 \cdot 38) = 112,58 \text{ kJ/kg}$$

La entalpía por unidad de volumen de aire se obtiene multiplicando por la densidad del mismo. La densidad del aire hay que considerarla a la temperatura media entre el interior y el exterior $T_m = \frac{T_{\text{ext}} + T_{\text{int}}}{2} = \frac{38 + (-18)}{2} = 10^\circ\text{C}$

$$\rho = \frac{PM_{\text{aire}}}{R \cdot T} = \frac{28,93}{0,082 \cdot (273 + 10)} = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{Q}_{\text{aire}} = \frac{1,9}{3600 \cdot 24} \cdot 1200 \cdot (112,58 - (-16,48)) \cdot 1,25 = 3,41 \text{ kW}$$

c) Calor de conservación de productos

En cuanto a la conservación de la mercancía, se contempla el enfriamiento del producto desde la temperatura de entrada hasta la temperatura final. Dado que entra congelado, sólo se enfría consumiendo calor sensible en ese estado.

$$\dot{Q}_{\text{enf}} = \dot{m}_p \cdot C_{e \text{ bpan}} \cdot (T_i - T_f) = \frac{25000}{24 \cdot 3600} \cdot 1,42 \cdot (-15 - (-18)) = 1,23 \text{ kW}$$

En cuanto a la respiración del producto:

$$\dot{Q}_{\text{resp}} = m_{\text{carga}} \cdot L_{\text{resp}} = 62500 \cdot \frac{1,97}{24 \cdot 3600} = 1,43 \text{ kW}$$

La carga de los embalajes y de los palets será:

$$\dot{Q}_{\text{emb}} = \dot{m}_{\text{emb}} \cdot C_{\text{emb}} \cdot (T_i - T_f) = \frac{1250}{24 \cdot 3600} \cdot 2,71 \cdot (-3 - (-18)) = 0,60 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{palets}} = \dot{m}_{\text{palets}} \cdot C_{\text{palets}} \cdot (T_i - T_f) = \frac{2500}{24 \cdot 3600} \cdot 2,71 \cdot (2 - (-18)) = 1,57 \text{ kW}$$

La potencia frigorífica necesaria en la cámara a extraer por los evaporadores resulta de:

$$\dot{Q}_{\text{evp}} = \dot{Q}_p + \dot{Q}_{\text{aire}} + \dot{Q}_{\text{enf}} + \dot{Q}_{\text{resp}} + \dot{Q}_{\text{emb}} + \dot{Q}_{\text{palets}} = 6,50 + 3,41 + 1,23 + 1,43 + 0,60 + 1,57 = 13,31 \text{ kW} = 11463,16 \text{ kcal/h}$$

7 Cierre

En la Figura 4 se muestran los aspectos a considerar en el cálculo de las cargas térmicas en las cámaras frigoríficas. La potencia frigorífica se calcula determinando los aportes de calor desde las distintas fuentes: transferencia a través de los paramentos, entradas de calor por entradas de aire desde el exterior, generación de calor en motores, luminarias y personas, calor empleado en el enfriamiento y/o congelación de productos, envases y palets.

La limitación de la potencia calorífica transferida desde el exterior por los paramentos nos permiten dimensionar los aislamientos

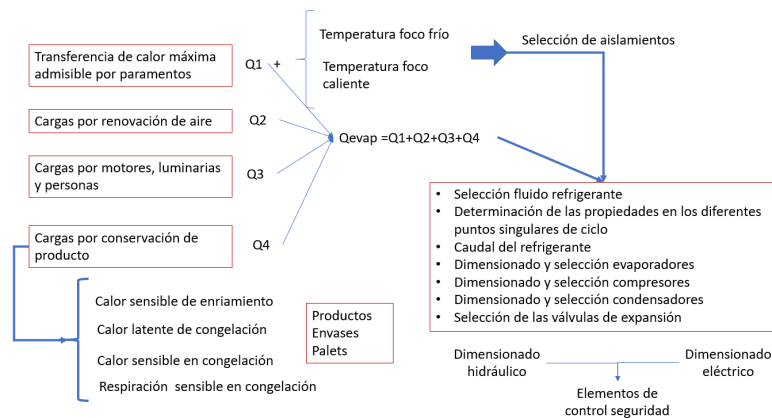


Figura 4: Fases del proyecto de refrigeración

8 Ejercicio propuesto

Se desea dimensionar el espesor de panel de poliuretano a utilizar en una cámara frigorífica de forma que la ganancia de calor sea de a 8 W/m^2 . Datos :

- Temperatura interior -20°C
- Temperatura exterior 30°C
- Coeficiente de película interior (convección+radiación) de $9,09 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Coeficiente de película exterior (convección+radiación) de $16,67 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Conductividad panel de poliuretano $0,023 \text{ W/mK}$

Solución: 14 cm

9 Bibliografía

ATECYR (2016). Fundamentos de refrigeración. Ed. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (Atecyr)(Fernández Seara, J. et al.)

DTIE 7.05, cálculo de cargas térmicas (Pinazo Ojer, José Manuel | Soto Francés, Víctor Manuel | García Lastra, Arcadio | ATECYR)