

02.04. Espesor óptimo económico de aislamiento

02.04.01. INTRODUCCIÓN

Hasta el momento, todos los aspectos analizados se refieren a cálculos técnicos sobre los aislamientos.

La determinación de un espesor de aislamiento adecuado obedece en algunos casos a condiciones exclusivamente técnicas, como puede ser limitar la caída de temperatura de un fluido en una conducción o fijar la temperatura máxima superficial de un aislamiento por motivos de seguridad de los trabajadores.

Pero la mayor parte de las inversiones en aislamiento tienen un carácter económico: limitar las pérdidas de calor en recintos a temperaturas muy diferentes a las ambientales. Por ello es necesario introducir conceptos económicos en la elección adecuada del aislamiento, generalmente en la determinación del espesor.

El planteamiento teórico es sencillo:

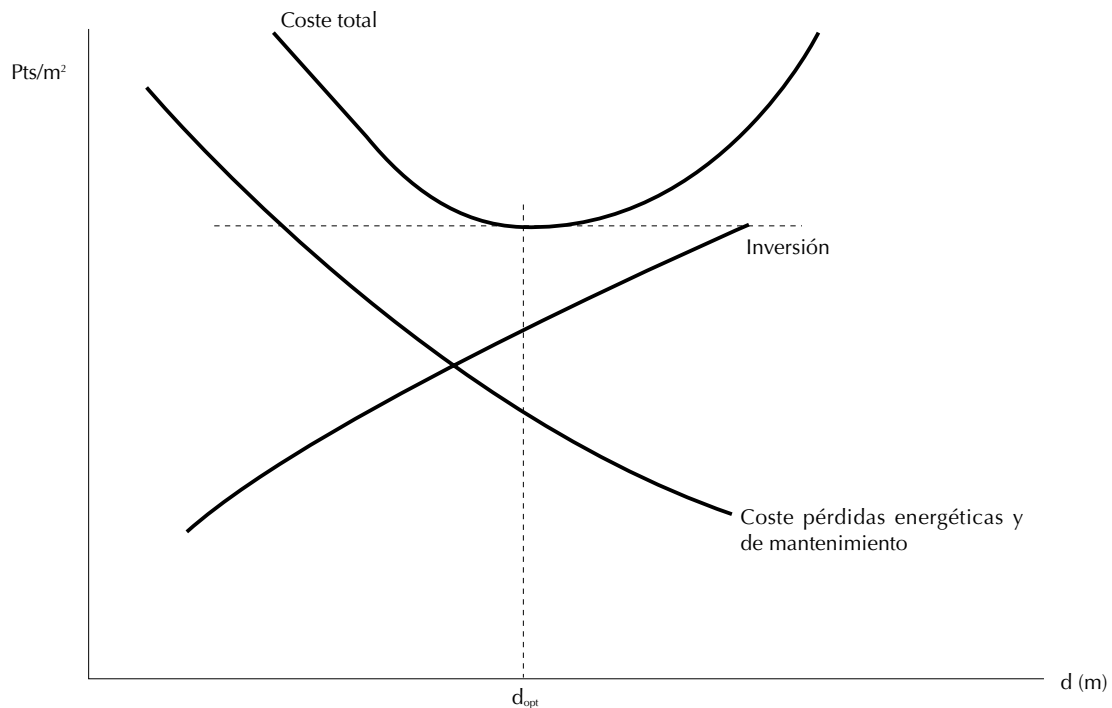
Las pérdidas de energía disminuyen con un aumento del espesor de aislamiento, de acuerdo con fórmulas conocidas.

El aumento del espesor de aislamiento supone incremento de la inversión para su compra e instalación, aunque esto no tiene unas leyes determinadas de crecimiento.

Existen además otros componentes del coste global como son los gastos de mantenimiento.

Representando gráficamente estos conceptos para la unidad específica (p.e. m² de superficie aislada) y para un período de tiempo previsto de amortización, se tendrá:

- Inversiones en función del espesor de aislamiento «d».
- Pérdidas energéticas + gastos de mantenimiento para el período considerado, en función también de «d».



El coste total empresarial será, para cada espesor de aislamiento, el resultado de los valores de ambas curvas.

El coste total será mínimo para un espesor determinado, precisamente el espesor óptimo económico « d_{opt} ».

02.04.02. MÉTODO GENERAL

El método de cálculo más utilizado en la CEE se basa en las aplicaciones del VALOR ACTUALIZADO NETO (VAN).

El procedimiento consiste en determinar, para cada inversión en aislamiento, el VALOR ACTUALIZADO NETO de los ahorros energéticos aportados y compararlo con los incrementos que supone la inversión.

Para determinar el VAN, se determina el coef. VAN o coeficiente multiplicador que actualiza los ahorros en el período total que se considere.

Se demuestra que el valor de dicho coeficiente es:

$$\text{Coef. VAN} = \frac{t(t^n - 1)}{t - 1}$$

siendo

$$t = \frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r}$$

donde:

b = Aumento previsible del coste de la energía en %.

r = Tasa de actualización neta en % (equivalente al interés bancario deducidos los impuestos y la inflación).

n = Número de años para los que se efectúa el estudio (horizonte económico).

Para un proyecto determinado, a cada espesor de aislamiento térmico « d_i » le corresponderán unas pérdidas energéticas específicas y un coste de inversión asociado.

A medida que aumenta el espesor, como ya se ha indicado, disminuyen las pérdidas energéticas y aumenta la inversión.

Si consideramos dos espesores consecutivos de aislamiento, la diferencia de pérdidas energéticas tendrá un valor económico que se actualiza con el coef. VAN para el período considerado. A su vez, existirá una diferencia de inversión de aislamiento.

Esto permite plantear la comparación:

$$\begin{array}{rcl} \text{INCREMENTO} & & > \\ \text{DE} & \times \text{Coef. VAN} & = \\ \text{AHORRO} & & < \end{array} \quad \text{INCREMENTO DE LA INVERSIÓN}$$

siendo:

INCREMENTO DE AHORRO: Valor pérdidas energéticas para « d_i » — Valor pérdidas para « d_{i+1} »

INCREMENTO DE INVERSIONES: Inversión para « d_{i+1} » — Inversión para « d_i »

Si el resultado de la inecuación es que el primer término es superior al segundo, indica que el incremento de ahorro es mayor que la inversión necesaria para obtenerlo. Por el contrario, si la inecuación indica que el incremento del ahorro obtenido requiere una inversión superior (primer término menor que el segundo) esta inversión no es rentable y debe disminuirse, es decir, reducir el espesor de aislamiento.

Es obvio que la situación óptima (espesor óptimo económico) es precisamente la del equilibrio, es decir, cuando el incremento del ahorro es igual al incremento de la inversión.

02.04.03. MÉTODO DE CÁLCULO DIRECTO

Como se indicaba en la Introducción, lo que se trata es de encontrar el valor mínimo del Coste Total:

$$\text{Coste Total } (d_i) = \text{Coste de Pérdidas de energía } (d_i) + \text{Inversión } (d_i)$$

Las pérdidas caloríficas, sobre todo de figuras geométricas conocidas, responde bien a las características de funciones continuas de espesor (d_i). Pero no ocurre lo mismo con las inversiones: normalmente éstas presentan saltos o discontinuidades con el espesor (p. ej.: espesores a partir de los que se necesitan dos piezas superpuestas y dos sujeciones). Por esto, las inversiones sólo pueden presentar el carácter de funciones continuas dentro de un campo de valores « d_i ».

Con estas consideraciones, es posible encontrar el espesor óptimo económico cuando se cumpla:

$$\frac{\partial \text{Coste}(d)}{\partial (d)} = 0$$

El caso más sencillo es el de las paredes planas o de gran radio de curvatura, para las cuales puede establecerse:

$$I(d) = I_0 + I'_0 \cdot d$$

en el que:

$I(d)$ = Inversión para el aislamiento de espesor « d » (€/m²)

I_0 = Valor constante de la inversión, independiente del espesor (€/m²)

I'_0 = Coeficiente variable de la inversión (€/m³)

la ecuación global del coste será:

$$\text{Coste}(d) = \frac{\theta_i - \theta_e}{\frac{1}{h_e} + \frac{d}{\lambda}} \cdot E \cdot (\text{VAN}) \cdot Z + I_0 + I'_0 \cdot d$$

donde:

- $\theta_i - \theta_e$ = Dif. de temperaturas interior y ambiente (K)
 h_e = Coeficiente superficial externo de transmisión de calor $W/(m^2 \cdot K)$
 λ = Conductividad térmica del aislante entre $\theta_i - \theta_e$ $W/(m \cdot K)$
 d = Espesor de aislamiento (m)
 E = Coste de la energía $€/W \cdot h$
(VAN) = Coef. VAN
 Z = N° de horas de funcionamiento al año (h).

el resultado de $\frac{\partial \text{Coste}(d)}{\partial (d)} = 0$ sería:

$$d = \sqrt{\frac{E \cdot \lambda \cdot Z \cdot (\text{VAN}) \cdot (\theta_i - \theta_e)}{I_0}} - \frac{\lambda}{h_e} \quad (\text{m})$$

NOTA: Para las lanas minerales (lanas de vidrio y lanas de roca), el término λ/h_e suele despreciarse ya que $\lambda \ll h_e$.

Cuando se trata de elementos curvos (cilindros o esferas), la complejidad de la expresión resultante no permite una formulación como en el caso de las paredes planas. En estos casos es más recomendable la utilización del método general.

Ejemplos

Ejemplo 1

Se trata de calcular el espesor óptimo económico para el aislamiento de las paredes planas de un reactor, utilizando una lana de roca ROCLAINE (Manta SPINTEX 342G-100).

Los datos de partida son:

- Temperatura interior = 400 °C
- Temperatura ambiente = 20 °C
- Coef. de conductividad medio entre 20 y 400 °C, $\lambda = 0,06 W/(m \cdot K)$
- Coeficiente superficial externo, $h_e = 12 W/(m^2 \cdot K)$
- Tiempo de funcionamiento de la instalación, $Z = 8.000$ (h/año)
- Coste de la energía: $1,28 \cdot 10^{-5} €/W \cdot h$
- Inversión en aislamiento, $I = 40,26 + 186,31 \cdot d$ (€/m²) con d (m) para $d > 0,05$ m.
- Número de años del estudio, $n = 10$ años.
- Incremento del coste de la energía en el período, $b = 3\%$ anual
- Interés anual del dinero, deducidos impuestos, 5%
- Tasa de inflación anual prevista, 3%

Se determinará el Coef. VAN en primer lugar:

$$t = \frac{1 + 0,01 \cdot b}{1 + 0,01 \cdot r}$$

con $b = 3\%$ y $r = 5 - 3 = 2\%$, resulta $t = 1,01$

luego:

$$\text{Coef. VAN} = \frac{t(t^n - 1)}{t - 1} \quad \text{con } n = 10, \text{ resulta}$$

Coef. VAN = 10,562

a) Método de cálculo general:

A continuación se deben determinar los valores de la TABLA adjunta, donde:

(1) ESPESOR DE AISLAMIENTO, d (m)

(2) PÉRDIDAS DE ENERGÍA para cada espesor de aislamiento y por unidad de superficie:

$$q = \frac{\theta_i - \theta_e}{\frac{1}{h_e} + \frac{d}{\lambda}} \quad (\text{W/m}^2)$$

(3) VALOR DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA, a partir de (2):

$$(2) \times E \times Z \quad (\text{€}/(\text{m}^2 \cdot \text{año}))$$

(4) VALOR ACTUALIZADO DE LAS PÉRDIDAS para todo el período, a partir de (3):

$$(3) \times \text{Coef. VAN} \quad (\text{€}/\text{m}^2)$$

(5) INCREMENTO DEL AHORRO entre dos espesores consecutivos, a partir de (4):

$$\text{Valor (4) para espesor } d_i - \text{Valor (4) para espesor } d_{i+1}$$

(6) INCREMENTO DE INVERSIÓN del aislamiento entre dos espesores consecutivos:

$$I_{i+1} - I_i \quad (\text{€}/\text{m}^2)$$

(7) Diferencias entre (5) y (6)

(5) – (6) (pts/m²), se calculará en la tabla hasta que esta diferencia sea 0 o el primer valor negativo posible.

Normalmente debido a que los espesores de aislamiento comercial varían de en 1 cm como mínimo, el espesor óptimo económico corresponderá al espesor que más se aproxime (positivo o negativo) a una diferencia 0.

En este ejemplo, el espesor buscado es 0,36 m.

TABLA

(1) ESPESOR de AISLAM. d (m)	(2) PÉRDIDAS de ENERGÍA (W/m ²)	(3) VALOR de (2) €/m ² · año)	(4) VALOR de (3) en PERÍOD. (€/m ²)	(5) INCREM. de AHORRO (€/m ²)	(6) INCREM. de INVERSIONES (€/m ²)	(7) DIFERENCIA (5) – (6) (€/m ²)
0,050	407	41,88	442,31			
0,100	215	21,99	232,29	210,02	9,32	200,70
0,150	146	15,02	158,67	73,62	9,32	64,30
0,200	111	11,42	121,66	37,01	9,32	27,69
0,250	89	9,16	96,72	24,94	9,32	15,62
0,300	75	7,72	81,51	15,21	9,32	5,90
0,350	64,225	6,61	69,80	11,71	9,32	2,40
0,360	62,44	6,42	67,90	1,89	1,86	0,03
0,370	60,8	6,26	66,08	1,78	1,86	-0,08

b) Método de cálculo directo:

$$d = \sqrt{\frac{E \cdot \lambda \cdot Z \cdot (\text{VAN}) \cdot (\theta_i - \theta_e)}{I'}} - \frac{\lambda}{h_e} \quad (\text{m})$$

$$d = \sqrt{\frac{0,06 \cdot 1,28 \cdot 10^{-5} \cdot 8000 \cdot 10,562 \cdot 380}{186,31}} - \frac{0,06}{12} = 0,365 - 0,005 = 0,36 \text{ m}$$

Ejemplo 2:

En este caso se trata de una tubería de proceso de la que se requiere calcular el espesor óptimo económico para un aislamiento en lana de vidrio ISOVER (COQUILLA ISOVER).

Los datos de partida son:

- Tubería de acero galvanizado de 4" (114 mm de diámetro)
- Temperatura interior = 200 °C
- Temperatura ambiente = 20 °C
- Coef. de conductividad medio entre 20 y 200 °C, $\lambda = 0,046 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
- Coeficiente superficial externo, $h_e = 12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Inversión en aislamiento:

Para 40 mm de espesor 21,33 €/m
 60 mm de espesor 28,84
 80 mm de espesor 37,20
 90 mm de espesor 41,46
 100 mm de espesor 46,87

El resto de los datos necesarios, idénticos a los del ejemplo 1.

El método de cálculo será el mismo que el del ejemplo 1, Método General de cálculo, con algunas diferencias:

(2) PÉRDIDAS DE ENERGÍA en cada espesor del aislamiento, serán ahora:

$$q = \frac{\theta_i - \theta_e}{\frac{1}{\pi \cdot h_e \cdot D_e} + \frac{\ln \frac{D_e}{D_i}}{2\pi\lambda}} \quad (\text{W/m})$$

donde D_i = Diámetro interno del aislamiento 0,114 m

D_e = Diámetro externo del aislamiento = 0,114 + 2d

En este caso, las pérdidas de energía están referidas a metro lineal de tubería, lo mismo que las inversiones.

TABLA

(1) ESPESOR de AISLAM. d(m)	(2) PÉRDIDAS de ENERGÍA (W/m)	(3) VALOR de (2) €/(\text{m}^2 \cdot \text{año})	(4) VALOR de (3) en PERÍOD. (€/m)	(5) INCREM. de AHORRO (€/m)	(6) INCREM. de INVERSIONES (€/m)	(7) DIFERENCIA (5) - (6) (€/m)
0,04	92	9,47	99,98			
0,05	70	7,21	76,11	23,87	7,51	16,35
0,08	58	5,97	63,03	13,08	8,35	4,72
0,09	54	5,55	58,68	4,36	4,27	0,09
0,10	51	5,25	55,42	3,26	5,40	-2,14

El espesor económico en este caso será 0,09 m.