iiTer
Investigación y Transferencia Tecnológica
Ingeniería Térmica

Lamas solares fotovoltaicas autónomas con lámina de cristal líquido (solicitud de patente P202631462): 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 10

3 MODELO DE CÁLCULO 11

3.1 DESPACHO, CLIMA Y USO 11
3.2 LAS LAMAS EN ENERGYPLUS 11
3.3 COMPONENTE PROPIO: CONTROL, ELECTRICIDAD, LUZ Y BATERÍA 11
3.4 SOLUCIONES DE COMPARACIÓN 12
3.5 VERIFICACIÓN 12
3.6 LÍMITES DEL MODELO 12

4 RESULTADOS ENERGÉTICOS 13

4.1 BALANCE DEL DESPACHO EN MADRID, FACHADA SUR 13
4.2 CLIMA 13
4.3 ORIENTACIÓN 14
4.4 FUNCIONAMIENTO: ÁNGULO, LÁMINA Y BATERÍA 15
4.5 SENSIBILIDAD 16
4.6 ASPECTO, LUZ Y VISTAS 16
4.7 DÓNDE GANA Y DÓNDE PIERDE 17

5 IMPACTO ECONÓMICO 18

5.1 PRECIOS Y COSTES DE REFERENCIA 18
5.2 COSTE ESTIMADO Y COMPARACIÓN 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 de la solicitud de patente P202631462, titularidad de la Universidad de Cádiz: lamas orientables de vidrio fotovoltaico de silicio amorfo semitransparente laminado con una lámina de cristal líquido disperso en polímero (PDLC), con batería y control propios, delante de las ventanas de un edificio de oficinas.

Metodología

Simulación anual con EnergyPlus 26.2 de un despacho de oficinas de fachada con el perfil de uso del documento reconocido de condiciones técnicas (12 h, carga media), en seis capitales de cinco zonas climáticas del CTE y cinco orientaciones, con clima PVGIS 5.3 y paso de 10 minutos. Las lamas son una persiana exterior de EnergyPlus cuyo ángulo impone, paso a paso, un componente propio (PythonPlugin) con el control de la memoria: seguimiento solar para producir, lámina opaca con sol directo y transparente sin él, y balance de la batería. El mismo componente calcula la electricidad, con la sombra entre lamas, y la luz que atraviesa el vidrio de las lamas, que la iluminación natural de EnergyPlus no cuenta. Se compara con la ventana sin protección, la persiana veneciana exterior motorizada, lamas fotovoltaicas fijas y lamas fotovoltaicas orientables opacas.

Resultados

- En una fachada sur de Madrid, la patente reduce el consumo eléctrico neto del despacho (climatización, iluminación y electricidad cedida) de 173 a **96 kWh por m² de ventana y año**: ahorra 78 kWh/m² frente a la ventana sin protección y 17 kWh/m² frente a la persiana veneciana exterior (112 kWh/m²).
- Las lamas producen 39 kWh/m² al año; tras alimentar la lámina, el control y la batería quedan 26 kWh/m² para el edificio. La batería de la memoria cubre el módulo todo el año salvo 20 horas.
- El control que maximiza la producción deja las lamas casi cerradas (unos 10° de media): con lamas de 150 mm y paso de 150 mm, abrirlas solo añade sombra entre ellas. La luz entra a través del vidrio, por eso la iluminación consume 83 kWh/m², frente a 116 con lamas opacas.
- Unas lamas fotovoltaicas orientables opacas de silicio cristalino producen seis veces más y dejan el despacho con balance negativo (-53 kWh/m²), pero a costa de la luz, de las vistas y del aspecto de la fachada. Unas lamas fijas del mismo vidrio sin lámina consumen menos (76 kWh/m²): la lámina PDLC aporta control del deslumbramiento, privacidad y vistas, no energía.
- Coste estimado: unos 692 €/m² de ventana, similar al de una veneciana exterior motorizada (703 €/m²), sin cableado a la red del edificio. Frente a no proteger la ventana el ahorro (13 €/m²·año) no amortiza la inversión; frente a la veneciana, cuesta lo mismo y ahorra más.

Recomendaciones

- Presentar la patente como sustituto de la protección solar exterior motorizada en oficinas y rehabilitación, por su autonomía (sin cableado) y su control de la luz, no como generador fotovoltaico.
- Para el desarrollo: vidrio a-Si de más potencia (con 63 Wp/m² el consumo neto baja a 68 kWh/m²), paso entre lamas mayor que su ancho si se quiere que el seguimiento aporte, más batería o lámina de menor consumo en climas nubosos y en fachadas este y oeste, y un prototipo ensayado que calibre el modelo.

Lista de Tablas

Tabla 1. Datos de protección de la solicitud P202631462. 8
Tabla 2. Soluciones de comparación y su modelo. 12
Tabla 3. Balance eléctrico por m² de ventana y año (kWh/m²). Madrid, fachada sur. 13
Tabla 4. Balance eléctrico neto por ciudad, fachada sur (kWh/m² de ventana y año). 13
Tabla 5. Sensibilidad de la patente (kWh/m² de ventana y año). Madrid, fachada sur. 16
Tabla 6. Valoración del aspecto y de la luz y las vistas (criterio del grupo). 16
Tabla 7. Precios y costes empleados (sin IVA). 18
Tabla 8. Coste de inversión estimado de la patente por m² de ventana, fabricación en serie. 18
Tabla 9. Comparación económica por m² de ventana. Madrid, fachada sur. 18
Tabla 10. Patente: energía primaria no renovable y CO_2 evitados al año frente a la ventana sin protección, fachada sur. 20
Tabla 11. Huella de carbono de fabricación estimada del módulo, de la cuna a la puerta (por m²). 20

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema del módulo y de una lama (página web de la patente). 9
Figura 2. Render ilustrativo de dos módulos iguales: lámina con tensión (transparente) y sin tensión (opaca). 10
Figura 3. Balance eléctrico del despacho por m² de ventana. Madrid, fachada sur. 13
Figura 4. Balance eléctrico neto por ciudad y solución, fachada sur. 14
Figura 5. Ahorro frente a la ventana sin protección según la orientación. Madrid. 14
Figura 6. Ángulo de las lamas, potencia fotovoltaica y estado de la lámina en un día despejado de invierno y otro de verano. Madrid, fachada sur. 15
Figura 7. Producción mensual y carga mínima de la batería. Madrid, fachada sur. 15
Figura 8. Aspecto de cada solución (fotos ilustrativas) y valoración del grupo. 16
Figura 9. Coste estimado y coste máximo admisible por m² de ventana. Madrid, fachada sur. 19

1 Introducción

1.1 Objeto

El presente informe recoge el estudio técnico de la invención “Dispositivo modular autónomo para control solar y generación eléctrica en envolventes arquitectónicas”, solicitud de patente española P202631462, presentada el 29 de octubre de 2026 y admitida a trámite, 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 e iluminación de un espacio de oficinas, la electricidad que produce y su autonomía, compararlo con las protecciones solares disponibles en el mercado y estimar su impacto económico, ambiental y social. El informe sirve de base técnica a la página de la patente 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 presentada.
- Simulación anual con EnergyPlus (8.760 horas) de un despacho de oficinas con cada solución delante de su ventana.
- Escenarios en seis capitales de cinco zonas climáticas del CTE y cinco orientaciones de fachada, y un análisis de sensibilidad del vidrio, de la lámina y del control en Madrid.
- Comparación con la ventana sin protección, la persiana veneciana exterior motorizada, las lamas fotovoltaicas fijas y las lamas fotovoltaicas orientables opacas.
- Análisis económico (ahorro, coste estimado, coste máximo admisible), 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 los componentes de la realización preferente de la memoria y datos 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 de la solicitud: Ismael Rodríguez Maestre, Juan Luis Foncubierta Blázquez, Pascual Álvarez Gómez, 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 presentada a la OEPM (versión final de 28-10-2026) y de las referencias del estado de la técnica que cita.
- Simulación anual con EnergyPlus 26.2 [1]: despacho, persiana exterior, iluminación natural y climatización con los objetos estándar del programa, y el control, la producción eléctrica, la lámina y la batería como componente propio (PythonPlugin).
- Año meteorológico tipo de PVGIS 5.3 (Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, SARAH3/ERA5) [2], el mismo del estudio de la patente ES 2 784 465 del grupo.
- Perfil de uso de oficinas del documento reconocido de condiciones técnicas para la certificación energética (2026) [3], transmitancias límite del CTE DB-HE [4] y caudal de aire exterior y recuperación de calor del RITE [5].
- Propiedades del vidrio fotovoltaico, de la lámina PDLC y de la electrónica de las fichas de sus fabricantes [6-10]; precios de la electricidad de Eurostat [11]; costes del Generador de precios de CYPE [12]; factores de paso del RITE y del MITECO [13].

Los scripts, los datos climáticos y las tablas de resultados se entregan junto a este informe (carpeta ESTUDIOS_WEB), de modo que cualquier cifra puede reproducirse y recalcularse con otras hipótesis. 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.
- Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación, y Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, que lo modifica (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).
- UNE-EN 12464-1, iluminación de los lugares de trabajo en interior.

2 Descripción de la invención

2.1 Datos de protección

Concepto	Dato
Título	Dispositivo modular autónomo para control solar y generación eléctrica en envolventes arquitectónicas
Solicitud	P202631462, presentada el 29-10-2026 (referencia UCA AN2025/017)
Situación	Admitida a trámite el 29-10-2026; pendiente del informe sobre el estado de la técnica
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 de la solicitud P202631462.

2.2 Componentes y funcionamiento

El dispositivo es un módulo que se ancla delante de una ventana, en una fachada o en una cubierta. Consta de:

- Bastidor perimetral (1) de aluminio extrusionado con anclajes con rotura de puente térmico; en sus perfiles lleva el control (6) y la batería (7).
- Lamas orientables (2) de vidrio laminado 3+3 mm y 150 mm de ancho; cada una combina un vidrio fotovoltaico de silicio amorfo con un 20 % de transparencia (8) y una lámina PDLC (9), que sin tensión es opaca y difusora y con tensión (48-60 V CA) se vuelve transparente.
- Ejes de rotación huecos (5) y actuadores electromecánicos (4): giro de hasta 180° con el cableado por dentro de los ejes.
- Sensor de radiación (3), GPS y reloj, algoritmo de posición solar, regulador MPPT y batería LiFePO4 de 12 V y 10 Ah (autonomía de hasta 72 horas sin sol, según la memoria).

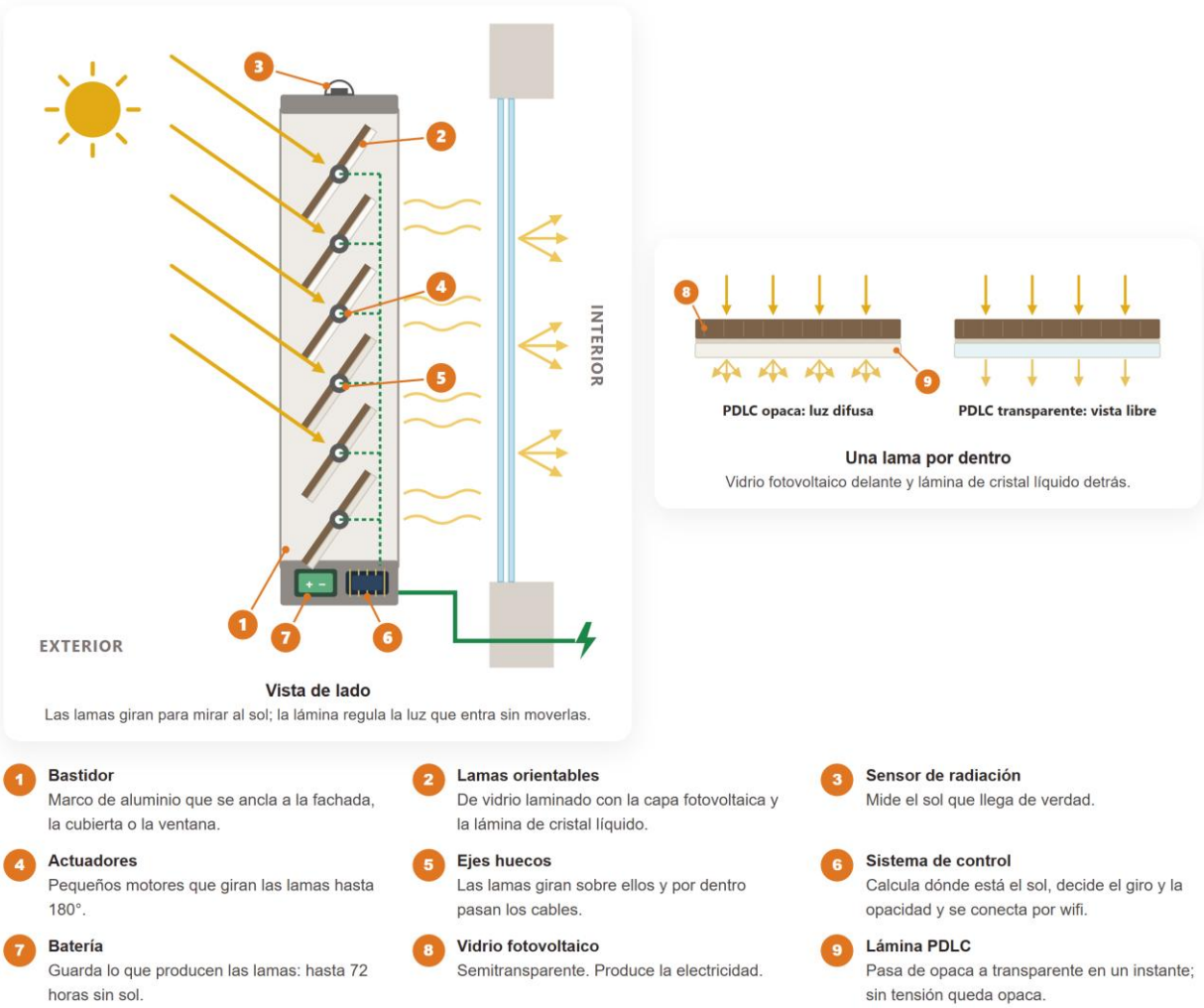


Figura 1. Esquema del módulo y de una lama (página web de la patente).

La lógica de control es jerárquica: primero asegura la carga de la batería; después orienta las lamas para producir el máximo de electricidad y, con independencia del giro, ajusta la opacidad de la lámina según la radiación, la temperatura interior, la iluminación deseada y las preferencias del usuario. La diferencia esencial con el estado de la técnica es ese desacoplamiento: la lámina convierte la luz directa en difusa sin cerrar las lamas, que pueden quedarse en la posición de máxima producción.



Figura 2. Render ilustrativo de dos módulos iguales: lámina con tensión (transparente) y sin tensión (opaca).

2.3 Estado de desarrollo

La memoria describe una realización preferente para la fachada sur de un edificio de oficinas: módulo de 1.200 × 1.500 mm con lamas de 150 mm, vidrio de silicio amorfo al 20 %, lámina PDLC adherida con EVA y batería de 12 V y 10 Ah. No se ha construido todavía un prototipo. Este estudio usa esa realización con componentes de catálogo equivalentes.

3 Modelo de cálculo

El cálculo se hace con EnergyPlus 26.2, el programa de simulación energética de edificios del Departamento de Energía de EE. UU. [1]. EnergyPlus resuelve el clima, la posición del sol, la radiación sobre la fachada, la persiana exterior, la iluminación natural, los muros, las cargas internas y la climatización con un paso de 10 minutos. Lo que no tiene, el control de la patente, la producción del vidrio de las lamas, la lámina y la batería, se programa como componente propio dentro de EnergyPlus (PythonPlugin).

3.1 Despacho, clima y uso

- Despacho de fachada de 6 m de ancho, 5 m de fondo y 3 m de altura en una planta intermedia de un edificio de oficinas: solo la fachada da al exterior; suelo, techo y medianeras son adiabáticos (despachos iguales alrededor).
- Ventana corrida de 4,8 × 1,5 m (7,2 m², un 40 % de la fachada) con doble acristalamiento bajo emisivo con argón (6-13-6) y marco de aluminio con rotura de puente térmico. Caben cuatro módulos de la memoria.
- Muro de fábrica de ladrillo con el aislante justo para la transmitancia límite del CTE en cada zona [4].
- Uso de oficina del documento reconocido [3] (tabla 8, 12 h, carga media): ocupación 6,00 W/m² sensibles y 3,79 W/m² latentes, equipos 4,50 W/m², de 6 a 14 h y de 16 a 20 h los laborables y de 6 a 14 h los sábados; consignas de 20 °C y 25 °C en esas horas. Iluminación LED de 8 W/m² con regulación continua a 500 lx en el centro del despacho.
- Aire exterior de 1,25 l/s·m² (12,5 l/s por persona del RITE con una persona cada 10 m²) con recuperador de calor del 73 % [5].
- Climatización ideal (cubre exactamente la demanda); el consumo eléctrico se obtiene con una bomba de calor de rendimientos estacionales mínimos de la UE (SCOP 3,5, SEER 4,1) [14].
- Clima: año tipo de PVGIS 5.3 para Cádiz (A3), Sevilla (B4), Barcelona (C2), Bilbao (C1), Madrid (D3) y Burgos (E1), en hora oficial con cambio de horario de verano. Radiación sobre la fachada con el modelo anisótropo de EnergyPlus y reflectancia del suelo de 0,20.

3.2 Las lamas en EnergyPlus

Cada módulo es una persiana exterior (WindowMaterial:Blind) de lamas horizontales de 150 mm con paso de 150 mm, a 15 cm del vidrio. EnergyPlus calcula, para cada ángulo de lama, la radiación directa y difusa que pasa entre las lamas o que atraviesa su vidrio, la que absorben y la que reflejan, y la luz que llega al punto de referencia. El ángulo lo impone el componente propio en cada paso (actuador “Slat Angle”). Se comprobó con lamas fijas de 30 a 150° que el ángulo de EnergyPlus coincide con la elevación de la normal de la cara exterior de la lama.

Propiedades de las lamas de la patente: transmisión solar del vidrio a-Si al 20 % del 11,5 % y luminosa del 16,3 % [6], multiplicadas por la transmisión total de la lámina en estado opaco, 0,63 [7]. EnergyPlus trata la luz que atraviesa una lama como difusa, que es justamente el estado opaco de la lámina; en estado transparente la transmisión total apenas cambia (del 63 al 80 % en la ficha) y el factor solar es el mismo [7], de modo que el balance térmico es prácticamente igual en los dos estados. Lo que cambia es la nitidez de las vistas y el deslumbramiento, que se tratan en el apartado 4.4.

3.3 Componente propio: control, electricidad, luz y batería

- Control (memoria): de día, el ángulo que da más electricidad, buscado cada 10 minutos entre 6 y 90° con el cálculo siguiente; de noche, lamas cerradas. Con la batería por debajo del 20 %, posición de reposo sin moverse.
- Radiación sobre la cara exterior de cada lama: directa con su ángulo de incidencia, la sombra de la lama de arriba (geometría en el plano de perfil) y el modificador de ángulo de un vidrio; difusa del cielo y del suelo con el factor de visión de la lama a la abertura entre lamas (método de las cuerdas cruzadas).
- Electricidad: $P = \eta \cdot G \cdot (1 + \gamma \cdot (Tc - 25))$, con η = 3,4 % (34 Wp/m²) y γ = −0,19 %/K [6], la temperatura de célula de una lama ventilada por las dos caras (U = 29 W/m²K) y un 4 % de pérdidas en continua.

- Lámina: opaca (sin consumo) fuera de las horas de uso y cuando hay sol directo sobre la fachada (más de 120 W/m² de directa normal), para evitar el deslumbramiento; transparente en horas de uso sin sol directo. Consumo en estado transparente de 3 W/m² [7] más el inversor de 12 V a 48-60 V CA (rendimiento supuesto del 85 %).
- Batería de 128 Wh por módulo (12,8 V y 10 Ah) con rendimiento de ida y vuelta del 92 % [9]; consumo permanente de la electrónica de 0,2 W por módulo (regulador MPPT, microcontrolador y BMS) [9, 10] y motores. Lo que no cabe en la batería se cede al edificio con un inversor del 90 %.
- Luz a través del vidrio de las lamas. La iluminación natural de EnergyPlus no cuenta la transmisión visible de las lamas (con lamas de transmisión 0,16 y 0,50 da la misma iluminancia). Se ha calibrado con EnergyPlus un difusor delante de la ventana: la iluminancia en el punto de referencia es $C \cdot \tau \cdot G$, con C = 7,9 lx por W/m² (entre 7,7 y 8,3 en cinco casos). El componente suma esa luz a la de EnergyPlus y regula las luces del despacho igual que Daylighting:Controls.

3.4 Soluciones de comparación

Solución	Modelo en EnergyPlus	Datos
Ventana sin protección	Ventana desnuda	Doble bajo emisivo 6-13 argón-6
Persiana veneciana exterior motorizada	WindowMaterial:Blind exterior, control nativo	Lamas de aluminio de 80 mm, reflectancia 0,6; se baja con más de 150 W/m² en la ventana y orienta las lamas para cortar la directa
Lamas FV fijas	Blind exterior a 40° + componente propio	El mismo vidrio a-Si 20 % sin lámina PDLC [6]
Lamas FV orientables opacas	Blind exterior + componente propio	Vidrio con células de c-Si (20 %, −0,35 %/K), mismo control de seguimiento, sin batería
Patente	Blind exterior + componente propio	a-Si 20 % + PDLC, seguimiento, lámina y batería según la memoria

Tabla 2. Soluciones de comparación y su modelo.

3.5 Verificación

- Radiación: la del archivo PVGIS sobre la fachada, calculada por EnergyPlus, es la misma que en el estudio de la patente ES 2 784 465, donde coincidió con pvlib en menos de un 1 % (Madrid sur: 1.421 kWh/m²·año).
- Lamas casi cerradas: la radiación sobre la cara de las lamas que calcula el componente (1.218 kWh/m²) es un 86 % de la de la fachada, la diferencia esperable por el modificador de ángulo del vidrio y por la difusa que no ve la lama.
- Luz: la constante de calibración varía menos de un ±4 % entre ciudades y orientaciones.
- Balances: el componente cierra el balance de la batería en cada paso (carga, consumo y excedente).

3.6 Límites del modelo

- No hay prototipo con el que calibrar. Las propiedades son las de catálogo de componentes equivalentes.
- La luz que atraviesa las lamas se trata como difusa en los dos estados de la lámina; las vistas y el deslumbramiento con la lámina transparente se valoran por horas, no con un índice de deslumbramiento.
- La climatización es ideal: el consumo depende de los rendimientos estacionales supuestos, iguales para todas las soluciones.
- No se modelan sombras de edificios vecinos ni la suciedad de las lamas más allá de un 4 % de pérdidas.

4 Resultados energéticos

4.1 Balance del despacho en Madrid, fachada sur

La figura y la tabla siguientes dan, por m² de ventana, el consumo eléctrico anual de climatización e iluminación del despacho y la electricidad que las lamas ceden al edificio. El balance neto es la suma de los dos primeros menos la tercera.

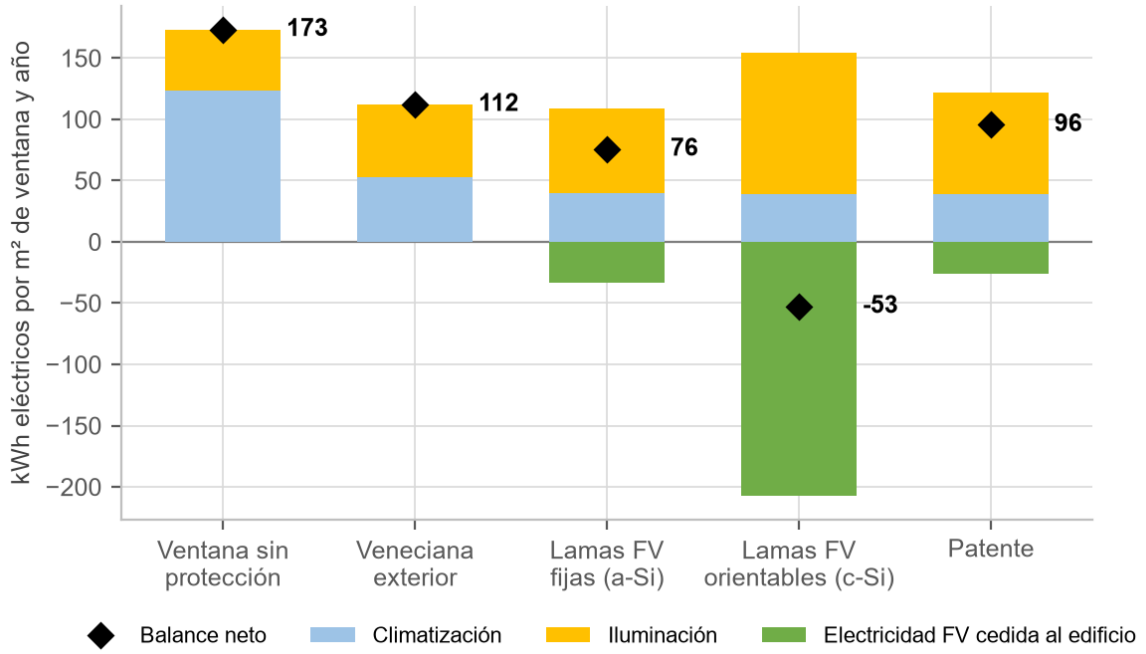


Figura 3. Balance eléctrico del despacho por m² de ventana. Madrid, fachada sur.

Solución	Climatización	Iluminación	FV producida	FV cedida	Balance neto	Ahorro frente a sin protección
Ventana sin protección	124	49	0	0	173	0
Veneciana exterior	53	60	0	0	112	61
Lamas FV fijas (a-Si)	40	69	37	34	76	98
Lamas FV orientables (c-Si)	39	116	231	207	-53	226
Patente	**39**	**83**	**39**	**26**	**96**	**78**

Tabla 3. Balance eléctrico por m² de ventana y año (kWh/m²). Madrid, fachada sur.

Cualquier protección exterior reduce mucho la refrigeración: la de la patente baja la climatización de 124 a 39 kWh/m², algo menos que la veneciana (53), porque sus lamas casi cerradas y semitransparentes cortan también la directa. A cambio necesita más luz artificial (83 frente a 60 kWh/m²). Con la electricidad que cede, su balance (96 kWh/m²) mejora el de la veneciana en 17 kWh/m².

4.2 Clima

Ciudad (zona)	Sin protección	Veneciana	Lamas fijas	Orientables c-Si	Patente	Patente: FV producida	Horas con batería baja
Cádiz (A3)	175	113	76	-44	98	37	6
Sevilla (B4)	195	124	82	-44	102	39	0
Barcelona (C2)	171	113	85	-30	106	36	120
Bilbao (C1)	100	75	69	-15	90	27	538
Madrid (D3)	173	112	76	-53	96	39	20
Burgos (E1)	110	82	64	-40	86	33	61

Tabla 4. Balance eléctrico neto por ciudad, fachada sur (kWh/m² de ventana y año).

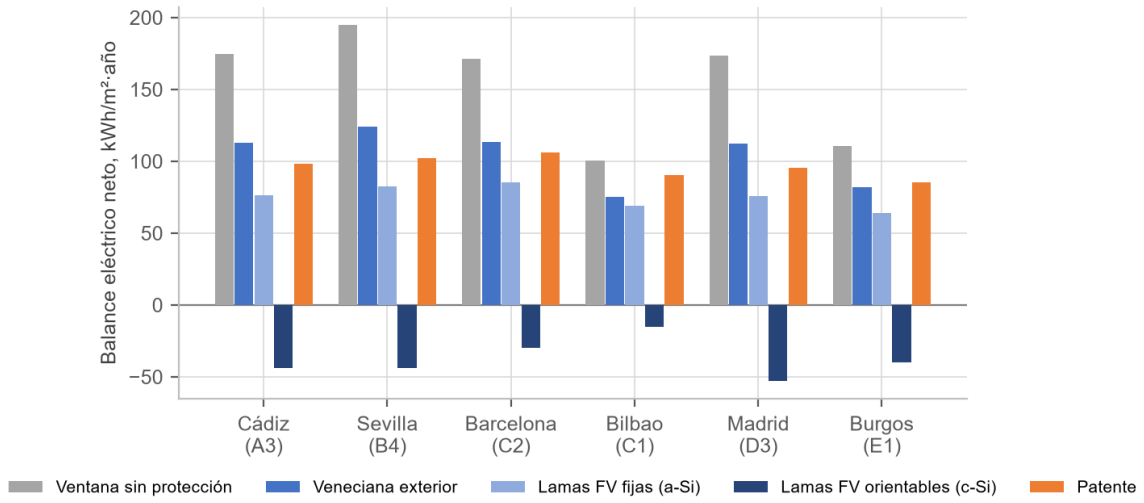


Figura 4. Balance eléctrico neto por ciudad y solución, fachada sur.

La ordenación de las soluciones es la misma en todos los climas. En las ciudades del sur y en Madrid, donde la refrigeración pesa más, el ahorro frente a la ventana sin protección es mayor; en Bilbao y Burgos es menor y la batería se queda corta más horas en invierno.

4.3 Orientación

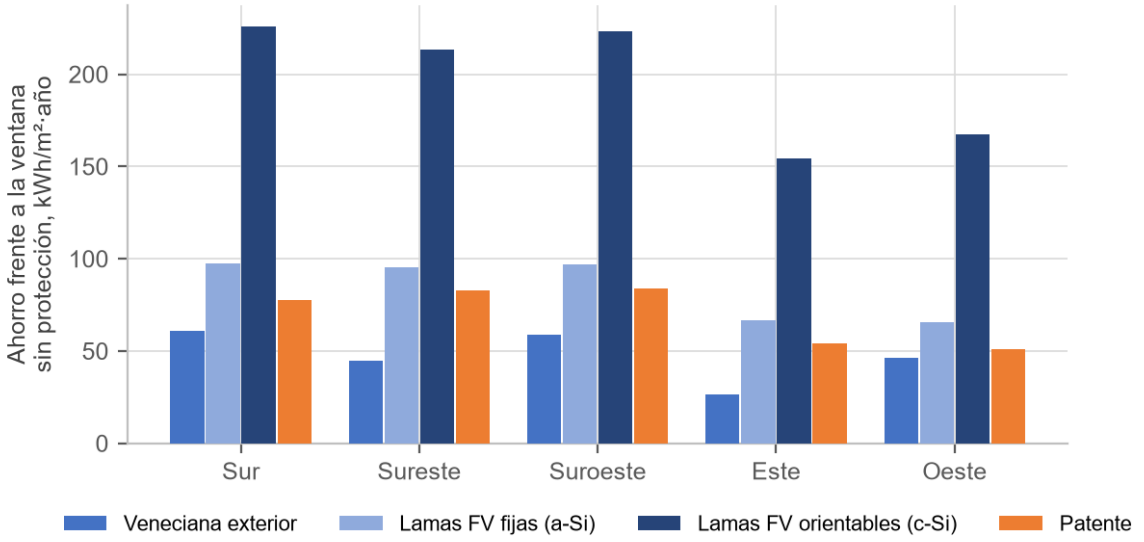


Figura 5. Ahorro frente a la ventana sin protección según la orientación. Madrid.

En las fachadas este y oeste la patente ahorra 54 y 51 kWh/m² (sur: 78). Allí produce menos y la batería se agota más a menudo (171 y 131 horas al año en Madrid).

4.4 Funcionamiento: ángulo, lámina y batería

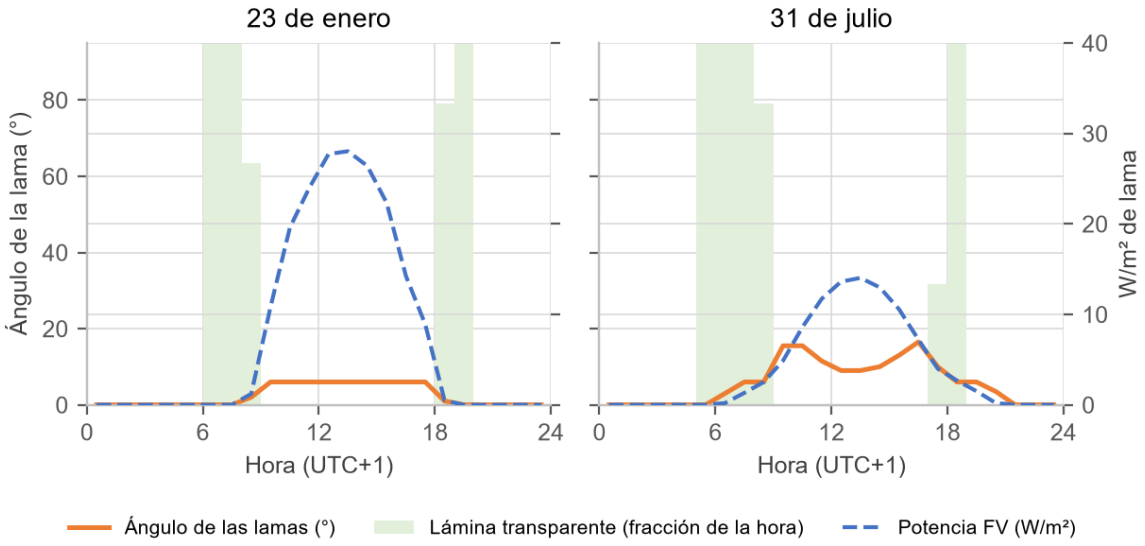


Figura 6. Ángulo de las lamas, potencia fotovoltaica y estado de la lámina en un día despejado de invierno y otro de verano. Madrid, fachada sur.

En invierno el control deja las lamas en el mínimo de 6°: con el sol bajo, cualquier apertura hace sombra a la lama de abajo. En verano las abre algo a mediodía. El ángulo medio diurno es de 10°. Con paso igual al ancho, seguir al sol apenas mejora la producción frente a unas lamas casi cerradas; el seguimiento rendiría más con un paso mayor que el ancho de la lama.

La lámina está opaca con sol directo en las 1.854 horas de uso en que lo hay, que es cuando evita el deslumbramiento sin mover las lamas, y transparente otras 1.682 horas de uso, en las que deja ver el exterior a través de un vidrio con un 16 % de transmisión luminosa. Consume 5,9 kWh/m² al año.

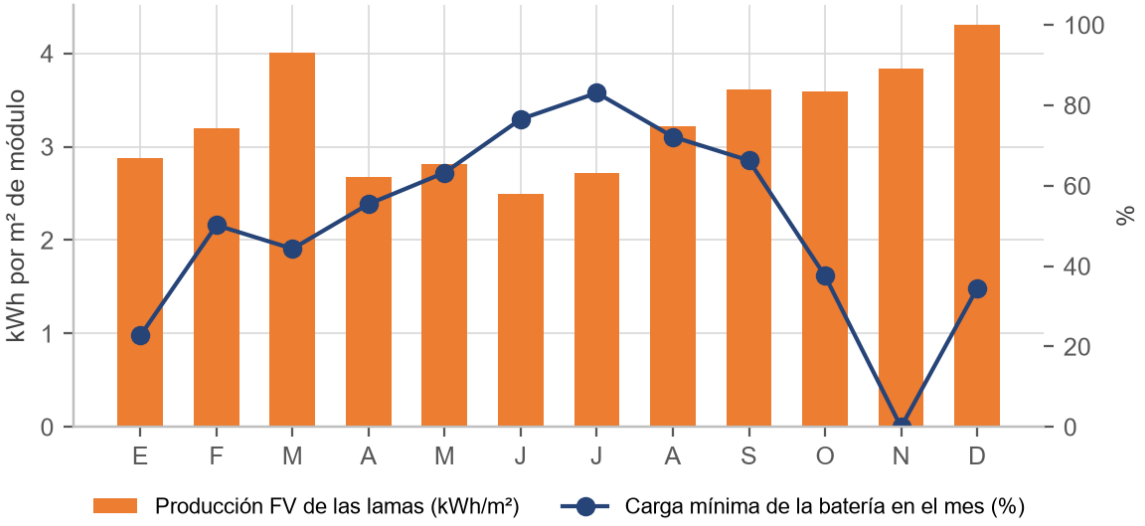


Figura 7. Producción mensual y carga mínima de la batería. Madrid, fachada sur.

4.5 Sensibilidad

Variante	Climatización	Iluminación	FV producida	FV cedida	Balance neto	Horas con batería baja
Patente (caso base)	39	83	39	26	96	20
Vidrio a-Si 20 % de 63 Wp/m²	39	83	73	54	68	0
Vidrio a-Si 30 %	39	72	32	21	91	64
Sin lámina PDLC	39	73	39	32	80	0
Lámina de 5,4 W/m²	39	83	39	23	99	457
Lamas a 45° como mínimo en horas de uso	41	85	38	25	101	31

Tabla 5. Sensibilidad de la patente (kWh/m² de ventana y año). Madrid, fachada sur.

Lo que más influye es la potencia del vidrio: con un a-Si al 20 % de 63 Wp/m² el balance baja a 68 kWh/m², por debajo de las lamas fijas del caso base. Sin lámina el balance mejora (80 kWh/m²): entra más luz y no hay consumo de la lámina. La lámina se justifica por el control del deslumbramiento, la privacidad y las vistas, no por la energía. Forzar las lamas a 45° en horas de uso no mejora la luz natural, porque con las lamas casi cerradas la luz ya entra a través del vidrio.

4.6 Aspecto, luz y vistas

La energía no es el único criterio: las lamas son la cara del edificio y lo que ve quien trabaja dentro. La figura y la tabla resumen el aspecto de cada solución y la valoración del grupo (subjetiva, de 1 a 5).

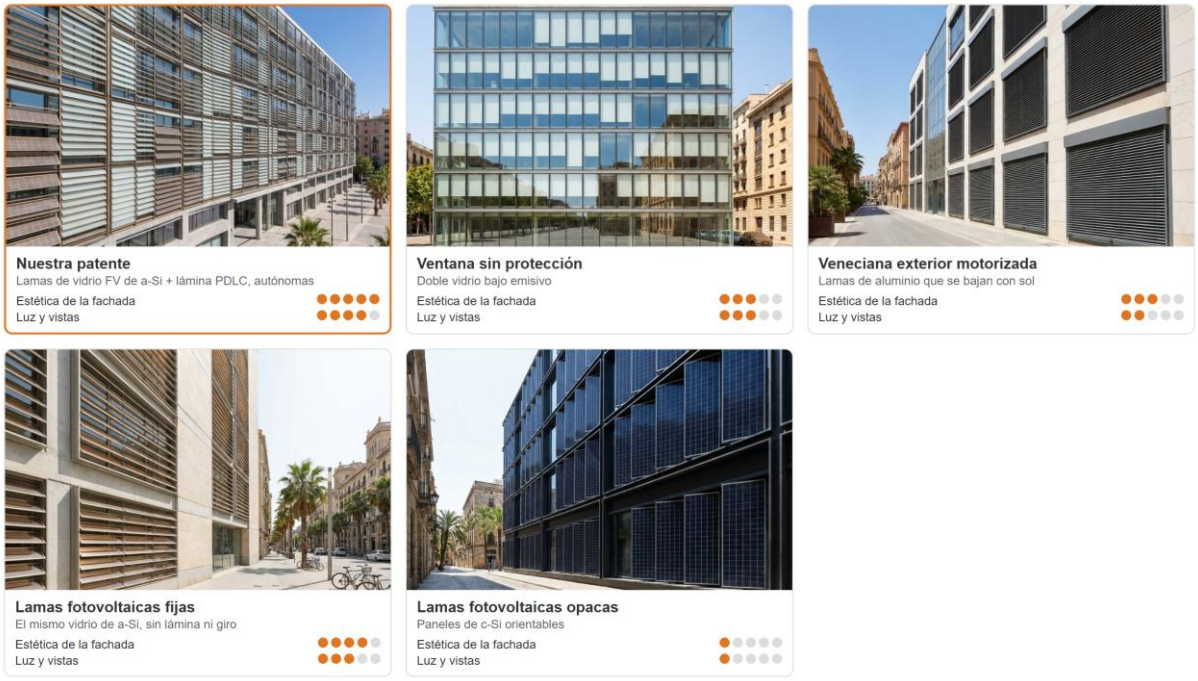


Figura 8. Aspecto de cada solución (fotos ilustrativas) y valoración del grupo.

Solución	Aspecto y uso	Estética	Luz y vistas
Patente	Lamas de vidrio cálido y homogéneo; la lámina convierte el sol directo en luz difusa sin cerrarlas	5	4
Lamas FV fijas (a-Si)	El mismo vidrio, siempre igual; no se adapta al sol ni al deslumbramiento	4	3
Ventana sin protección	Fachada limpia, pero con los estores interiores bajados a medias por el deslumbramiento	3	3
Veneciana exterior motorizada	Lamas de aluminio, cajón y guías; bajada con sol tapa las vistas	3	2
Lamas FV opacas (c-Si)	Paneles oscuros con las células a la vista; casi cerradas dejan el despacho a oscuras	1	1

Tabla 6. Valoración del aspecto y de la luz y las vistas (criterio del grupo).

Las lamas opacas de silicio cristalino son las que más energía dan y las peor valoradas: oscurecen el despacho y la fachada. La patente es la que mejor combina aspecto, luz natural y control del deslumbramiento, que es lo que la distingue de unas lamas fotovoltaicas convencionales.

4.7 Dónde gana y dónde pierde

- Frente a la veneciana exterior motorizada: ahorra 17 kWh/m² al año en Madrid sur, no necesita cableado ni mando y controla el deslumbramiento sin cerrar las vistas.
- Frente a lamas fotovoltaicas opacas: produce seis veces menos electricidad, pero deja pasar luz con las lamas cerradas (32 kWh/m² menos de iluminación) y vistas.
- Frente a lamas fijas del mismo vidrio: consume más (20 kWh/m²) por la lámina, que resta luz y gasta electricidad, y porque el seguimiento apenas aporta con este paso entre lamas.
- Autonomía: la batería de la memoria basta en el sur y en Madrid; en climas nubosos y en fachadas este y oeste se queda corta varios cientos de horas al año con la lámina en uso.

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 [11]
Persiana veneciana exterior de aluminio, manual (LSN010)	622,70 €/m²	CYPE [12]
Motor y actuador de la veneciana	80 €/m²	Hipótesis (actuador KNX IMK520)
Celosía de lamas orientables de aluminio de 120 mm (LSZ031)	301,82 €/m²	CYPE [12]
Celosía de lamas fijas (LSZ120)	149,87 €/m²	CYPE [12]
Vidrio FV de a-Si (LVF005)	167,71 €/m²	CYPE [12]
Módulo vidrio-vidrio de c-Si para fachada (IEF010)	152,19 €/m²	CYPE [12]
Lámina PDLC	85-130 US$/m²	Islam et al. 2023 [8]
Tasa de descuento real / vida / mantenimiento	3 % / 25 años / 1 % anual	Hipótesis (las del estudio de la patente 1)

Tabla 7. Precios y costes empleados (sin IVA).

5.2 Coste estimado y comparación

Partida	€/m²
Bastidor y lamas orientables de aluminio (CYPE LSZ031), como base	302
Vidrio FV de a-Si en las lamas (CYPE LVF005)	168
Lámina PDLC laminada (85-130 US$/m²)	100
Servomotores, control, GPS, sensor, MPPT e inversor (150 € por módulo, hipótesis)	83
Batería LiFePO4 12,8 V 10 Ah (70 € por módulo, hipótesis)	39
Total (sin IVA)	**692**

Tabla 8. Coste de inversión estimado de la patente por m² de ventana, fabricación en serie.

Es una estimación de orden de magnitud a partir de partidas de catálogo; debe sustituirse por el escandallo del fabricante licenciatario.

Solución	Inversión €/m²	Ahorro frente a sin protección €/m²·año	Coste máximo que paga el ahorro en 25 años €/m²	Ahorro frente a la veneciana €/m²·año
Veneciana exterior	703	10,0	148	0,0
Lamas FV fijas (a-Si)	338	15,9	236	6,0
Lamas FV orientables (c-Si)	537	36,9	547	26,9
Patente	**692**	**12,7**	**188**	**2,7**

Tabla 9. Comparación económica por m² de ventana. Madrid, fachada sur.

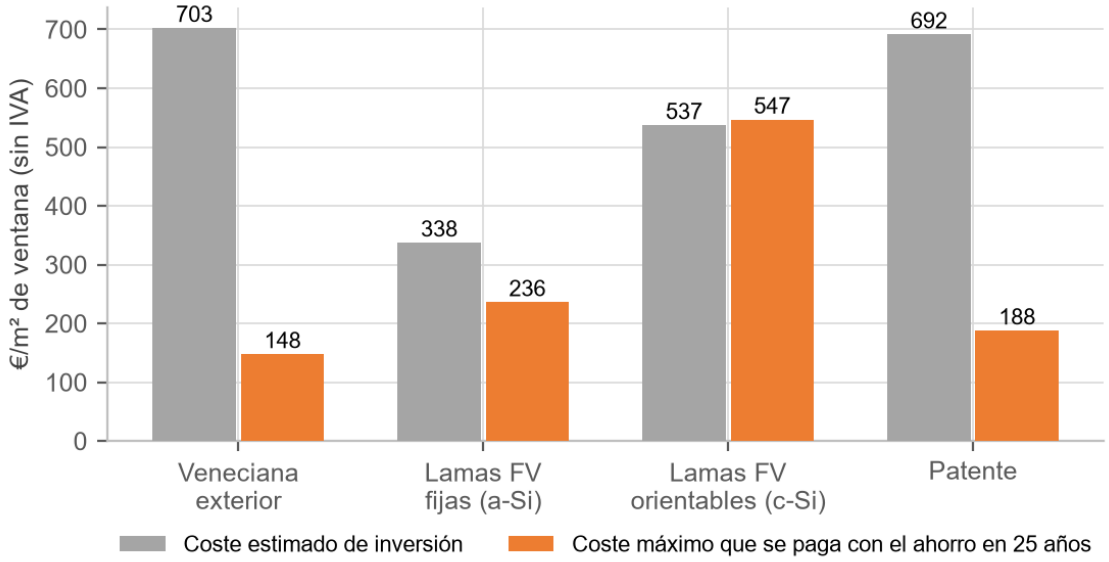


Figura 9. Coste estimado y coste máximo admisible por m² de ventana. Madrid, fachada sur.

Ninguna protección solar se paga solo con la energía cuando la alternativa es no poner nada: el ahorro de la patente, 12,7 €/m² al año, justificaría una inversión de unos 188 €/m². Las protecciones exteriores se instalan por confort y por exigencia normativa (control solar del HE1). La comparación que importa es con la veneciana exterior motorizada: la patente cuesta lo mismo (692 frente a 703 €/m²), ahorra 2,7 €/m² más al año y evita el cableado y el mando, que en rehabilitación pueden costar más que la propia persiana. Las lamas orientables opacas son las únicas que se amortizan frente a no proteger, gracias a su producción.

6 Impacto ambiental

6.1 Energía primaria y CO_2 evitados

Ciudad	Ahorro eléctrico kWh/m²	EP no renovable kWh/m²	CO_2 (RITE) kg/m²	CO_2 (mix 2025) kg/m²
Cádiz (A3)	77	150	25,4	19,8
Sevilla (B4)	92	181	30,6	23,9
Barcelona (C2)	65	127	21,5	16,8
Bilbao (C1)	10	20	3,4	2,6
Madrid (D3)	78	152	25,7	20,1
Burgos (E1)	25	49	8,2	6,4

Tabla 10. Patente: energía primaria no renovable y CO_2 evitados al año frente a la ventana sin protección, fachada sur.

Todo el ahorro es eléctrico. Con los factores del RITE (0,331 kg CO_2 y 1,954 kWh de energía primaria no renovable por kWh) [13] y con el del mix de 2025 (0,258 kg CO_2/kWh).

6.2 Ciclo de vida simplificado

Material o componente	kg CO_2-eq/m²
Vidrio laminado 3+3 mm	22-25
Capa fotovoltaica de a-Si (34 Wp/m²; hipótesis)	20-51
Lámina PDLC (hipótesis)	5-20
Bastidor, ejes y soportes de aluminio	10-40
Batería LiFePO4 (0,128 kWh por módulo; hipótesis 60-150 kg CO2-eq/kWh)	4-11
Electrónica y servomotores (hipótesis)	6-18
Total	**67-165**

Tabla 11. Huella de carbono de fabricación estimada del módulo, de la cuna a la puerta (por m²).

Con factores de la base ICE v3.0 para vidrio y aluminio y rangos amplios para la capa fotovoltaica, la lámina, la batería y la electrónica (sin factor verificado), la fabricación emite entre 67 y 165 kg CO_2-eq por m². Con el ahorro anual en Madrid sur (25,7 kg/m²) se recupera en 2,6 a 6,4 años.

7 Impacto social y normativo

- Confort y salud en el trabajo. La lámina elimina el deslumbramiento sin oscurecer el puesto ni cerrar las vistas, que es la queja habitual de las persianas y estores en oficinas.
- Rehabilitación. El módulo no necesita cableado ni obra interior: se cuelga delante del hueco. Es la barrera principal de la protección solar motorizada en edificios ocupados.
- CTE. El HE1 limita las ganancias solares de julio con las protecciones móviles activadas (qsol;jul) y el documento reconocido trata las protecciones motorizadas con control automático como cerradas por encima de 200 W/m²; el dispositivo encaja como protección móvil automática.
- 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 integración en fachada amplía la superficie disponible.
- Industria. Vidrio, aluminio y electrónica con cadena de suministro en España; el producto encaja en fabricantes de celosías, protección solar y vidrio.

8 Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

- La patente reduce el consumo eléctrico de un despacho de oficinas entre 10 y 92 kWh por m² de ventana y año (fachada sur) frente a la ventana sin protección, y mejora a la persiana veneciana exterior motorizada en todos los climas.
- Es autónoma: con la batería de la memoria cubre su propio consumo casi todo el año en el sur y en Madrid y cede la mayor parte de lo que produce.
- El control de máxima producción deja las lamas casi cerradas; la luz natural entra a través del vidrio, y la lámina decide si esa luz es difusa o deja ver el exterior.
- Como generador fotovoltaico rinde poco: el vidrio de silicio amorfo al 20 % da unos 40 kWh/m² al año en una fachada sur.
- La lámina PDLC no ahorra energía (resta luz y consume), pero es la que permite controlar el deslumbramiento sin mover las lamas, que es la novedad de la invención.

8.2 Recomendaciones

- Orientar la explotación a la protección solar exterior de oficinas y a la rehabilitación, frente a las venecianas motorizadas, destacando la autonomía y el confort visual.
- Elegir el vidrio fotovoltaico de más potencia disponible para el grado de transparencia (hay a-Si al 20 % con 63 Wp/m²).
- Revisar el paso entre lamas: con un paso mayor que el ancho, el seguimiento solar sí aumentaría la producción.
- Dimensionar la batería o el consumo de la lámina por clima y orientación: en fachadas este y oeste y en climas nubosos la batería de 10 Ah se queda corta.
- Construir y ensayar un prototipo (producción, transmisión de las lamas en los dos estados de la lámina, deslumbramiento) y calibrar este modelo antes de publicar cifras comerciales.

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 6, 8, 12 y 14).

[4] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. Documento Básico HE Ahorro de energía, texto consolidado de 14-06-2022. 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] Gauzy. HP-LCG Spec Sheet B-11-22.05 y PDLC LCG for Facades B-11-34.01 (2025). Avery Dennison, VELA Brochure (2021-2022).

[8] Islam M.S. et al. (2023). Polymers 15(16):3420. doi:10.3390/polym15163420. Ghosh A., Norton B., Mallick T.K. (2018). Energy and Buildings 172:257-264. doi:10.1016/j.enbuild.2018.05.008.

[9] Victron Energy. Lithium SuperPack 12,8 V y SmartSolar MPPT 75/10, fichas técnicas. Super B, Andrena 12V10Ah.

[10] Espressif. ESP32 Datasheet v5.3 (2026), tabla 4-2. TowerPro, servo MG996R.

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

[12] CYPE Ingenieros. Generador de precios de la construcción, España: partidas LSN010, LSZ031, LSZ120, LVF005, IEF010 e IMK520 (consulta 21-11-2026).

[13] 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).

[14] 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).

[15] Zhang X., Lau S.K., Lau S.S.Y., Zhao Y. (2018). Photovoltaic integrated shading devices (PVSDs): A review. Solar Energy 170:947-968. doi:10.1016/j.solener.2018.05.067.

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