

**2-1 Espesor óptimo versus espesor ideal**

Cuando en el presente trabajo se habla de “espesor matemáticamente óptimo”, significa que con las premisas consideradas los beneficios económicos son los máximos. Sin embargo, con más aislamiento los ahorros siguen incrementándose, aunque los beneficios económicos comienzan a disminuir. Desde el punto de vista de ahorro energético y de emisiones de CO<sub>2</sub>, el aislamiento ideal teórico, sería aquel en que se produzcan los máximos ahorros sin ningún coste económico. En la gráfica se ha llamado “espesor de aislamiento ideal”, a aquel punto en el que obtenemos el máximo de ahorro energético pero ningún beneficio económico.

**2-2 Modelo de cálculo para el aislamiento óptimo**

Con el objetivo de encontrar el aislamiento óptimo, se ha usado un análisis de coste-beneficio. Este modelo de cálculo es similar al usado en el informe de ECOFYS: "Cost-Effective Climate Protection in the EU building stock":

Para realizar esto, se creó una función “beneficio económico” (B (e)) definida como la diferencia entre “ingresos” (I (e)) (costes anuales totales derivados del ahorro cuando se aumenta el aislamiento) y “gastos” (G (e)) (Coste anual de la inversión al aumentar el aislamiento).

Esto es:

$$B(e) = I(e) - G(e)$$

Para obtener el máximo de la función, esto es, el máximo del “Beneficio económico”, se debe derivar la función resultado e igualarla a cero (para verificar que B(e) es el máximo de la función, debe chequearse que la segunda derivada es menos que cero).

B (e) es máximo:

$$\forall e / \frac{\partial B'(e)}{\partial e} = 0$$

Siendo “e” el aumento óptimo del grosor resultando el máximo beneficio.

En nuestro caso, el “Ingreso” se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$I(e) = \Delta\Sigma \times P_{energía}$$

Siendo:

$\Delta\Sigma$ : Aumento de la energía ahorrada como resultado del aumento en “e” cm del grosor del aislamiento sobre el mínimo necesario para satisfacer los requerimientos establecidos por el CTE para el valor de U.

P<sub>energía</sub>: Precio medio de la energía durante el tiempo equivalente a la vida del aislamiento.

Y los “Gastos” vienen expresados en la siguiente fórmula:

$$G(e) = Ct_{aislamiento} \times Anualidad \times Fc$$

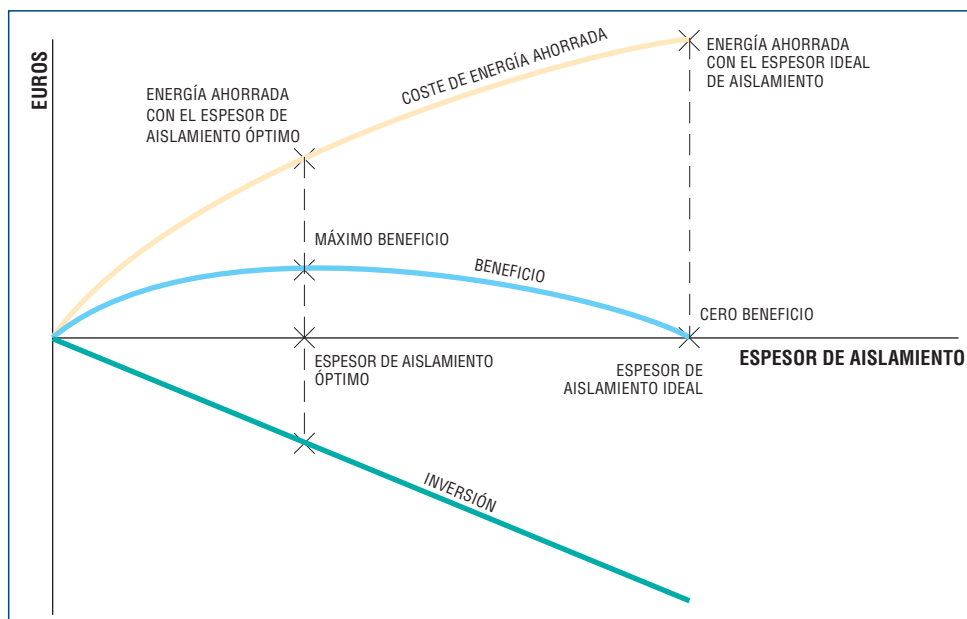
Ct<sub>aislamiento</sub> = Coste Aislamiento + Gastos generales + Beneficio industrial + Impuestos

Anualidad se expresa como:

$$Anualidad = \frac{(1 + i)^n * i}{(1 + i)^n - 1}$$

i = Ratio de interés  
 n = Vida del aislamiento  
 Fc = Factor de conversión. (1)

Figura 4: Ideal y óptimo espesor de aislamiento

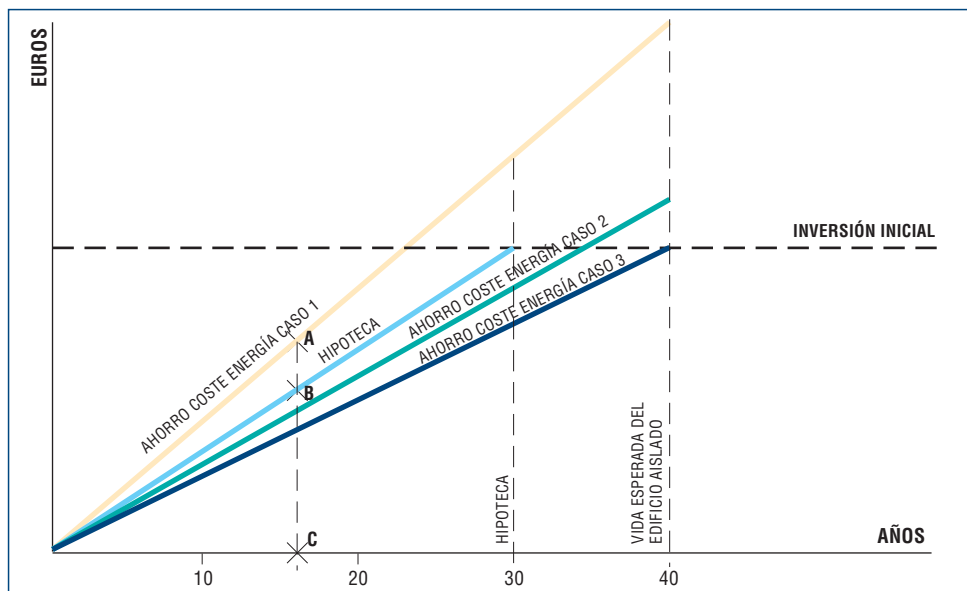


### 2-3 Amortización

Cuando se habla en el estudio de amortización, nos estamos refiriendo al número de años en que los “costes de energía ahorrada” igualarán a la inversión inicial realizada. Para el estudio realizado se ha considerado un periodo de amortización del aislamiento de 40 años, estimando que es el tiempo que tarda un edificio en ser rehabilitado integralmente y el momento en que posiblemente, se mejore o cambie el aislamiento de la envolvente a pesar de que éste pudiera encontrarse en buenas condiciones.

Independientemente del tiempo de uso del aislamiento sin ser modificado, existe el concepto del tiempo de hipoteca. Cuando se compra una casa se solicita una hipoteca, que establece el número de años que tardará en devolverse el préstamo. Si estimamos que el tiempo de hipoteca del aislamiento incluido en la vivienda es de 30 años, podemos realizar la siguiente gráfica simplificada (suponiendo que tanto los “costes de energía ahorrados” como los “costes de la hipoteca” siguen una tendencia lineal):

Figura 5: Amortizaciones



En esta gráfica se han representado 3 casos:

- **Caso 1:** Se corresponde con el caso en el que se generan unos ahorros en el coste de la energía, que hacen que se amortice la inversión inicial en aislamiento antes de que transcurra el tiempo de hipoteca (en este caso 30 años). Esto significa, que para cada año transcurrido, la diferencia entre los ahorros en el coste de la energía (A) y el coste de la hipoteca (B) es siempre positivo, por lo que desde el primer año, se estarían obteniendo beneficios.
- **Caso 2:** Se corresponde con un caso en el que se generan unos ahorros en el coste de la energía, que hacen que se amortice la inversión inicial en aislamiento después de que transcurra el tiempo de hipoteca (en este caso 30 años) pero antes de que expire el “lifetime” del mismo. En este caso los beneficios económicos se comenzarán a recibir en el momento que los ahorros en el coste de la energía iguallen la inversión inicial, pero año tras año no se ganará dinero, como en el caso 1.
- **Caso 3:** Se corresponde con un caso en el que se generan unos ahorros en el coste de la energía, que hacen que se amortice la inversión inicial en aislamiento después de que transcurra el tiempo de hipoteca (en este caso 30 años) y justo en el “lifetime” del aislamiento que se ha considerado (en este caso 40 años). Significa que al cabo de 40 años, se recuperará la inversión inicial, que ni se perderá ni ganará dinero, y que año tras año no se ganará dinero, como ocurría en el caso 1.

## 2-4 Requerimientos del CTE para cada zona climática

Los modelos de edificios usados en el E4 cumplen con las características de aislamiento térmico requeridas por el CTE para las zonas climáticas B4, D3, y E1. y son las mismas que se usan en el presente estudio. Adaptar los edificios de referencia a los requerimientos del CTE para cada una del resto de las zonas climáticas ha requerido solamente adaptar el espesor de aislamiento al valor U de transmitancia requerido en cada zona climática.

**Tabla 5:** Valor U para cada una de las diferentes zonas climáticas

Zonas climáticas	Valores U (W/m <sup>2</sup> K)		
	Fachadas	Cubiertas	Superficies en contacto con espacios calefactados
A3 - Málaga	0,94	0,50	0,94
A4 - Almería	0,94	0,50	0,94
B3 - Valencia	0,82	0,45	0,82
B4 - Sevilla	0,82	0,45	0,82
C1 - A Coruña	0,73	0,41	0,73
C2 - Barcelona	0,73	0,41	0,73
C3 - Granada	0,73	0,41	0,73
C4 - Cáceres	0,73	0,41	0,73
D1 - Pamplona	0,66	0,38	0,66
D2 - Valladolid	0,66	0,38	0,66
D3 - Madrid	0,66	0,38	0,66
E1 - Burgos	0,57	0,36	0,57

(\*) De acuerdo con el criterio empleado en los modelos del documento E4, los valores de transmitancia U, usados para el área en contacto con espacios no calefaccionados serán los mismos que los empleados en las fachadas.

Para cumplir con los requerimientos del CTE en los modelos constructivos definidos en el E4 los espesores en fachadas y cubiertas son los siguientes:

**Tabla 6:** Total espesor de aislamiento por zonas climáticas

Zonas climáticas	Total espesor aislamiento (cm)		
	Fachadas	Cubiertas	Superficies en contacto con espacios no calefactados
A3 - Málaga	3,0	6,0	2,5
A4 - Almería	3,0	6,0	2,5
B3 - Valencia	3,5	6,6	3,5
B4 - Sevilla	3,5	6,6	3,5
C1 - A Coruña	4,3	7,5	3,8
C2 - Barcelona	4,3	7,5	3,8
C3 - Granada	4,3	7,5	3,8
C4 - Cáceres	4,3	7,5	3,8
D1 - Pamplona	4,7	8,3	4,1
D2 - Valladolid	4,7	8,3	4,1
D3 - Madrid	4,7	8,3	4,1
E1 - Burgos	5,8	9,3	5,1

### Ventanas

En relación a las ventanas, se ha optado por los mismos valores que en los modelos del E4.

**Tabla 7:** Valor U y factor solar para viviendas unifamiliares y en bloque

Zonas climáticas	Vivienda Familiar		Bloque de Viviendas	
	U (W/m <sup>2</sup> K)	Factor Solar	U (W/m <sup>2</sup> K)	Factor Solar
A3 - Málaga	3,00	0,72	3,40	0,55
A4 - Almería	3,00	0,72	3,40	0,55
B3 - Valencia	3,00	0,72	3,40	0,55
B4 - Sevilla	3,00	0,72	3,40	0,55
C1 - A Coruña	2,50	0,72	3,00	0,72
C2 - Barcelona	2,50	0,72	3,00	0,72
C3 - Granada	2,70	0,72	3,20	0,72
C4 - Cáceres	2,70	0,72	3,20	0,72
D1 - Pamplona	2,20	0,72	2,70	0,72
D2 - Valladolid	2,20	0,72	2,70	0,72
D3 - Madrid	2,20	0,72	2,70	0,72
E1 - Burgos	2,20	0,72	2,70	0,72

## 2-5 Valores óptimos de aislamiento obtenidos y selección final

Con los modelos de cálculo y los parámetros mencionados anteriormente, se ha desarrollado un análisis óptimo del grosor del aislamiento y de la amortización, teniendo en cuenta las siguientes variables:

#### — Tipo de vivienda:

- Vivienda individual
- Bloque de viviendas

#### — Zona climática:

- Burgos E1
- Madrid D3
- Sevilla B4

**2-6 Espesor óptimo de aislamiento adicional**

En la siguiente tabla se resume el aumento óptimo de aislamiento para cada caso considerado. Este aumento óptimo del grosor refleja únicamente el grosor del aislamiento que hace que la función “Beneficio económico” sea máxima, independientemente del periodo de amortización de la inversión inicial, considerando el siguiente escenario:

- Precio del aislamiento: 36 €/m<sup>3</sup>
- Ratio de incremento anual del precio de la energía 1,5%

**Tabla 8: Espesor óptimo de aislamiento adicional**

Zonas Climáticas	Viviendas Individuales	Bloques de Viviendas
B4	5,02	6,83
D3	9,16	8,32
E1	13,27	14,21

Elegir un grosor adicional óptimo de aislamiento es una tarea complicada, especialmente teniendo en cuenta la situación real en España:

- La realidad de la edificación en España es que se considera un coste extra equivalente al área perdida por el aumento del aislamiento. No aumentarlo podría ser económicamente defendible. Esto no debería aplicarse al aislamiento del tejado, ya que no hay pérdida de espacio al aumentar el aislamiento de los tejados.
- El hecho en España es que no se instala una gran cantidad de aislamiento en nuevas edificaciones si lo comparamos con los países del norte de Europa. Por lo tanto, el óptimo matemático obtenido parece ser un poco alto comparado con los grosores que se están instalando en la actualidad en España.

Sin embargo, cualquier “aislamiento óptimo” diferente del óptimo matemático, será siempre una decisión subjetiva.

Por esto desde nuestro punto de vista, debería elegirse un valor cercano a los valores óptimos con la fórmula. Cualquier otra consideración será difícil de justificar.

Por otro lado, considerar el óptimo matemático significaría tener dos escenarios extremos: en un extremo estaría el escenario E4 y en el otro extremo el escenario ideal. Aunque el ideal no sería un escenario alcanzable en la actualidad, esto significaría conocer cuál es el aislamiento potencial (para los modelos usados y para las consideraciones realizadas en este estudio) y serviría como punto objetivo.

Debido a las razones mencionadas, el aumento de aislamiento propuesto está cerca de los valores de aislamiento óptimo obtenidos para el modelo de una vivienda individual. (Se propone el aislamiento óptimo obtenido para el modelo de una vivienda individual y no el obtenido para un bloque de viviendas continuando en la línea conservativa seguida en el resto del estudio). El aislamiento adicional propuesto es:

**Tabla 9: Espesor adicional**

Aislamiento Adicional	
Zonas Climáticas	Espesores propuestos
B4	5,00
D3	9,00
E1	13,00

## 2-7 Espesores óptimos para cada zona climática

Una vez se ha obtenido el aumento óptimo de aislamiento para cada zona climática de referencia (B4, D3 y E1) es necesario decidir una valor óptimo para el resto de zonas climáticas.

Para estar en consonancia con el criterio del CTE, se ha propuesto agrupar las zonas climáticas siguiendo los requerimientos del CTE para el valor de U que ya tiene en cuenta la severidad del clima para cada zona.

Siguiendo este criterio, se han realizado los siguientes grupos:

- A3 (Málaga), A4 (Almería) y B3 (Valencia), se simularán con el aislante óptimo obtenido para B4 (Sevilla)
- C1 (A Coruña), C2 (Barcelona), C3 (Granada), C4 (Cáceres), D1 (Pamplona) y D2 (Valladolid) se simularán con el aislante óptimo definido para D3 (Madrid)
- E1 con su propio aislante óptimo.

Adoptar este criterio está en línea con el criterio del CTE relacionado con el criterio climático, los valores de U y el correspondiente grosor de aislamiento, como puede observarse en la tabla de abajo donde se han representado el aislamiento total necesario para alcanzar los valores del CTE y los valores de U.

Además, la tabla incluye el aumento óptimo de aislamiento (cm), y el correspondiente valor de U para la nueva definición de edificación. El aislamiento total se ha redondeado para la simulación para obtener grosores de aislamiento comerciales.

**Tabla 10:** Espesores adicionales y totales por zonas climáticas

Zonas Climáticas	CTE				CTE-PLUS Óptimo propuesto						Total Aislamiento (cm) Óptimo propuesto	
	Fachadas		Cubiertas		Fachadas			Cubiertas			Fachadas	Cubiertas
	Aislamiento (cm)	Valor U (W/m <sup>2</sup> K)	Aislamiento (cm)	Valor U (W/m <sup>2</sup> K)	Adicional (cm)	Total (cm)	Valor U (W/m <sup>2</sup> K)	Adicional (cm)	Total (cm)	Valor U (W/m <sup>2</sup> K)	(cm)	(cm)
A3 - Málaga	3,00	0,94	6,00	0,50	5,00	8,00	0,45	5,00	11,00	0,27	8,00	11,00
A4 - Almería	3,00	0,94	6,00	0,50	5,00	8,00	0,45	5,00	11,00	0,27	8,00	11,00
B3 - Valencia	3,50	0,82	6,60	0,45	5,00	8,50	0,42	5,00	11,60	0,26	9,00	12,00
B4 - Sevilla	3,50	0,82	6,60	0,45	5,00	8,50	0,42	5,00	11,60	0,26	9,00	12,00
C1 - A Coruña	4,30	0,73	7,50	0,41	9,00	13,30	0,29	9,00	16,50	0,22	13,00	17,00
C2 - Barcelona	4,30	0,73	7,50	0,41	9,00	13,30	0,29	9,00	16,50	0,22	13,00	17,00
C3 - Granada	4,30	0,73	7,50	0,41	9,00	13,30	0,29	9,00	16,50	0,22	13,00	17,00
C4 - Cáceres	4,30	0,73	7,50	0,41	9,00	13,30	0,29	9,00	16,50	0,22	13,00	17,00
D1 - Pamplona	4,70	0,66	8,30	0,38	9,00	13,70	0,28	9,00	17,30	0,21	14,00	17,00
D2 - Valladolid	4,70	0,66	8,30	0,38	9,00	13,70	0,28	9,00	17,30	0,21	14,00	17,00
D3 - Madrid	4,70	0,66	8,30	0,38	9,00	13,70	0,28	9,00	17,30	0,21	14,00	17,00
E1 - Burgos	5,80	0,57	9,30	0,36	13,00	18,80	0,21	13,00	22,30	0,17	19,00	22,00