iiTer
Investigación y Transferencia Tecnológica
Ingeniería Térmica

Fachada ventilada modular con vidrio fotovoltaico y lámina electrocrómica (modelo de utilidad ES 1 328 106 U): comportamiento energético e impacto

INFORME TÉCNICO



Grupo de Investigación en Ingeniería Térmica (iiTer, TEP-221)
Universidad de Cádiz

Versión 03 (21 de noviembre de 2026)

Contenido

1 INTRODUCCIÓN 6

1.1 OBJETO 6
1.2 ALCANCE 6
1.3 EQUIPO TÉCNICO 6
1.4 METODOLOGÍA Y FUENTES 6

1.4.1 Normativa y marco de referencia 7

2 DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN 8

2.1 DATOS DE PROTECCIÓN 8
2.2 COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO 8
2.3 ESTADO DE DESARROLLO 9

3 MODELO DE CÁLCULO 10

3.1 ESPACIOS, CLIMA Y USO 10
3.2 COMPONENTE PROPIO: HOJA EXTERIOR, CÁMARA Y CONTROL 10
3.3 SOLUCIONES DE COMPARACIÓN 11
3.4 VERIFICACIÓN CON EL MODELO NATIVO DE ENERGYPLUS 11
3.5 LÍMITES DEL MODELO 12

4 RESULTADOS ENERGÉTICOS 13

4.1 BALANCE EN UNA OFICINA DE MADRID, FACHADA SUR 13
4.2 EFECTO TÉRMICO POR CLIMA Y USO 14
4.3 CLIMA 15
4.4 ORIENTACIÓN 15
4.5 FUNCIONAMIENTO DE LA CÁMARA Y DE LA LÁMINA 16
4.6 AISLANTE Y LÁMINA 16
4.7 ASPECTO DE LA FACHADA 17
4.8 DÓNDE GANA Y DÓNDE PIERDE 17

5 IMPACTO ECONÓMICO 18

5.1 PRECIOS Y COSTES DE REFERENCIA 18
5.2 COSTE ESTIMADO Y COSTE MÁXIMO ADMISIBLE 18

6 IMPACTO AMBIENTAL 20

6.1 ENERGÍA PRIMARIA Y CO_2 EVITADOS 20
6.2 CICLO DE VIDA SIMPLIFICADO 20

7 IMPACTO SOCIAL Y NORMATIVO 21

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 22

8.1 CONCLUSIONES 22
8.2 RECOMENDACIONES 22

9 REFERENCIAS 23

Resumen ejecutivo

Objeto

El presente informe evalúa, con una simulación energética horaria de un año completo, el comportamiento y el impacto económico, ambiental y social del dispositivo del modelo de utilidad ES 1 328 106 U, titularidad de la Universidad de Cádiz: una fachada ventilada modular sobre el muro opaco con vidrio fotovoltaico transparente, lámina electrocrómica, cámara de aire con compuertas y aislante, en un despacho de oficinas y en una vivienda.

Metodología

Simulación anual con EnergyPlus 26.2 con los perfiles de uso del CTE (oficina de 12 h y carga media; residencial privado), en seis capitales de cinco zonas climáticas y cinco orientaciones, con clima PVGIS 5.3 y paso de 10 minutos. La hoja exterior y la cámara se programan como componente propio (PythonPlugin) que impone a EnergyPlus las condiciones de la cara exterior del aislante; el mismo componente aplica el control de la memoria (compuertas cerradas y lámina clara cuando el espacio pide calor; abiertas y lámina oscura con sol cuando sobra) y calcula la electricidad. Se verifica con la cámara ventilada nativa de EnergyPlus y se compara con la fachada ventilada convencional, la fotovoltaica opaca y el vidrio fotovoltaico semitransparente sin lámina ni control.

Resultados

- La hoja exterior apenas cambia el consumo de climatización de un muro aislado según el CTE: en una oficina de Madrid con fachada sur, todas las soluciones quedan a menos de 10 kWh por m² de fachada y año de la fachada ventilada convencional.
- Un vidrio fotovoltaico semitransparente sin control sí calienta el muro: añade 4,7 kWh/m² (a-Si al 30 %) y 9,0 kWh/m² (vidrio de transmisión 0,5). La lámina y las compuertas de la patente reducen esa penalización un 51 % y un 70 %, que es el problema que plantea la memoria.
- El balance lo decide la electricidad: la patente con a-Si al 30 % ahorra **25 kWh/m²·año** y con un vidrio de transmisión 0,5 y 10 % de rendimiento, **105 kWh/m²**; una fachada fotovoltaica opaca, 224 kWh/m².
- Reducir el aislante a la mitad baja el consumo de una oficina (se disipan mejor las ganancias internas) con o sin la patente; en vivienda, la patente con un cuarto del aislante calienta el muro en invierno lo bastante para quedar como la fachada convencional con la mitad.
- Coste estimado de la patente: 702 €/m², frente a 462 €/m² de una fachada ventilada fotovoltaica y 130 €/m² de una de gres. Con lo que ahorra, su coste no debería pasar de 172 €/m² (a-Si) o 365 €/m² (vidrio τ 0,5): la lámina y las compuertas no se pagan con energía; se justifican por la estética del vidrio transparente o de color sin sobrecalentar el muro.

Recomendaciones

- Ofrecerla a fabricantes de fachada ventilada y de vidrio fotovoltaico como la forma de usar vidrio transparente o de color sobre muro opaco sin penalización térmica, en oficinas y rehabilitación, con el vidrio de mayor rendimiento posible.
- Para el desarrollo: lámina de consumo casi nulo en mantenimiento (a 1 W/m² la lámina se come una parte del ahorro), estudiar el espesor de aislante caso a caso y ensayar un prototipo que calibre el modelo.

Lista de Tablas

Tabla 1. Datos de protección del modelo de utilidad ES 1 328 106 U. 8
Tabla 2. Parámetros principales de la hoja exterior y de la cámara. 11
Tabla 3. Consumo de climatización del espacio con la fachada ventilada convencional: modelo propio frente a la cámara ventilada nativa de EnergyPlus (fachada sur). 11
Tabla 4. Resultados por m² de fachada y año (kWh). Oficina, Madrid, fachada sur. 13
Tabla 5. Ahorro eléctrico total frente a la fachada convencional por ciudad (kWh/m² de fachada y año). Oficina, fachada sur. 15
Tabla 6. Ahorro según la orientación (kWh/m² de fachada y año). Oficina, Madrid. 15
Tabla 7. Sensibilidad al espesor de aislante y al consumo de la lámina. Madrid, fachada sur. Calefacción: demanda anual del espacio; total: consumo de climatización menos FV neta por m² de fachada. 16
Tabla 8. Valoración estética de las soluciones (criterio del grupo). 17
Tabla 9. Precios y costes empleados (sin IVA). 18
Tabla 10. Coste de inversión estimado de la patente por m² de fachada. 18
Tabla 11. Comparación económica por m² de fachada. Oficina, Madrid, fachada sur. El coste máximo admisible descuenta el revestimiento de gres que se sustituye. 18
Tabla 12. Energía primaria no renovable y CO_2 evitados al año frente a la fachada convencional (factores del RITE). Oficina, fachada sur. 20
Tabla 13. Huella de carbono de fabricación estimada de la hoja exterior de la patente, de la cuna a la puerta (por m²). 20

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema del módulo y de sus dos modos (página web del modelo de utilidad). 9
Figura 2. Verificación: modelo propio frente al nativo de EnergyPlus. 12
Figura 3. Ahorro eléctrico frente a la fachada ventilada convencional. Oficina, Madrid, fachada sur. 13
Figura 4. Climatización ahorrada frente a la fachada convencional por ciudad. Oficina, fachada sur. 14
Figura 5. Climatización ahorrada frente a la fachada convencional por ciudad. Vivienda, fachada sur. 14
Figura 6. Ahorro eléctrico total por ciudad. Oficina, fachada sur. 15
Figura 7. Temperaturas del vidrio, de la cámara y del aislante en tres días de invierno y tres de verano. Vivienda, Madrid, fachada sur. 16
Figura 8. Aspecto de cada solución (fotos ilustrativas) y valoración estética del grupo. 17
Figura 9. Coste estimado y coste máximo admisible por m² de fachada. Oficina, Madrid, fachada sur. 18

1 Introducción

1.1 Objeto

El presente informe recoge el estudio técnico de la invención “Dispositivo modular de control de la demanda energética integrable en la envolvente opaca de los edificios”, modelo de utilidad ES 1 328 106 U, de la que es titular la Universidad de Cádiz y cuyos inventores pertenecen al Grupo de Investigación en Ingeniería Térmica (iiTer, TEP-221).

Su finalidad es cuantificar, con un modelo de cálculo reproducible y fuentes verificadas, el efecto del dispositivo sobre el consumo de climatización de un edificio, la electricidad que produce, cómo se compara con las fachadas ventiladas disponibles en el mercado y qué impacto económico, ambiental y social cabe esperar. El informe sirve de base técnica a la página del modelo de utilidad en la web del grupo y a los contactos con posibles licenciatarios.

1.2 Alcance

El estudio comprende:

- Descripción de la invención según la memoria publicada.
- Simulación anual con EnergyPlus (8.760 horas) de un despacho de oficinas y de una pieza de vivienda con cada fachada.
- Escenarios en seis capitales de cinco zonas climáticas del CTE y cinco orientaciones, y un análisis de sensibilidad del espesor de aislante y del consumo de la lámina en Madrid.
- Comparación con la fachada ventilada convencional, la fachada ventilada fotovoltaica opaca y el vidrio fotovoltaico semitransparente sin lámina ni control.
- Análisis económico, ambiental (energía primaria, CO_2 y huella de fabricación simplificada) y social.

No existe todavía un prototipo del dispositivo. Las cifras son estimaciones de diseño con componentes de catálogo y deberán contrastarse con ensayos.

1.3 Equipo técnico

Ismael Rodríguez Maestre, Ingeniero Industrial por la Universidad de Sevilla, Catedrático de Universidad de la Universidad de Cádiz y responsable del Grupo de Investigación en Ingeniería Térmica (TEP-221).

Inventores: Ismael Rodríguez Maestre, Pascual Álvarez Gómez, Juan Luis Foncubierta Blázquez, Francisco Javier González Gallero, Gabriel González Siles, María Jesús Jiménez Come y Jesús Daniel Mena Baladés.

1.4 Metodología y fuentes

Se ha seguido el procedimiento siguiente:

- Lectura de la memoria del modelo de utilidad publicada por la OEPM y de la documentación del grupo sobre el estado de la técnica.
- Simulación anual con EnergyPlus 26.2 [1]: despacho y vivienda, muro, ventana, cargas y climatización con los objetos estándar del programa; la hoja exterior, la cámara, la lámina, las compuertas y su control como componente propio (PythonPlugin). Verificación con el modelo nativo de cámara ventilada de EnergyPlus.
- Año meteorológico tipo de PVGIS 5.3 (JRC, SARAH3/ERA5) [2], el mismo del estudio de la patente ES 2 784 465 del grupo.
- Perfiles de uso del documento reconocido de condiciones técnicas (2026) [3] y del CTE DB-HE, anejo D [4]; transmitancias límite del DB-HE; caudal de aire exterior y recuperación de calor del RITE [5].
- Propiedades del vidrio fotovoltaico y de la lámina electrocrómica de las fichas de sus fabricantes y de la literatura [6-8]; precios de Eurostat [9]; costes de SUPSI y de CYPE [10, 11]; factores de paso del RITE y del MITECO [12].

Los scripts, los datos climáticos y las tablas de resultados se entregan junto a este informe (carpeta ESTUDIOS_WEB). Cada dato externo figura con su fuente, página y dirección en el documento de fuentes verificadas de esa carpeta.

1.4.1 Normativa y marco de referencia

- Ley 24/2015, de 24 de julio, de Patentes (modelos de utilidad, título XIII).
- Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, Código Técnico de la Edificación, y Real Decreto 732/2019 (DB-HE 2019).
- Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.
- Documento reconocido “Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios” (MITECO, aplicable desde el 30-09-2026).
- Directiva (UE) 2024/1275, de 24 de abril de 2024, relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición).

2 Descripción de la invención

2.1 Datos de protección

Concepto	Dato
Título	Dispositivo modular de control de la demanda energética integrable en la envolvente opaca de los edificios
Modalidad	Modelo de utilidad ES 1 328 106 U (solicitud U202531827, por cambio de modalidad de la P202330230)
Fechas	Presentación 20-03-2023; publicación 18-03-2026; concesión 02-06-2026 (BOPI de 08-06-2026)
Vigencia	Diez años desde el 20-03-2023
Clasificación	E04B 1/76, E04B 2/88, G02F 1/15, H01L 31/048
Titular	Universidad de Cádiz (100 %)
Situación comercial	Disponible para licencia a través de la OTRI de la Universidad de Cádiz

Tabla 1. Datos de protección del modelo de utilidad ES 1 328 106 U.

2.2 Componentes y funcionamiento

El dispositivo es un módulo que, ensamblado en horizontal y en vertical, forma una fachada ventilada sobre el muro de un edificio nuevo o existente. Consta de:

- Vidrio fotovoltaico transparente en el espectro visible (1), que produce electricidad y forma la cara vista.
- Lámina electrocrómica (2) adherida al vidrio, que cambia su transmisión con la tensión que le da el propio vidrio.
- Cámara de aire (3) con lamas o compuertas (6) abajo y arriba, que la dejan circular (por convección natural o forzada) o la cierran.
- Aislante térmico (4) y elementos de sujeción (5) al muro.

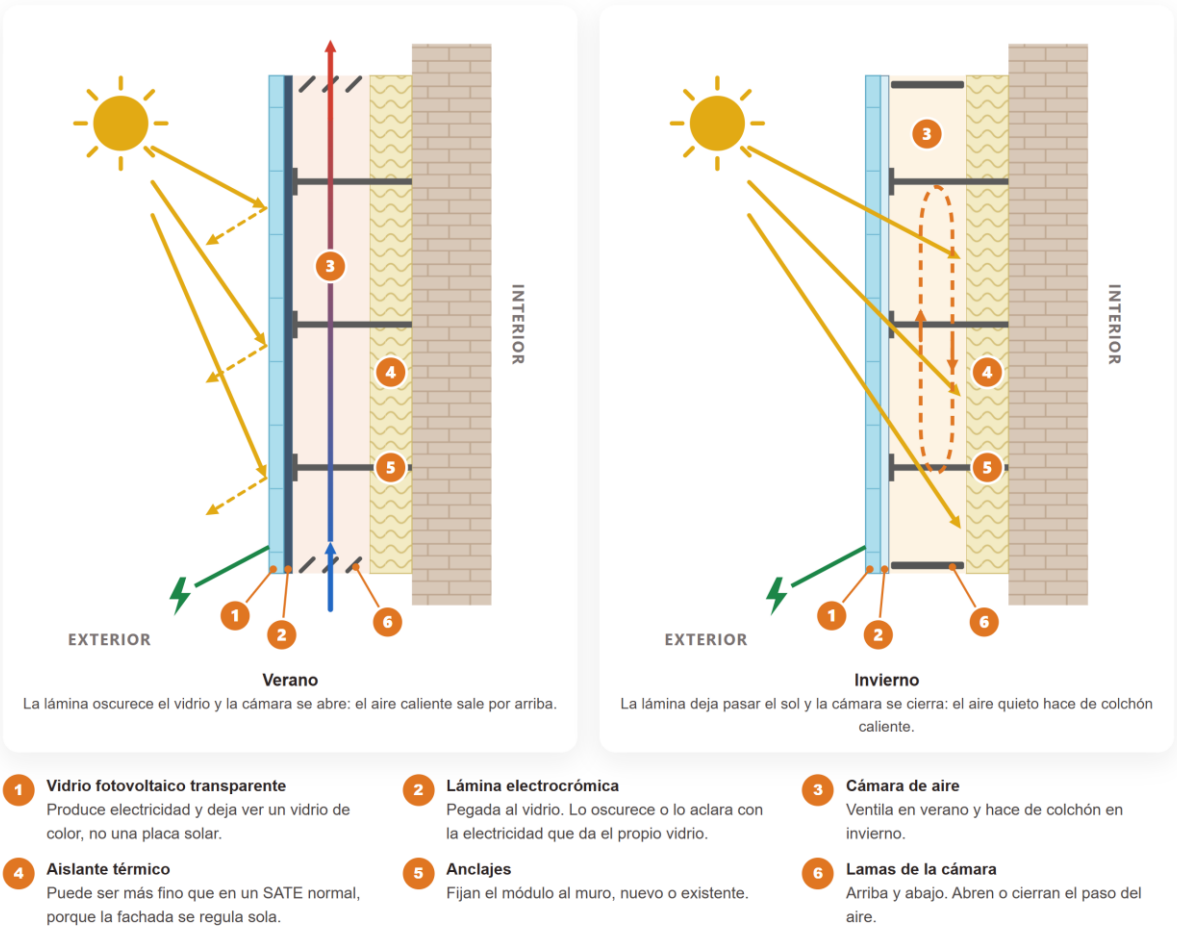


Figura 1. Esquema del módulo y de sus dos modos (página web del modelo de utilidad).

Según la memoria, el control regula la radiación que llega al aislante y la circulación del aire: en invierno, cámara cerrada y lámina clara para que el sol caliente el aislante; en verano, cámara abierta y lámina oscura para disipar el calor. Eso permitiría reducir el aislante manteniendo el comportamiento en calefacción y facilitar la disipación de las ganancias internas de los edificios terciarios en refrigeración. El problema que resuelve es el sobrecalentamiento que causa un vidrio fotovoltaico transparente, preferido por estética, frente al opaco de silicio cristalino.

2.3 Estado de desarrollo

La memoria deja las propiedades del vidrio, de la lámina, de la cámara y del aislante a un proceso de optimización para cada edificio y clima. No se ha construido todavía un prototipo. Este estudio usa componentes de catálogo: vidrio de silicio amorfo al 30 % y, como alternativa de mayor transparencia, el vidrio con células espaciadas del estudio de la patente ES 2 784 465.

3 Modelo de cálculo

El cálculo se hace con EnergyPlus 26.2 [1]. EnergyPlus resuelve el clima, la radiación sobre la fachada, el muro (aislante, ladrillo y enlucido, por funciones de transferencia), la ventana, las cargas internas y la climatización con un paso de 10 minutos. La hoja exterior y la cámara de la patente, que EnergyPlus no tiene, se programan como componente propio.

3.1 Espacios, clima y uso

- Despacho de fachada de 6 × 5 × 3 m en una planta intermedia (solo la fachada da al exterior) con una ventana de 4,8 × 1,5 m. En la fachada, el antepecho y el dintel (8,4 m²) llevan la fachada ventilada que se estudia; la ventana y sus machones son iguales en todos los casos. Uso de oficina del documento reconocido [3] (12 h, carga media: 6,00 W/m² de ocupación sensible, 3,79 latentes y 4,50 de equipos; 20/25 °C en horas de uso), iluminación de 8 W/m² con regulación por luz natural, aire exterior de 1,25 l/s·m² con recuperador del 73 % [5].
- Pieza de vivienda de las mismas dimensiones con una ventana de 2,4 × 1,5 m y el perfil residencial del DB-HE (anejo D: cargas por franja horaria, 17/20 °C en invierno, 25/27 °C de junio a septiembre) y 0,63 ren/h [3, 4].
- Muro de ladrillo de medio pie con el aislante justo para la transmitancia límite de cada zona (fachada ventilada: la hoja exterior no cuenta): Cádiz 26 mm, Sevilla 32 mm, Barcelona 45 mm, Bilbao 45 mm, Madrid 54 mm, Burgos 67 mm.
- Climatización ideal; consumo eléctrico con una bomba de calor de rendimientos estacionales mínimos de la UE (SCOP 3,5, SEER 4,1) [13].
- Clima PVGIS 5.3 de Cádiz (A3), Sevilla (B4), Barcelona (C2), Bilbao (C1), Madrid (D3) y Burgos (E1), en hora oficial.

3.2 Componente propio: hoja exterior, cámara y control

La cara exterior del aislante es en EnergyPlus una superficie con condición de contorno impuesta (SurfaceProperty:OtherSideConditionsModel). En cada paso, antes del balance de superficies, el componente calcula el estado de la hoja y de la cámara con la temperatura del aislante del paso anterior y le impone a EnergyPlus la temperatura y el coeficiente de convección del aire de la cámara (con la radiación que atraviesa el vidrio y absorbe el aislante sumada como temperatura equivalente) y la temperatura y el coeficiente de radiación del vidrio. Por m² de fachada:

- Vidrio y lámina: un nodo con capacidad, resuelto de forma implícita. Absorbe la radiación que ni transmite, ni refleja, ni convierte en electricidad; pierde hacia fuera por convección ($h_c = 4 + 4 \cdot v$, ISO 6946) y por radiación al cielo y al suelo, y hacia dentro por convección con el aire de la cámara y radiación con el aislante.
- Cámara de 50 mm y 3 m de altura: aire con temperatura media entre la de entrada y la de salida; caudal por tiro térmico entre rejillas de 10 mm (coeficiente de descarga 0,6); con las compuertas cerradas queda un 5 % de fuga.
- Aislante con membrana negra (absortividad 0,9) que recibe la radiación transmitida.
- Electricidad: $P = \eta \cdot G \cdot (1 + \gamma \cdot (T_c - 25))$ con la temperatura de célula igual a la del vidrio y un 90 % de rendimiento del sistema eléctrico, igual que en el estudio de la patente ES 2 784 465. Se descuentan el consumo de la lámina (1 W/m² mientras está oscura [8]) y 0,2 W/m² de control y compuertas.
- Control (patente): si la temperatura operativa del espacio es inferior a 22,5 °C (pide calor), compuertas cerradas y lámina clara; si es superior, compuertas abiertas y lámina oscura con más de 150 W/m² sobre la fachada.

Parámetro	Valor	Fuente
Vidrio a-Si 30 %: η, τsol, γ	2,8 %; 18,6 %; −0,19 %/K	Onyx Solar [6]
Vidrio de alta transparencia: η, τsol	10 %; 50 %	Estudio de la patente ES 2 784 465
Vidrio c-Si opaco: η, γ	20 %; −0,35 %/K	Hipótesis sobre fichas de módulos de 22-24 %
Lámina electrocrómica: τsol clara / oscura	0,55 / 0,15	Derivado de ConverLight laminado [7]
Lámina: consumo en estado oscuro	1 W/m² (0,05 en la sensibilidad)	LBNL; ConverLight [8]
Cámara: espesor, altura, rejillas	50 mm; 3 m; 10 mm	Hipótesis (habituales en fachada ventilada)
Convección en la cámara	2 W/m²K + 4 por m/s de aire	Hipótesis
Gres de la fachada convencional: absortividad	0,6	Hipótesis

Tabla 2. Parámetros principales de la hoja exterior y de la cámara.

3.3 Soluciones de comparación

Todas usan el mismo componente con sus parámetros, sobre el mismo muro y en el mismo espacio:

- **Fachada ventilada convencional (gres)**: revestimiento opaco de gres, cámara siempre abierta. Es la referencia.
- **FV opaca (c-Si)**: vidrio con células de silicio cristalino, cámara siempre abierta.
- **FV semitransparente a-Si 30 %, sin lámina ni control**: el vidrio de la patente sin lámina y con la cámara siempre abierta (estado de la técnica).
- **Patente (a-Si 30 %)**: vidrio a-Si al 30 % con lámina electrocrómica y compuertas controladas.
- **Vidrio FV τ 0,5 sin lámina ni control**: vidrio de transmisión 0,5 sin lámina ni control.
- **Patente con vidrio τ 0,5**: la patente con ese vidrio de alta transparencia.
- **Patente con la mitad de aislante**: la patente con la mitad del aislante.
- **Convencional con la mitad de aislante**: la convencional con la mitad del aislante.

3.4 Verificación con el modelo nativo de EnergyPlus

Uso	Ciudad	Modelo propio kWh/año	EnergyPlus nativo kWh/año	Diferencia
Oficina	Cádiz (A3)	884	917	3,6 %
Oficina	Sevilla (B4)	1.010	1.042	3,1 %
Oficina	Barcelona (C2)	870	891	2,4 %
Oficina	Bilbao (C1)	328	346	5,3 %
Oficina	Madrid (D3)	862	885	2,6 %
Oficina	Burgos (E1)	412	428	4,0 %
Vivienda	Cádiz (A3)	206	218	5,7 %
Vivienda	Sevilla (B4)	290	299	3,5 %
Vivienda	Barcelona (C2)	286	294	2,8 %
Vivienda	Bilbao (C1)	135	137	1,0 %
Vivienda	Madrid (D3)	304	311	2,3 %
Vivienda	Burgos (E1)	207	207	0,3 %

Tabla 3. Consumo de climatización del espacio con la fachada ventilada convencional: modelo propio frente a la cámara ventilada nativa de EnergyPlus (fachada sur).

EnergyPlus tiene un modelo de fachada ventilada con hoja exterior opaca (SurfaceProperty:ExteriorNaturalVentedCavity). Con la misma geometría, el consumo de climatización del espacio con la fachada convencional difiere del modelo propio entre un 0,3 % y un 5,7 %: el acoplamiento del componente propio con EnergyPlus es correcto. El modelo nativo no admite una hoja transparente ni compuertas, que son lo que añade el componente propio.

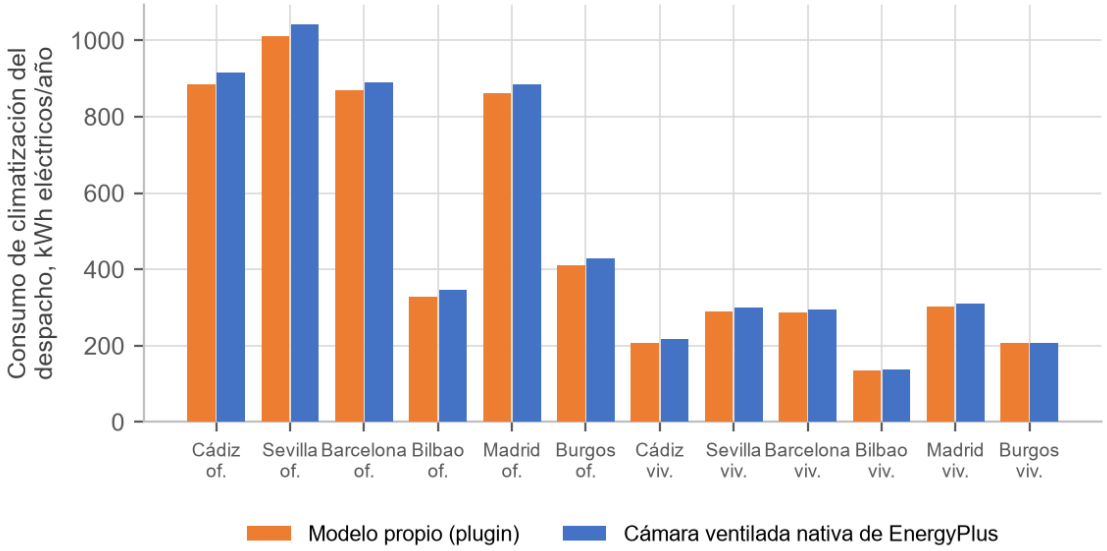


Figura 2. Verificación: modelo propio frente al nativo de EnergyPlus.

3.5 Límites del modelo

- No hay prototipo con el que calibrar; la convección en la cámara y la ventilación por tiro son correlaciones simples.
- El acoplamiento usa la temperatura del aislante del paso anterior (10 minutos).
- Se modela un espacio de fachada, no el edificio entero; las cifras se dan por m² de fachada ventilada.
- La climatización es ideal; el consumo depende de los rendimientos estacionales supuestos, iguales para todas las soluciones.

4 Resultados energéticos

4.1 Balance en una oficina de Madrid, fachada sur

La figura y la tabla dan, por m² de fachada ventilada, la climatización ahorrada (o añadida) frente a la fachada convencional y la electricidad fotovoltaica neta. El total es la electricidad ahorrada o producida.

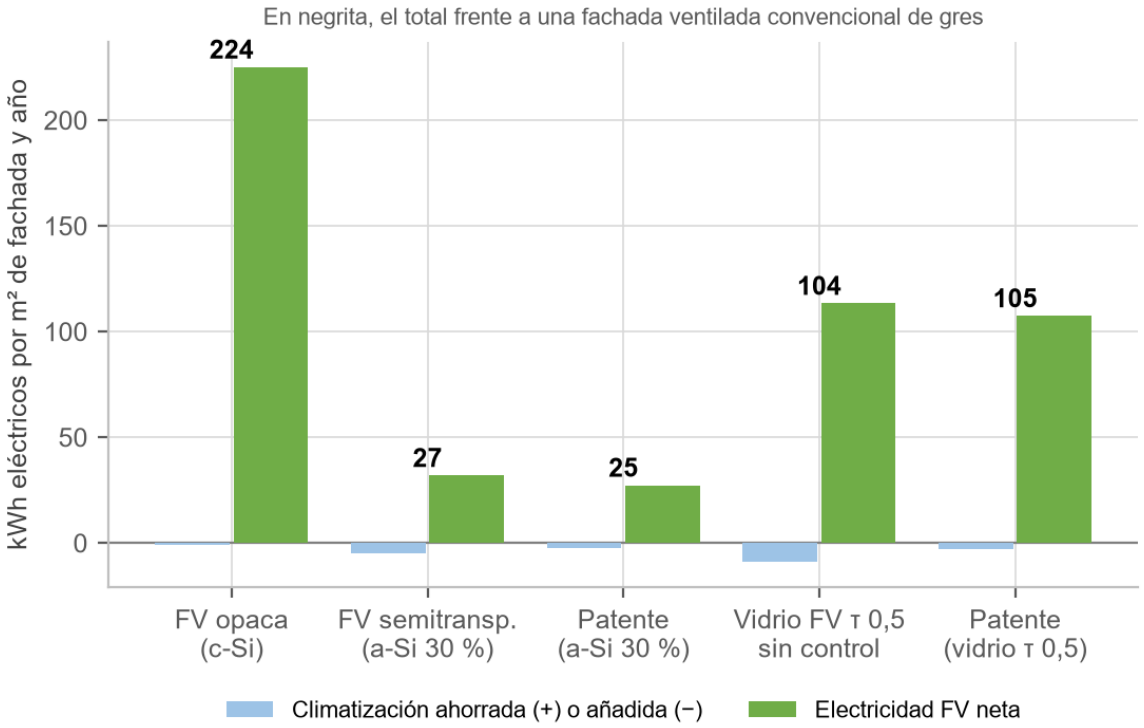


Figura 3. Ahorro eléctrico frente a la fachada ventilada convencional. Oficina, Madrid, fachada sur.

Solución	Climatización kWh/m²	Climatización ahorrada	FV producida	FV neta	Ahorro total	Radiación al aislante
Fachada ventilada convencional (gres)	102,7	—	—	0,0	—	0
FV opaca (c-Si)	103,6	-0,9	225	225	224	0
FV semitransparente a-Si 30 %, sin lámina ni control	107,4	-4,7	32	32	27	218
Patente (a-Si 30 %)	**105,0**	**-2,3**	**32**	**27**	**25**	**39**
Vidrio FV τ 0,5 sin lámina ni control	111,7	-9,0	113	113	104	586
Patente con vidrio τ 0,5	**105,4**	**-2,7**	**112**	**107**	**105**	**105**
Patente con la mitad de aislante	101,1	1,6	32	27	29	39
Convencional con la mitad de aislante	97,5	5,2	0	0	5	0

Tabla 4. Resultados por m² de fachada y año (kWh). Oficina, Madrid, fachada sur.

Con el aislante de la transmitancia límite, la hoja exterior apenas cambia la climatización: entre la mejor y la peor solución hay 14,1 kWh/m². Un vidrio semitransparente sin control deja llegar al aislante 218 kWh/m² (a-Si) o 586 kWh/m² (τ 0,5) al año, y eso se paga en refrigeración. Con la patente llegan 39 y 105 kWh/m², y la penalización baja de 4,7 a 2,3 kWh/m² y de 9,0 a 2,7 kWh/m². La lámina oscura y la cámara abierta hacen lo que dice la memoria. En el total manda la electricidad del vidrio.

4.2 Efecto térmico por clima y uso

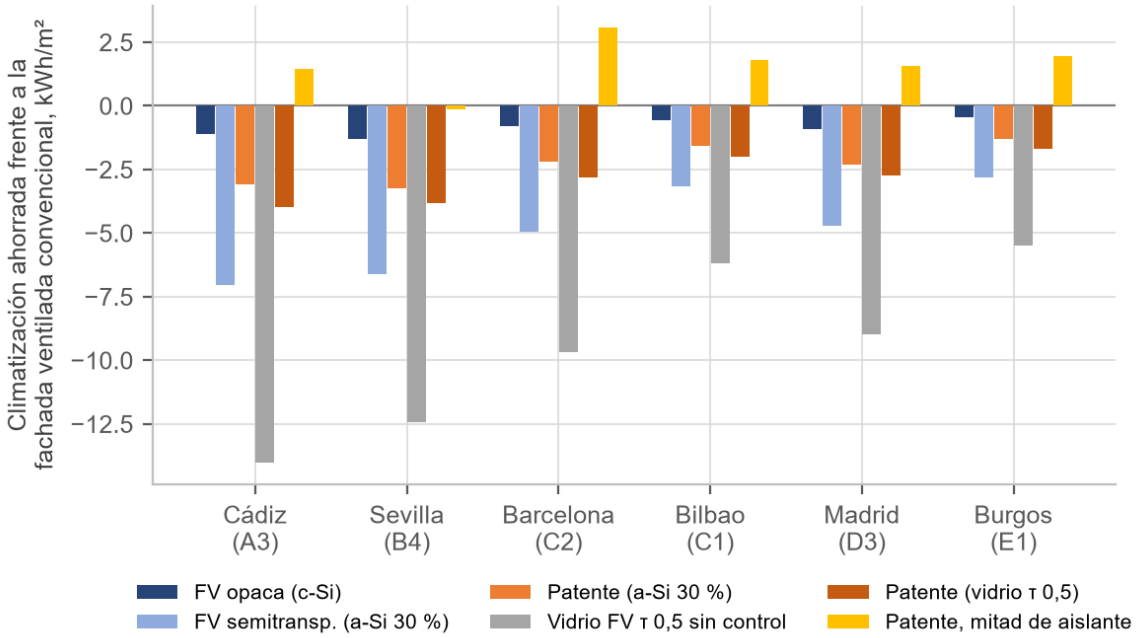


Figura 4. Climatización ahorrada frente a la fachada convencional por ciudad. Oficina, fachada sur.

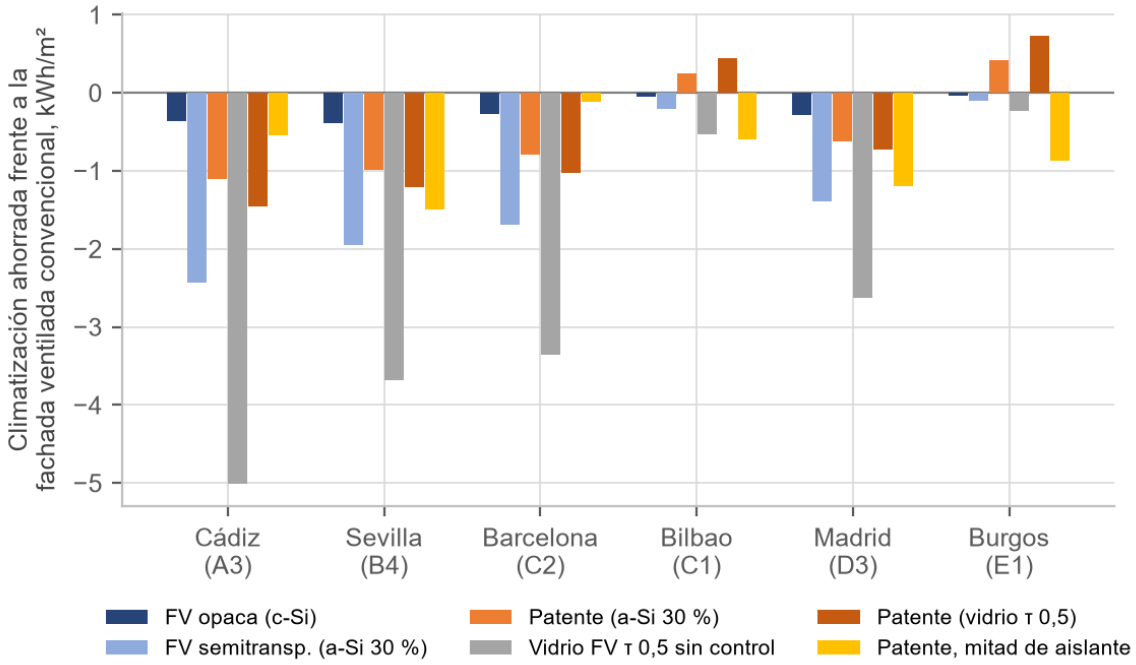


Figura 5. Climatización ahorrada frente a la fachada convencional por ciudad. Vivienda, fachada sur.

El patrón se repite en todos los climas: el vidrio semitransparente sin control penaliza más en el sur, y la patente recupera en la oficina entre la mitad y tres cuartas partes de esa penalización. En vivienda los efectos son menores, porque la refrigeración solo actúa de junio a septiembre y por la tarde. La patente con la mitad del aislante consume en la oficina menos que la fachada convencional en todos los climas salvo Sevilla, donde queda igual.

4.3 Clima

Ciudad (zona)	Irradiación kWh/m²	FV opaca	FV a-Si sin control	Patente a-Si	Vidrio τ 0,5 sin control	Patente τ 0,5
Cádiz (A3)	1.356	217	24	23	96	100
Sevilla (B4)	1.399	218	25	23	98	101
Barcelona (C2)	1.297	210	25	23	96	98
Bilbao (C1)	960	155	19	17	72	72
Madrid (D3)	1.421	224	27	25	104	105
Burgos (E1)	1.182	191	24	21	91	89

Tabla 5. Ahorro eléctrico total frente a la fachada convencional por ciudad (kWh/m² de fachada y año). Oficina, fachada sur.

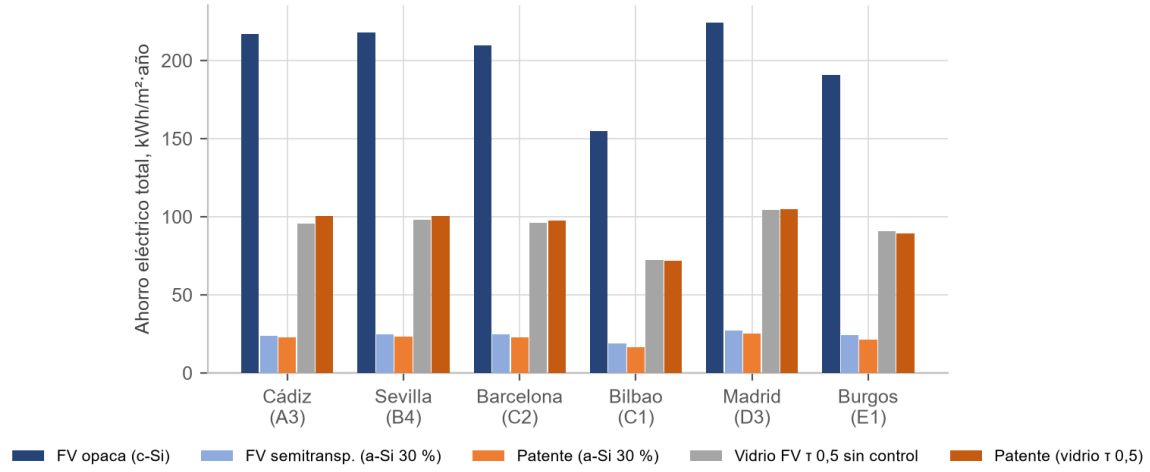


Figura 6. Ahorro eléctrico total por ciudad. Oficina, fachada sur.

4.4 Orientación

Orientación	Irradiación kWh/m²	Patente a-Si: FV neta	Patente a-Si: climatización	Patente a-Si: total	Patente τ 0,5: total
Sur	1.421	27	-2,3	25	105
Sureste	1.343	26	-2,2	24	101
Suroeste	1.405	28	-2,1	25	104
Este	1.069	21	-1,4	20	81
Oeste	1.150	22	-1,6	21	86

Tabla 6. Ahorro según la orientación (kWh/m² de fachada y año). Oficina, Madrid.

4.5 Funcionamiento de la cámara y de la lámina

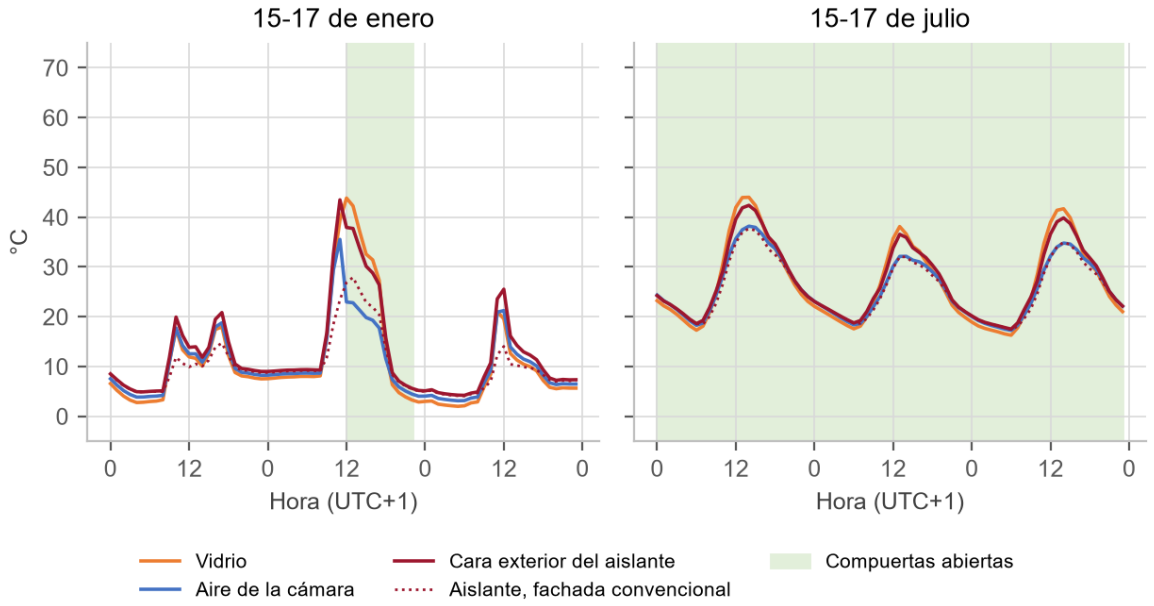


Figura 7. Temperaturas del vidrio, de la cámara y del aislante en tres días de invierno y tres de verano. Vivienda, Madrid, fachada sur.

En la vivienda de Madrid el control pasa 1.014 horas al año en modo invierno: con sol, la cámara cerrada calienta la cara del aislante por encima de la de la fachada convencional y reduce las pérdidas del muro; de noche el aire quieto aísla algo más. En verano la cámara abierta mantiene el aislante cerca de la temperatura exterior. En la oficina el modo invierno se usa poco (294 horas), porque las ganancias internas mantienen el despacho por encima de 22,5 °C casi todo el año, y la lámina pasa 2.824 horas oscura. El vidrio llega a 66 °C y la cámara a 49 °C.

4.6 Aislante y lámina

Variante	Oficina: calefacción kWh	Oficina: total kWh/m²	Vivienda: calefacción kWh	Vivienda: total kWh/m²
Convencional, ¼ de aislante	690	92,3	303	37,6
Convencional, ½	730	97,6	270	36,5
Convencional, aislante de la Ulim	769	102,7	252	36,1
Convencional, doble	798	106,9	243	36,0
Patente, ¼ de aislante	711	69,9	275	10,5
Patente, ½	746	73,8	260	9,7
Patente, aislante de la Ulim	778	77,7	249	9,3
Patente, doble	805	80,9	242	9,0
Patente, lámina de 0,05 W/m²	778	75,0	249	6,7

Tabla 7. Sensibilidad al espesor de aislante y al consumo de la lámina. Madrid, fachada sur. Calefacción: demanda anual del espacio; total: consumo de climatización menos FV neta por m² de fachada.

En la oficina, cuanto menos aislante, menor consumo, con o sin la patente: el despacho necesita sobre todo disipar las ganancias internas. En la vivienda la patente con un cuarto del aislante tiene una demanda de calefacción (275 kWh) del orden de la convencional con la mitad (270 kWh), que es el efecto que describe la memoria, aunque el ahorro en kWh es pequeño. Una lámina de consumo casi nulo en el estado oscuro añade 2,7 kWh/m² al ahorro en la oficina. El DB-HE excluye los muros parietodinámicos de la comprobación de transmitancia (§3.1.1.5); que la fachada de la patente pueda acogerse a ello habría que plantearlo expresamente.

4.7 Aspecto de la fachada

La energía no es el único criterio: la fachada es la cara del edificio. La figura y la tabla resumen el aspecto de cada solución y la valoración del grupo (subjetiva, de 1 a 5).

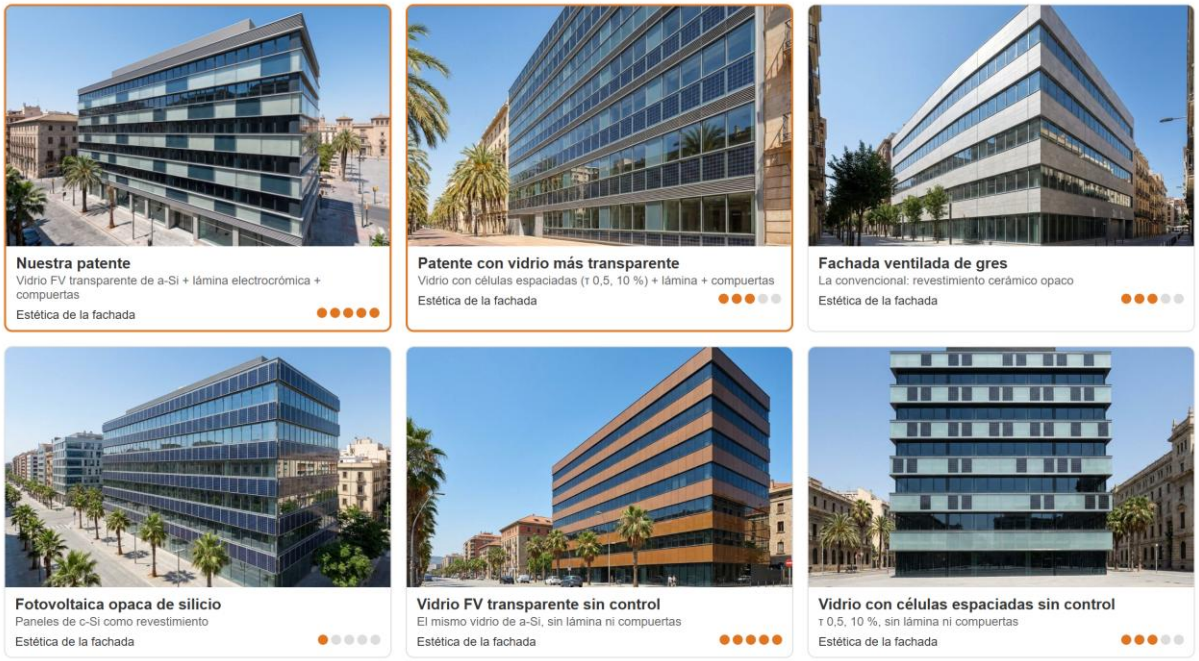


Figura 8. Aspecto de cada solución (fotos ilustrativas) y valoración estética del grupo.

Solución	Aspecto	Estética (1-5)
Patente (a-Si 30 %)	Vidrio homogéneo, transparente o de color, que se oscurece cuando sobra sol	5
Vidrio FV a-Si sin control	El mismo vidrio, pero calienta el muro	5
Patente con vidrio τ 0,5	Vidrio con células espaciadas visibles, con lámina	3
Vidrio con células espaciadas sin control	Células visibles; calienta mucho el muro	3
Fachada ventilada de gres	Revestimiento cerámico convencional, sin producción	3
Fotovoltaica opaca de c-Si	Paneles oscuros con la retícula de células y los marcos a la vista	1

Tabla 8. Valoración estética de las soluciones (criterio del grupo).

La fotovoltaica opaca es la que más produce y la peor valorada: convierte el edificio en un soporte de paneles. La patente permite un vidrio homogéneo, transparente o de color, sobre el muro opaco sin el sobrecalentamiento que ese vidrio causaría por sí solo. Es su ventaja frente a la fotovoltaica opaca, y la razón de pagar la lámina y las compuertas.

4.8 Dónde gana y dónde pierde

- Frente a un vidrio fotovoltaico semitransparente sin control: produce lo mismo y evita la mayor parte del sobrecalentamiento del muro, que es la ventaja que reivindica; en el balance eléctrico, la lámina consume en estado oscuro (1 W/m²) más o menos lo que ahorra en climatización, salvo con una lámina de consumo casi nulo.
- Frente a la fachada ventilada convencional: ahorra lo que produce el vidrio (25 kWh/m² con a-Si al 30 %).
- Frente a la fachada fotovoltaica opaca: produce mucho menos (224 frente a 25 kWh/m²); la fotovoltaica opaca tiene un aspecto de panel solar que la patente evita.
- Sobre un muro aislado según el CTE, la hoja exterior influye poco en la climatización: el control de la demanda que persigue la memoria tiene un efecto real pero pequeño en kWh.

5 Impacto económico

5.1 Precios y costes de referencia

Concepto	Valor	Fuente
Electricidad, consumidor no doméstico (banda IB, sin IVA)	0,1631 €/kWh	Eurostat, 2026-S1 [9]
Fachada ventilada BIPV de vidrio	462 €/m²	SUPSI-Becquerel 2020 [10]
Revestimiento de fachada ventilada de gres (FAG005)	130,49 €/m²	CYPE [11]
Vidrio o lámina electrocrómica	110 (lámina prototipo) a 500-1.000 US$/m² (vidrio comercial)	Wu et al. 2026, de 2.ª mano [7]
Tasa de descuento real / vida / mantenimiento	3 % / 25 años / 1 % anual	Hipótesis (las del estudio de la patente 1)

Tabla 9. Precios y costes empleados (sin IVA).

5.2 Coste estimado y coste máximo admisible

Partida	€/m²
Fachada ventilada de vidrio FV (vidrio, subestructura, montaje y parte eléctrica)	462
Lámina electrocrómica laminada al vidrio (hipótesis central; rango 110-900 €/m²)	200
Compuertas motorizadas arriba y abajo, sensores y control, por m² (hipótesis)	40
Total (sin IVA)	**702**

Tabla 10. Coste de inversión estimado de la patente por m² de fachada.

Solución	Inversión €/m²	Ahorro €/m²·año	Coste máximo admisible €/m²	Amortización frente a la convencional, años
FV opaca (c-Si)	462	36,6	654	10
FV semitransparente a-Si 30 %, sin lámina ni control	462	4,4	177	no se amortiza
Patente (a-Si 30 %)	702	4,1	172	no se amortiza
Vidrio FV τ 0,5 sin lámina ni control	462	17,0	364	27
Patente con vidrio τ 0,5	702	17,1	365	57

Tabla 11. Comparación económica por m² de fachada. Oficina, Madrid, fachada sur. El coste máximo admisible descuenta el revestimiento de gres que se sustituye.

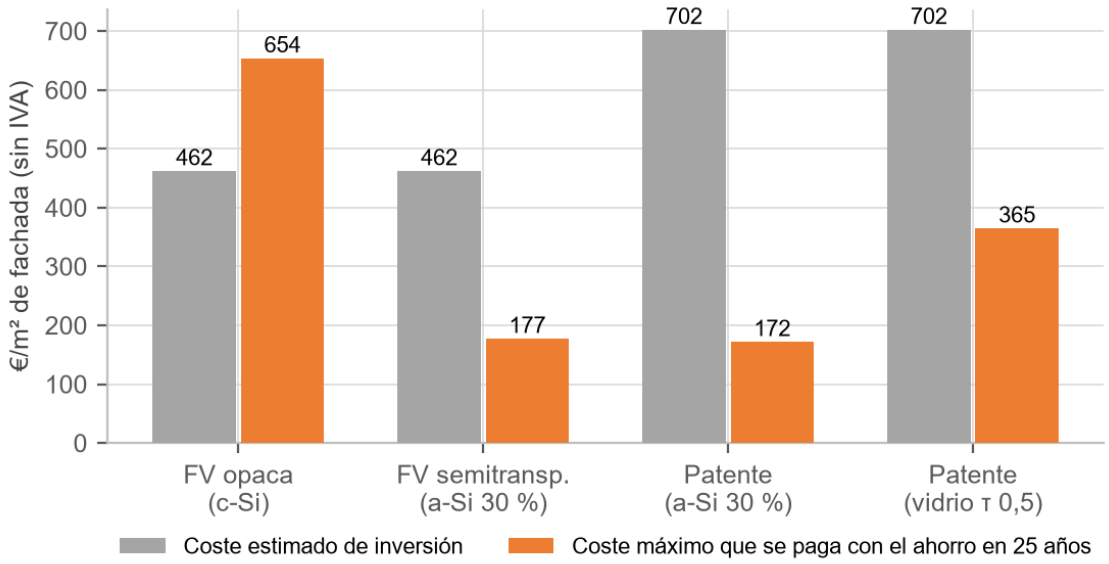


Figura 9. Coste estimado y coste máximo admisible por m² de fachada. Oficina, Madrid, fachada sur.

El coste máximo admisible es el coste de instalación que se paga en 25 años con el ahorro, descontado el revestimiento convencional que se sustituye. La patente con a-Si admitiría unos 172 €/m² y con vidrio de alta

transparencia unos 365 €/m², frente a un coste estimado de 702 €/m². Solo la fachada fotovoltaica opaca se paga con su energía (10 años). La lámina y las compuertas (unos 240 €/m²) no se amortizan con lo que ahorran: tienen sentido cuando el proyecto ya quiere un vidrio transparente o de color sobre el muro y hay que evitar que caliente el edificio, y su precio bajará con la lámina electrocrómica de gran formato.

6 Impacto ambiental

6.1 Energía primaria y CO_2 evitados

Ciudad	Patente a-Si: kWh/m²	EP no ren. kWh/m²	CO_2 kg/m²	Patente τ 0,5: kWh/m²	CO_2 kg/m²
Cádiz (A3)	23	45	7,6	100	33,2
Sevilla (B4)	23	46	7,7	101	33,3
Barcelona (C2)	23	45	7,6	98	32,3
Bilbao (C1)	17	32	5,5	72	23,8
Madrid (D3)	25	49	8,3	105	34,7
Burgos (E1)	21	42	7,1	89	29,6

Tabla 12. Energía primaria no renovable y CO_2 evitados al año frente a la fachada convencional (factores del RITE). Oficina, fachada sur.

6.2 Ciclo de vida simplificado

Material o componente	kg CO_2-eq/m²
Vidrio laminado FV 6+6 mm	43-50
Capa fotovoltaica de a-Si (28 Wp/m²; hipótesis)	18-45
Lámina electrocrómica (hipótesis)	15-60
Subestructura y compuertas de aluminio	7-27
Total	**83-182**

Tabla 13. Huella de carbono de fabricación estimada de la hoja exterior de la patente, de la cuna a la puerta (por m²).

La fabricación de la hoja exterior emite entre 83 y 182 kg CO_2-eq por m² (vidrio y aluminio con factores de ICE v3.0; capa fotovoltaica y lámina con rangos amplios, sin factor verificado). Con el ahorro anual en Madrid (8,3 kg/m² con a-Si; 34,7 con vidrio τ 0,5) se recupera en 10 a 22 años con a-Si y en 2,4 a 5,2 años con el vidrio de alta transparencia.

7 Impacto social y normativo

- Rehabilitación. La fachada ventilada es la solución habitual para aislar por fuera edificios ocupados; el módulo añade producción eléctrica y una cara vista de vidrio sin cambiar el sistema constructivo.
- Arquitectura. Permite vidrio fotovoltaico transparente o de color sobre el muro opaco sin el sobrecalentamiento que causaría por sí solo, lo que amplía las opciones de integración frente a los paneles opacos.
- CTE. El HE5 exige generación eléctrica renovable en los edificios terciarios de más de 1.000 m², y el HE1 limita la transmitancia del muro, aunque excluye los muros parietodinámicos de esa comprobación (§3.1.1.5).
- Directiva (UE) 2024/1275. Exige instalaciones solares en los edificios no residenciales nuevos de más de 250 m² desde el 31-12-2026 y edificios de cero emisiones desde 2030; la fachada amplía la superficie disponible para ello.

8 Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

- El control de la patente funciona como describe la memoria: la lámina oscura y la cámara abierta evitan entre la mitad y tres cuartas partes del sobrecalentamiento que causa un vidrio fotovoltaico semitransparente sobre el muro, y la cámara cerrada y la lámina clara reducen las pérdidas en invierno.
- Sobre un muro aislado según el CTE el efecto en la climatización es pequeño (unos pocos kWh por m² de fachada y año); el balance energético lo decide la electricidad del vidrio.
- Con vidrio de silicio amorfo al 30 % el ahorro es de unos 25 kWh/m² al año en Madrid; con un vidrio de transmisión 0,5 y 10 % de rendimiento, de unos 105.
- Reducir el aislante es favorable en oficinas con o sin la patente; en vivienda, la patente compensa en calefacción parte del aislante que se quita.
- La lámina y las compuertas no se amortizan con energía: el valor de la patente es arquitectónico y de confort térmico del muro, con vidrio transparente.

8.2 Recomendaciones

- Orientar la explotación a fabricantes de fachada ventilada y de vidrio fotovoltaico, para proyectos que quieran vidrio transparente o de color sobre muro opaco, sobre todo en oficinas y en climas cálidos.
- Usar el vidrio fotovoltaico de mayor rendimiento disponible para el grado de transparencia buscado.
- Elegir una lámina electrocrómica de consumo casi nulo en mantenimiento y reducir su coste, que es la partida que decide la viabilidad económica.
- Estudiar el espesor de aislante para cada edificio y clima, y consultar si el sistema puede tratarse como muro parietodinámico a efectos del DB-HE.
- Construir y ensayar un prototipo (temperaturas de la cámara, caudal, transmisión de la lámina) y calibrar este modelo.

9 Referencias

[1] U.S. Department of Energy. EnergyPlus, versión 26.2.0 (30-09-2026): Input Output Reference y Engineering Reference. https://energyplus.net.

[2] Comisión Europea, JRC. PVGIS 5.3, año meteorológico tipo (SARAH3/ERA5). https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/.

[3] MITECO. Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios. Documento reconocido, aplicable desde el 30-09-2026 (tablas 8, 12 y 14).

[4] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. Documento Básico HE Ahorro de energía, texto consolidado de 14-06-2022 (tabla 3.1.1.a-HE1, §3.1.1.5 y anejo D). https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf.

[5] Real Decreto 1027/2007, Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (IT 1.1.4.2 e IT 1.2.4.5.2) y Reglamento (UE) 1253/2014.

[6] Onyx Solar. Technical Guide EN-ES, ref. 240306 (propiedades del vidrio de silicio amorfo por grado de transparencia, págs. 14 y 27).

[7] ChromoGenics. ConverLight Dynamic Glass for Solar Control (2018). SAGE Electrochromics, Performance & Acoustical Data MKT-043.7 (2024). Wu et al. (2026), Communications Materials 7:303, doi:10.1038/s43246-026-01382-9.

[8] Lee E.S. (2019). Innovative Glazing Materials. Lawrence Berkeley National Laboratory, tabla 1. ConverLight, folleto 2026.

[9] Eurostat. Precios de la electricidad para consumidores no domésticos (nrg*pc*205), España, 2026-S1.

[10] SUPSI y Becquerel Institute (2020). Building Integrated Photovoltaics: a practical handbook for solar buildings' stakeholders. Status Report 2020.

[11] CYPE Ingenieros. Generador de precios de la construcción, España: partidas FAG100, FAG005 y FAS005 (consulta 20-11-2026).

[12] IDAE/MINETUR. Factores de emisión de CO_2 y coeficientes de paso a energía primaria. Documento reconocido del RITE (2016). MITECO, Factores de emisión 2007-2025, V6 (2026).

[13] Reglamento (UE) 2016/2281 de la Comisión, requisitos de diseño ecológico de productos de calefacción y refrigeración por aire (DOUE L 346 de 20-12-2016).

[14] Oficina Española de Patentes y Marcas. Expediente U202531827: memoria de publicación (18-03-2026) y título del modelo de utilidad ES 1 328 106 U (02-06-2026).

[15] Hammond G., Jones C. Inventory of Carbon and Energy (ICE) v3.0, citado en Mohebbi G. et al. (2021), Sustainability 13(14):7988.