

ea!

GAT23

Soluciones prácticas para la rehabilitación energética

Alejandro Bosqued Navarro
Roberto Bosqued García

Guía de Asistencia Técnica 23

COAM
COLEGIO OFICIAL ARQUITECTOS DE MADRID

La rehabilitación energética de edificios ocupa hoy una posición central en la transformación del parque edificado europeo. No se trata únicamente de reducir consumos, sino de responder a un desafío mucho más amplio: avanzar hacia la descarbonización del entorno construido, mejorar la calidad ambiental interior, reforzar el confort y adaptar los edificios existentes a un marco técnico, normativo y social cada vez más exigente. La propia Unión Europea ha situado este objetivo en el centro de su política energética y climática mediante la revisión de la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios, orientada a lograr un parque inmobiliario totalmente descarbonizado en 2050 y a acelerar la renovación de los edificios menos eficientes.

En este contexto, el Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid impulsó, mediante concurso, la redacción de nuevas Guías de Asistencia Técnica, entre ellas "Soluciones prácticas para rehabilitación energética", con el propósito de ofrecer a los arquitectos una herramienta útil, rigurosa y directamente aplicable al ejercicio profesional. Esta guía surge, por tanto, de ese encargo del COAM y de la convicción de que la rehabilitación energética exige hoy una aproximación integrada, capaz de relacionar envolvente, sistemas, demanda, consumo, salud, confort, viabilidad económica y calidad arquitectónica en una misma estrategia de intervención.

La publicación se apoya en la experiencia complementaria de sus autores en el ámbito de la sostenibilidad, la eficiencia energética y la mejora del edificio existente. Alejandro Bosqued Navarro desarrolla su actividad profesional como consultor en Zero Energy Consumption (0EC), donde asesora a estudios de arquitectura e ingenierías en la optimización de la demanda y del consumo energético de los edificios, así como en procesos de certificación medioambiental. Asimismo, es Evaluador Acreditado VERDE de GBCe, dentro del marco de evaluación ambiental impulsado por Green Building Council España, y dirige el Máster en Sostenibilidad Arquitectónica: Diseño y Gestión de la Universidad Nebrija.

Por su parte, Roberto Bosqued García aporta una trayectoria estrechamente vinculada a la investigación aplicada, las estrategias pasivas y la mejora del comportamiento energético de los edificios, con referencias públicas asociadas a trabajos y actividades técnicas relacionadas con arquitectura bioclimática, edificios de consumo casi nulo y transferencia de conocimiento en este campo. Su experiencia complementa una visión de la rehabilitación energética basada no solo en la respuesta normativa o tecnológica, sino también en la comprensión profunda del clima, la construcción existente y el funcionamiento real de los edificios.

Con esta guía queremos contribuir a una práctica profesional más precisa, más realista y más comprometida con el futuro del parque edificado. Rehabilitar energéticamente es, hoy, una forma de intervenir sobre la arquitectura desde la responsabilidad técnica, la eficiencia en el uso de los recursos y el compromiso con los objetivos europeos de descarbonización, sin perder de vista que el fin último de toda mejora energética debe ser siempre la calidad de los espacios y el bienestar de las personas.

Alejandro Bosqued Navarro

ea! ediciones de arquitectura

GAT23
Soluciones prácticas para la rehabilitación energética

Autor
Alejandro Bosqued Navarro
Roberto Bosqued García

Coordinación
Fernando Landecho González-Soto. *Vocal Junta de Gobierno*
Centro de Asesoramiento Técnico (CAT)
Mª. Carmen García Delgado
Vicente Górriz Burk
Gabriel Castellanos García

Maquetación
Pedro Ibáñez Albert, Andrés Pozuelo Ortiz

@ De los textos e imágenes sus autores
@ De la presente edición Ediciones de Arquitectura.
Fundación Arquitectura COAM

Madrid, octubre 2026
ISBN: 978-84-129657-3-5

COAM | COLEGIO OFICIAL ARQUITECTOS DE MADRID

FUNDACIÓN ARQUITECTURA COAM

GAT23

Soluciones prácticas para la rehabilitación energética

Alejandro Bosqued Navarro
Roberto Bosqued García

Índice

1. INTRODUCCIÓN 14
1.1. Importancia de la rehabilitación energética 15
1.2. La importancia de la envolvente del edificio 17
1.2.1. Principales estrategias a emplear en la envolvente 18
1.3. Beneficios ambientales y económicos 19
1.3.1. Beneficios ambientales 19
1.3.2. Beneficios económicos 19

2. EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO 22
2.1. Contexto normativo 23
2.1.1. Normativa anterior a 2006 23
2.1.2. Código técnico de la edificación 24
2.2. Método de diagnóstico 26
2.2.1. Ficha de toma de datos programada 27
2.3. Herramientas y tecnologías 32
2.3.1. Herramientas 32
2.3.2. Tecnologías 33

3. SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DE LA ENVOLVENTE 36
3.1. Aislamiento e inercia térmica 39
3.1.1. Aislamiento 39
3.1.2. Inercia térmica 40
3.2. Materiales innovadores 50

4. SISTEMAS DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN EFICIENTES 54
4.1. Introducción 54
4.2. Bombas de calor: Tecnología, tipologías y aplicación 56
4.2.1. Principios de funcionamiento y ventajas técnicas 56
4.2.2. Tipos de sistemas principales 59
4.2.3. Integración de sistemas híbridos y soluciones combinadas 64
4.2.4. Rendimientos, eficiencia estacional y consideración renovable 68
4.2.5. Refrigerantes 72
4.2.6. Avances tecnológicos, tendencias de mercado y retos de implementación 77
4.2.7. Consideraciones normativas y herramientas de diseño 82
4.3. Sistemas solares pasivos y activos 87
4.3.1. Sistemas solares pasivos en rehabilitación 88
4.3.2. Sistemas solares activos 91

5. ILUMINACIÓN 110
5.1. Iluminación natural y artificial 111
5.1.1. Importancia de la iluminación natural: ahorro energético, deslumbramiento y ganancia térmica 111
5.1.2. Elementos de reflexión y sombreamiento en el diseño arquitectónico 112
5.1.3. Ahorro por iluminación natural: comparación entre residencial y terciario 113
5.1.4. Herramientas de simulación para el análisis de iluminación natural . . . 116
5.1.5. Exigencias normativas: CTE DB-HE3 e iniciativas europeas en iluminación 119
5.1.6. Iluminación natural, salubridad y bienestar: impacto en salud y criterios GBCe VERDE 122
5.2. Tecnología LED y control de iluminación 124
5.2.1. Ventajas de la tecnología LED en iluminación y sustitución de luminarias obsoletas 124
5.2.2. Normativa europea y española: prohibición de lámparas ineficientes 126
5.2.3. Criterio para el diseño y selección de luminarias eficientes 127
5.2.4. Software y recursos de diseño lumínico profesional 130
5.2.5. Iluminación inteligente: sensores, control horario, detección de presencia y regulación 131
5.2.6. Contaminación lumínica y diseño responsable de la iluminación exterior 134

6. ENERGÍAS RENOVABLES 138
6.1. Tipos de energías renovables 139
6.1.1. Energía eólica (minieólica) 140
6.1.2. Minihidráulica 142
6.1.3. Biomasa 143
6.1.4. Otras energías emergentes 145
6.2. Integración, función y eficiencia 148
6.2.1. Edificios residenciales unifamiliares 148
6.2.2. Edificios residenciales plurifamiliares 151
6.2.3. Edificios terciarios e industriales 157

7. VENTILACIÓN Y CALIDAD DEL AIRE INTERIOR 166
7.1. Sistemas de ventilación mecánica 167
7.2. Control de la humedad y filtración 177

8. PATRIMONIO PROTEGIDO 182
8.1. Particularidades, limitaciones y posibilidades 183

9. FINANCIACIÓN Y AYUDAS 200
9.1. Subvenciones y créditos fiscales 201
9.2. Casos de éxito y retorno de inversión. 207
9.3. Certificados de Ahorro Energético (CAEs). 209

10. CERTIFICACIONES AMBIENTALES 214
10.1. Level's, Certificaciones VERDE, BREEAM, PassivHaus, VIVE COAM. 215
10.1.1. Level(s): Marco común europeo de sostenibilidad 215
10.1.2. VERDE (GBCe): Certificación española de sostenibilidad. 217
10.1.3. DGNB: Sello alemán con presencia en España vía GBCe 221
10.1.4. BREEAM_ES: Versión española del pionero británico 223
10.1.5. Passivhaus: Eficiencia energética extrema y confort en rehabilitación. 227
10.1.6. VIVE COAM: Marca local de calidad ambiental en proyectos (actualmente inactiva) 230
10.1.7. Comparativa de los sellos resumen de fortalezas, debilidades y uso recomendado 232
10.2. Proceso general de certificación ambiental en rehabilitación 236

11. CONCLUSIONES 238
11.1. Resumen de estrategias para la rehabilitación energética 239
11.1.1. Vivienda unifamiliar 239
11.1.2. Vivienda plurifamiliar 242
11.1.3. Edificios terciarios e industriales 247
11.2. Acciones para la sostenibilidad. 254
11.2.1. Monitorización y seguimiento de consumos. 254
11.2.2. Auditorías energéticas postobra 254
11.2.3. Certificaciones voluntarias de sostenibilidad 255
11.2.4. Mantenimiento eficiente y uso responsable 256
11.2.5. Planificación de intervenciones por fases futuras 257
11.2.6. Beneficios adicionales y conclusión final 258

12. ANEXOS 260
Anexo I – Glosario de términos 261
Anexo II – Referencias útiles 282
Anexo III – Asociaciones profesionales de referencia. 286

Esta guía que presentamos constituye el número 23 de las Guías de Asistencia Técnica editadas por el COAM. La colección surgió en el año 2000 y ha sido desde entonces un recurso muy utilizado por los arquitectos como ayuda en su ejercicio profesional. Con este número se da continuidad a la nueva etapa en versiones digitales, iniciada con la guía Nº 20.

Dirigida hacia intervenciones en edificios existentes, el objeto de la Guía GAT 23 es conseguir que, desde el diseño, se adopten soluciones sostenibles y eficientes y que los edificios se transformen en ejemplos de eficiencia energética y revalorización medioambiental y económica.

Esta publicación analiza toda una serie de estrategias para la rehabilitación energética, y de soluciones constructivas, que serán de gran utilidad para intervenir en los edificios con la mirada puesta en la descarbonización: la reducción de emisiones de CO_2 a lo largo del ciclo de vida de los edificios, desde la fabricación de materiales hasta el uso y mantenimiento, contribuyendo a la transición hacia un parque edificado más sostenible.

Felicitamos a todos los implicados en esta guía, en especial al Centro de Asesoramiento Técnico (CAT) que realiza la coordinación de toda la colección, así como el Área Gráfica, y por supuesto al autor de la guía, el arquitecto D. Alejandro Bosqued Navarro, que en colaboración con Roberto Bosqued García han plasmado su extenso conocimiento de la materia en la presente publicación.

Sigfrido Herráez Rodríguez
Decano del COAM

ASEMAS

Estimados compañeros:
Los profesionales que participamos en la edificación compartimos con los legisladores no solo la obligación de fomentar la calidad del producto nuevo que se ofrece al consumidor, sino también la mejora de la del parque edilicio y en especial su eficacia energética con el ahorro que supone y la mejora del medio ambiente.

Es nuestra voluntad la colaboración con los Colegios profesionales de arquitectos en la difusión de las mejores prácticas para la Rehabilitación Energética de nuestro patrimonio inmobiliario, con el objetivo prioritario de mejorar la eficiencia energética de los edificios existentes, reducir el consumo de recursos naturales, ayudar técnicamente en la transición y renovación de las instalaciones para una mayor eficiencia y mejorar la calidad del parque edificatorio.

Asemas de manera responsable colabora con el trabajo de difusión de todas y cada una de las medidas que mejoren nuestro entorno, la calidad ambiental y la formación técnica imprescindible en nuestra profesión para adaptarnos a las novedades .

La presente guía GAT del COAM ofrece consejos útiles y acciones prácticas de una manera didáctica y aplicable a cada proyecto para ayudar al arquitecto en la toma de decisiones, elección de equipos y diseño de redes para la consecución de los proyectos más eficientes e inteligentes con el objetivo prioritario de transformación de edificios obsoletos y degradados para su revalorización medioambiental y económica.

Sólo nos queda felicitar al COAM por esta nueva singladura de guías técnicas, iniciada con la presente y que supone una continuación de una gran labor divulgativa de esta Institución, comprometiéndonos a colaborar y participar en la difusión de este magnífico trabajo.

Fulgencio Avilés Inglés
Doctor arquitecto y presidente CA de Asemas

1 INTRODUCCIÓN

La guía Soluciones Prácticas para la Rehabilitación Energética, se enfoca en métodos prácticos y comprobados para mejorar la eficiencia energética de los edificios existentes.

Estas soluciones están basadas en experiencias reales y en proyectos ya ejecutados.

Cada sección de la guía ofrece pasos específicos y consejos verificados, todo con el objetivo de lograr resultados tangibles y medibles.

Más que un simple manual, esta guía es una hoja de ruta hacia la eficiencia energética en la rehabilitación de edificios. Se concentra en estrategias que han demostrado su eficacia.

Las páginas están diseñadas para ser accesibles, evitando la base científica y las explicaciones teóricas densas que hay tras ellas, y en su lugar, proporcionar descripciones comprensibles, consejos útiles y acciones prácticas.

Cada capítulo es una fuente de conocimiento aplicable, pensado tanto para aquellos que se inician en este campo como para los profesionales con experiencia.

En esta guía, la sostenibilidad se convierte en una práctica tangible. Con cada solución propuesta, se ofrece una dirección clara hacia un futuro más sostenible y eficiente. La guía se convierte en un aliado estratégico, asegurando que cada paso que se dé y cada decisión que se tome contribuya a la transformación de edificios ordinarios en ejemplos de eficiencia energética y revalorización medioambiental y económica.

Puesto que esta guía la encarga el Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, el ámbito principal de actuación y las soluciones tipo que se plantean, se circunscriben a la climatología y circunstancias particulares de la Comunidad de Madrid.

1.1. LA IMPORTANCIA DE LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA

La eficiencia energética en edificación, la arquitectura bioclimática y más ampliamente la sostenibilidad en urbanismo y edificación llevan *más de 10 años aumentando su demanda año tras año por cuestiones de* gobernanza social y medioambiental (ESG), los ODS 2023 de Naciones Unidas y las exigencias normativas que establece el CTE.

Los acontecimientos sucedidos desde la pandemia de COVID-19 y el conflicto bélico en Ucrania, han llevado a la Comisión Europea a acelerar el proceso a través del Green Deal, los fondos Next Generation y la nueva Bauhaus. Se impulsa por tanto, de manera decidida y rápida todos los esfuerzos dirigidos a reducir la demanda energética y la sustitución de energías de origen fósil por energías renovables a través principalmente de la rehabilitación de edificios y de la electrificación del sector de la edificación en toda la Unión con el objetivo de minimizar la dependencia energética del exterior y acelerar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero GEI, para así alcanzar las metas impuestas para el año 2030 y 2050.

Desde el año 2010, la Unión Europea viene desarrollando directivas relativas a rehabilitación en materia de eficiencia energética de edificios. En concreto la Directiva 2010/31/UE de 19 de mayo de 2010, modificada por la Directiva 2018/844/UE de 30 de mayo de 2018, en su artículo 2 bis, refiere la obligatoriedad de que los países miembros establezcan una estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación.

Con ese objetivo se redactó la ERESEE 2014[1] (Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España) en cumplimiento del artículo 4 de la Directiva 2012/27/UE.

En esa primera ERESEE ya se puso de manifiesto el impacto global que tiene la edificación en el conjunto de las emisiones GEI del país, así como el porcentaje de edificios existentes que no contribuyen a la reducción de emisión alguna, más del 80%. Esta ERESEE ha sido actualizada en las versiones 2017[2] y 2020[3]. Esta última versión fue evaluada por el Buildings Performance Institute Europe, como la mejor de las estrategias nacionales presentadas a la UE.

La ERESEE 2020 incluye el diagnóstico de diferentes cuestiones relacionadas con la rehabilitación energética de edificios, entre ellos los principales son, el diagnóstico del parque edificado, el diagnóstico del consumo de energía en el sector de la edificación y su evolución entre 2014 y 2020. Asimismo, analiza los principales retos estructurales, los objetivos a 2030, 2040 y 2050 y plantea opciones de rehabilitación del parque residencial y terciario, con diferentes escenarios e impactos previstos, según unos ejes de acción y medidas de implementación y sus respectivos indicadores para poder realizar un seguimiento adecuado.

La ERESEE 2020, es un documento de consulta imprescindible previo a cualquier trabajo de rehabilitación energética por el trabajo de catalogación de tipologías edificatorias y sus comportamientos energéticos promedio en todo el territorio nacional.

Trasposición

Artículo 2 bis Directiva 2010/31/UE

Estrategia de renovación a largo plazo:

"Cada estado miembro establecerá una estrategia a largo plazo para apoyar la renovación de sus parques nacionales de edificios residenciales y no residenciales, tanto públicos como privados, transformándolos en parques inmobiliarios con alta eficiencia energética y descarbonizados antes de 2050, facilitando la transformación económicamente rentable de los edificios existentes en edificios de consumo de energía casi nulo.[4]"

Se puede afirmar que tanto a nivel nacional como europeo, la rehabilitación energética de edificios resulta fundamental para alcanzar los objetivos de descarbonización en 2050.

1 https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/2014_article4_es_spain.pdf

2 https://www.mivau.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/20170524revisionestrategia.pdf

3 https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/eresee_2020.pdf

4 Se define como edificio de consumo de energía casi nulo, aquel edificio, nuevo o existente, que cumple con las exigencias reglamentarias establecidas en el Documento Básico "DB HE Ahorro de Energía" en lo referente a la limitación de consumo energético para edificios de nueva construcción

1.2. LA IMPORTANCIA DE LA ENVOLVENTE DEL EDIFICIO

Las soluciones prácticas que se irán presentando en los diferentes capítulos, responden a las relaciones de intercambio energético que se produce entre el entorno y el edificio. Estas se producen entre el medioambiente en el que se ubica el edificio (clima) y los cerramientos exteriores del edificio (envolvente).

La manera de conseguir el máximo de eficiencia energética de un edificio consiste en dos fases básicas, en primer lugar, reducir la demanda energética del edificio, es decir, la necesidad de aporte energético para alcanzar la situación de confort térmico interior. El IDAE (Instituto para la Diversificación del Ahorro Energético), establece los parámetros de confort térmico interior[5] en:

Estación	Tª operativa ºC	Humedad relativa %
Verano	23 a 25	45 – 60
Invierno	21 a 23	40 – 50

En segundo lugar, una vez reducida la demanda energética al máximo, proponiendo sistemas de climatización altamente eficientes y en la medida de lo posible, alimentados por fuentes de energía renovable.

Cuando se actúa en rehabilitación y por tanteo en edificios existentes, la única manera de incidir en la reducción de la demanda energética es a través de acciones que modifiquen las condiciones pre-existentes de la envolvente del edificio.

La envolvente (térmica) del edificio está compuesta por todo aquel elemento constructivo del espacio habitable en contacto con el ambiente exterior, ya sea aire o terreno. Es a través de la envolvente donde produce el intercambio energético entre exterior e interior del edificio y por tanto el elemento a tener en cuenta para actuar con el objetivo de reducir la demanda energética.

Por tanto cuestiones básicamente geométricas y de diseño del edificio existente -como son el factor de forma, el porcentaje de huecos frente a opacos- y constructivos -composición constructiva y características termo-físicas de elementos de fachada, cubierta, elementos en contacto con el terreno-, serán sobre los que habrá que actuar estableciendo un orden de prioridad en función del impacto final sobre el comportamiento global del edificio, teniendo siempre en cuenta que toda actuación de rehabilitación energética debería considerarse como una intervención integral.

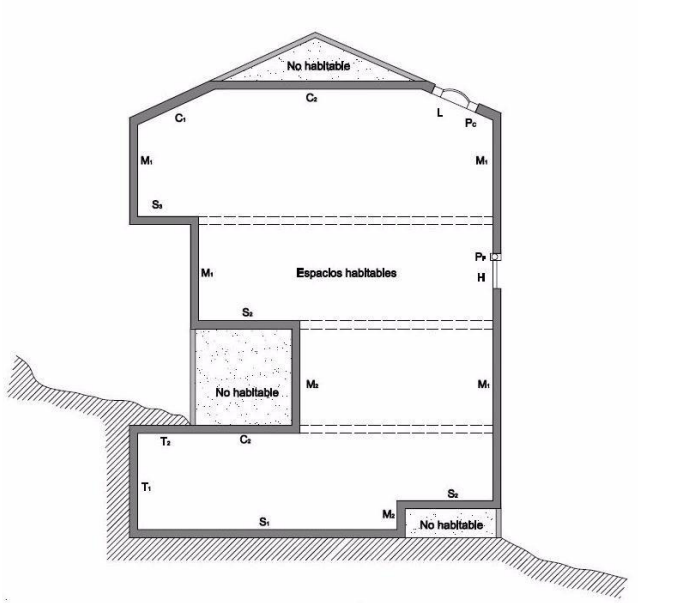
Por ejemplo:

- La cubierta y la solera siempre tendrán una influencia importante sobre el comportamiento térmico de las plantas inmediatamente inferior y superior respec-

5 Estos valores fueron modificados temporalmente durante el periodo desde agosto 2022 a noviembre 2023 en espacios públicos con temperaturas mínimas en verano de 27ºC y máximas en invierno de 19ºC

tivamente. Sin embargo, para que suponga una influencia importante sobre el comportamiento global, la superficie del elemento deberá ser al menos el 25% de la superficie total de fachada.

- Lo mismo sucede a la hora de priorizar sobre qué elementos actuar en fachada, huecos u opacos. En este caso son más las variables que afectan. Una de ellas será el porcentaje de huecos sobre opacos. Por norma general habrá que priorizar huecos cuando éstos superen el 30%, pero dependerá de otras cuestiones, como la calidad de las carpinterías existentes, el tipo de vidrio y la estanqueidad, por lo que en este caso no resulta tan evidente.



Fuente: Código Técnico de Edificación DB-HE

Otras cuestiones a tener en cuenta son los obstáculos existentes en el entorno que afecten a la envolvente, así como los posibles cambios que se puedan producir en un futuro cercano, modificaciones en la vegetación, del planeamiento, previsión de instalación de elementos en cubierta que arrojen sombra (paneles fotovoltaicos, solares térmicos, pérgolas etc.)

1.2.1. PRINCIPALES ESTRATEGIAS A EMPLEAR EN LA ENVOLVENTE

Sin entrar a detallar en profundidad cada una de las estrategias, se enumeran a continuación las estrategias que pueden emplearse en la envolvente existente y que suponen un mayor impacto en la reducción de la demanda energética del edificio:

- Invierno
  - o Captación radiación solar a través de huecos acristalados.
  - o Adición de aislamiento, preferiblemente por el exterior, en su defecto por el interior.
  - o Mejora de los huecos acristalados.
- Verano
  - o Sombreamiento.
  - o Adición de aislamiento.
  - o Mejora de los huecos acristalados.

En todo caso, sería interesante acudir a la ERESEE 2020, a consultar las características constructivas en función de la época de construcción y tipología edificatoria. En el caso de edificios con envolventes de gran masa térmica, de 1 pie, 1 ½ pie de ladrillo o mayor espesor (cerramientos pesados), la influencia de la adición de aislamiento no es porcentualmente tan importante, como en el caso de cerramientos ligeros, debido al concepto de inercia térmica que se esbozará más adelante.

1.3. BENEFICIOS AMBIENTALES Y ECONÓMICOS

1.3.1. BENEFICIOS AMBIENTALES

Los beneficios ambientales que aporta la rehabilitación energética de edificios es evidente.

En primer lugar y la más obvia, la reducción de la demanda energética implica en la mayoría de los casos una reducción de las emisiones de GEI, siempre dependiendo de la fuente de energía empleada para cubrir la demanda. Podrá ser a nivel local, donde se produce el consumo, y a nivel global en los centros de producción de energía.

La elección de sistemas de instalaciones altamente eficientes no solo contribuye a reducir el consumo energético del edificio, sino que además permite eliminar las emisiones de GEI si el consumo energético producido se cubre con fuentes de energía renovable, incluso se puede conseguir llegar a tener edificios productores de energía, que debería ser una estrategia a emplear en el caso de actuaciones a nivel de barrio.

La otra gran ventaja medioambiental que permite la rehabilitación energética, es la recuperación, reutilización y reciclado de materiales, además de la revalorización del uso del edificio frente a la obra nueva.

1.3.2. BENEFICIOS ECONÓMICOS

De acuerdo a Sociedad de Tasación[6] a petición del Observatorio 2030 del CSCAE, la revalorización económica de inmuebles rehabilitados energéticamente de más de 50 años está en torno al 24% en la media nacional, para el caso de la provincia de Madrid, en el 17,70%.

[6] https://www.st-tasacion.es/es/informes/revalorizacion-por-rehabilitacion.html

Esta revalorización económica se realiza mediante la comparación de los valores promedios unitarios (€/m²) de viviendas plurifamiliares rehabilitadas y sin rehabilitar en toda España.

En estos casos no se tiene en cuenta el ahorro en fase de uso ni antes ni después de la venta, ni inmuebles que no sean vivienda, pero los beneficios pueden ser mucho mayores para otros tipos de inmueble, en los que el consumo energético tiene una gran importancia en la operativa empresarial, edificios de oficinas, hoteles, etc.

Otro beneficio económico importante, aunque más difícil de cuantificar, es el beneficio sobre la salud que este tipo de intervenciones tiene, pues están directamente relacionadas con la calidad del aire exterior e interior, el confort térmico y la calidad de vida, lo que no solo tiene un impacto económico en la economía particular/familiar/empresarial, sino también en el gasto público.

Revalorización por Rehabilitación

Capital	Habitantes	Valor €/m² Sin Rehabilitar	Valor €/m² Rehabilitado	% Var [(2-1)/1]
Barcelona	1.664.182	2.930	3.630	23,90%
Madrid	3.334.730	3.160	3.720	17,70%
Valencia	800.215	1.330	1.790	34,60%
Sevilla	691.395	1.530	1.910	24,80%
Zaragoza	681.877	1.230	1.630	32,50%
Málaga	578.460	1.640	1.960	19,50%
Alicante/Alacant	337.482	1.030	1.420	37,90%
Palma de Mallorca	422.587	2.190	2.940	34,20%
Bilbao	350.184	2.350	2.940	25,10%
Burgos	176.418	1.170	1.540	31,60%
Coruña (A)	247.604	1.600	2.050	28,10%
Valladolid	299.265	1.080	1.470	36,10%
Granada	233.648	1.500	1.900	26,70%
Las Palmas (GC)	381.223	1.460	1.860	27,40%
Castellón	174.264	800	1.140	42,50%
Salamanca	144.825	1.420	1.960	38,00%
Oviedo	219.910	1.020	1.400	37,30%
Pamplona/Iruña	203.944	1.790	2.260	26,30%
Córdoba	326.039	1.110	1.350	21,60%
Tarragona	136.496	1.140	1.490	30,70%
Santa Cruz de Tenerife	209.194	1.350	1.740	28,90%
Cádiz	115.439	1.870	2.200	17,60%
Logroño	152.485	940	1.400	48,90%
Murcia	459.403	1.060	1.490	40,60%
Almería	201.322	960	1.320	37,50%
Ourense	105.643	1.090	1.490	36,70%
Huesca	53.956	1.080	1.480	37,00%
Girona	103.369	1.450	2.260	55,90%
Cáceres	96.255	860	1.200	39,50%
Vitoria-Gasteiz	253.996	1.850	2.470	33,50%
Huelva	143.837	870	1.100	26,40%
Guadalajara	87.484	1.150	1.390	20,90%
Media Ponderada España	**13.387.131**	**2.030**	**2.520**	**24,10%**

Fuente: Sociedad de Tasación – 1er Semestre 2022

2 EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL EDIFICIO

Para acometer cualquier actuación de rehabilitación energética de un edificio es fundamental conocer el comportamiento energético del mismo en su estado inicial o actual. Una vez se cuenta con esa información se podrán decidir una serie de medidas jerarquizadas, enfocadas a incidir en los puntos clave que reduzcan en mayor medida la demanda energética del edificio. Este será siempre el punto clave, la demanda energética. A menor demanda energética, a igualdad de sistemas de climatización, menor emisiones de CO_2.

La evaluación energética del edificio puede ser un proceso sencillo o complejo dependiendo de la exactitud en los resultados que se quieran obtener. No es objeto de esta guía analizar todas las soluciones existentes en el mercado de simulación energética del edificio, no obstante, sí se abordarán en este capítulo las características de cada una de las herramientas homologadas por el Gobierno de España para la calificación y certificación de edificios existentes y reformados y para la justificación del cumplimiento de la normativa vigente en materia de eficiencia energética, en este caso el Código Técnico de Edificación (CTE) en su Documento Básico (DB) de Ahorro de Energía (HE).

Asimismo, se aportarán soluciones tipo en función de las diferentes zonas climáticas de la Comunidad de Madrid, que aparecen en el CTE, y de las tipologías constructivas que surjan del análisis previo de la edificación, fundamental para poder tantear soluciones adecuadas.

2.1. CONTEXTO NORMATIVO

A nivel térmico y energético, se pueden diferenciar tres etapas principales en cuestiones normativas en España:

Anterior a 1979 - De 1979 a 2006 - De 2006 en adelante

2.1.1. NORMATIVA ANTERIOR A 2006

Antes del año 1979, no existía normativa alguna que obligara a establecer unas condiciones mínimas de confort y protección térmica.

A raíz de la crisis del petróleo de 1979, se introdujo la Normativa Básica de Edificación sobre Condiciones Térmicas del año 1979 (NBE-CT79)[1] en el que se concretaban unas condiciones *mínimas a cumplir tanto a nivel de coeficiente global de transmisión* K_g, de temperatura y condensaciones en cerramientos y condiciones de los materiales, con el objeto principal de reducir el consumo energético de las viviendas, mejorar la salubridad y el confort térmico interior. Es la primera vez en la historia de la construcción en España en la que se hace imprescindible en la mayoría del territorio nacional y concretamente en la provincia de Madrid, la introducción de una capa de aislamiento térmico en todos los elementos de la envolvente, para poder dar cumplimiento a la norma NBE-CT79

[1] https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1979-24866

2.1.2. CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN

"***El Código Técnico de la Edificación (CTE) es de aplicación a las edificaciones públicas y privadas de carácter permanente cuyos proyectos o memorias técnicas suscritas por técnico competente precisen disponer de la correspondiente licencia o autorización legalmente exigible.***"

"*Igualmente, se aplica a las* ***intervenciones en los edificios existentes****, ya sean ampliaciones, reformas o cambios de uso. En caso de inviabilidad o incompatibilidad para cumplir estrictamente lo exigido reglamentariamente, en este tipo de intervenciones el CTE permite cierta flexibilidad establecida tanto a nivel general como específico en función del requisito afectado. Debiendo justificarse el nivel de prestación finalmente alcanzado, junto con los condicionantes de uso y mantenimiento del edificio derivados de dicha adecuación."*[2]

Por este motivo es de especial importancia conocer las limitaciones mínimas que va a imponer la normativa, y a partir de aquí, considerar soluciones que mejoren u optimicen los requisitos normativos.

El CTE, y en concreto el DB-HE es una normativa viva que se revisa y actualiza periódicamente, en torno a 5 años, adaptando y modificando las normas a las realidades y requerimientos europeos en materia de eficiencia energética en edificación.

El CTE DB-HE 2019 (14 de junio de 2022), se divide en 6 apartados:

HE 0 – Limitación del consumo energético

HE 1 - Condiciones para el control de la demanda energética

HE 2 – Condiciones de las instalaciones térmicas

HE 3 – Condiciones de las instalaciones de iluminación[3]

HE 4 – Contribución mínima de energía renovable para cubrir la demanda de agua caliente sanitaria

HE 5 - Generación mínima de energía eléctrica procedente de fuentes renovables

HE 6 – Dotaciones mínimas para la infraestructura de recarga de vehículos eléctricos

ZONAS CLIMÁTICAS

El DB-HE 2019, en su Anejo B Zonas Climáticas, establece una clasificación de diferentes zonas climáticas para el territorio nacional, dividido por provincias. Lo clasifica en zonas por letras de la A a la E y en números del 1 al 4, estableciendo una clasificación específica fuera de esos valores, para determinadas zonas de las Islas Canarias.

En concreto, las zonas climáticas varían en función de su ubicación por provincia y de su altitud respecto al nivel del mar.

[2] https://www.codigotecnico.org/QueEsCTE/AmbitoDeAplicacion.html

[3] No afectan a uso residencial

En el caso específico de la Comunidad de Madrid, se consideran 4 zonas climáticas. La de mayor volumen de inmuebles es la D3, por ser la que incluye la ciudad de Madrid, esta zona incluye todos los municipios de la Comunidad que se encuentren entre los 550 y los 1000 m de altura sobre el nivel del mar.

Por encima de 1000m y hasta los 1050m sobre el nivel del mar, correspondería una zona climática D2.

A partir de los 1050m una zona climática E1.

Por debajo de los 550m de altura sobre el nivel del mar, la zona climática sería C3.

Cada zona climática tiene asignado un archivo de datos climáticos horarios diferente y que es la base de las condiciones climáticas en las simulaciones energéticas que se realizan para la calificación y certificación energética del edificio, el archivo base que consideran los softwares para la comprobación del cumplimiento normativo y la calificación y certificación energética del edificio.

Hasta el momento todas las versiones que han existido del DB-HE, han establecido unos criterios de limitación del consumo energético en función de la zona climática en la que se ubique el edificio. En las primeras versiones del CTE DB-HE (2006 y 2013) con bastante diferencia de limitaciones entre los climas más severos y los más favorables del territorio nacional frente al acondicionamiento energético para conseguir el confort térmico interior. En la última versión vigente a la fecha de edición de esta guía y en la previsión a futuro, estas limitaciones tienen cada vez menos diferencia de requerimientos independientemente del clima. En un futuro cercano, las limitaciones tenderán a establecer un mínimo de demanda y consumo, independientemente de la ubicación geográfica del edificio, como sucede con el estándar PassivHaus[4].

FUTURO CTE DB-HE 2026

En paralelo, la reciente refundición de la Directiva (UE) 2024/1275, de 24 de abril de 2024, relativa a la eficiencia energética de los edificios (EPBD), que persigue un parque inmobiliario de cero emisiones en 2050 y exige considerar las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio y no solo las operativas[5], se está trasponiendo parcialmente al ordenamiento español mediante el Proyecto de Real Decreto de modificación del CTE, en trámite de audiencia e información pública hasta el 9 de diciembre de 2025[6]. Este borrador supone un salto cualitativo para el DB-HE de Ahorro de Energía: por un lado, desplaza una parte de las obligaciones ligadas a la movilidad (infraestructura de recarga para vehículo eléctrico y aparcamiento de bicicletas) hacia el nuevo DB-HSA de Sostenibilidad Ambiental, donde se formulan las exigencias HSA 1 (Potencial de Calentamiento Global, que introduce un indicador de emisiones en ciclo de

[4] https://plataforma-pep.org

[5] https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/eng

[6] https://www.mivau.gob.es/recursos_mfom/audienciainfopublica/recursos/proyecto_rd_modificacion_cte_audiencia_publica_nov_25.pdf

vida coherente con la EPBD y cuyo despliegue se vincula al futuro Plan Nacional de Renovación de Edificios) y HSA 2 (Movilidad Sostenible); y, por otro, redefine el propio alcance energético del CTE al introducir en la Introducción del DB-HE el concepto de "edificio de cero emisiones", ligando su balance de energía primaria a la cobertura mediante renovables in situ o de proximidad, comunidades energéticas, redes urbanas eficientes o fuentes libres de carbono. Dentro del DB-HE, los cambios de mayor calado se concentran en tres planos:

1. En el HE 0 se ajusta la formulación de los límites de consumo de energía primaria no renovable y total, manteniendo la diferenciación por zona climática pero afinando la definición de la superficie de referencia Aref, el tratamiento de usos mixtos y las condiciones operacionales para uso residencial, además de endurecer el control de las horas fuera de consigna y clarificar el reparto de la producción fotovoltaica entre servicios.
2. En el HE 4 y HE 5 se refuerza el papel de las renovables: se precisan las condiciones para que bombas de calor y calor residual computen como contribución renovable a ACS/piscinas, se exige conexión a sistemas urbanos "eficientes" en lugar de genéricos, y se amplía de manera muy significativa el ámbito de aplicación de la generación mínima de electricidad renovable (HE 5) a edificios nuevos de más de 250 m² en la mayoría de usos no residenciales y a un espectro más amplio de reformas y cambios de uso, revisando además la fórmula de potencia mínima y el cómputo de cubiertas y cubiertas verdes.
3. Se crea una nueva exigencia básica HE 6 "Generación mínima de energía solar", que obliga a dimensionar una potencia mínima renovable en cubierta para edificios nuevos de determinada superficie útil, especialmente de uso no residencial y titularidad pública, con una cuantificación directa en función de la superficie de cubierta disponible (Pmin = 0,025·Sc), consolidando así un enfoque en el que el cumplimiento del DB-HE deja de ser solo una limitación de demanda y consumo para incorporar de manera estructural la producción renovable asociada al edificio.

2.2. MÉTODO DE DIAGNÓSTICO

El método de diagnóstico de la rehabilitación energética de un edificio consiste en una primera aproximación al problema antes de ni siquiera realizar una visita al mismo, para saber cuál es la situación de partida más probable en la que se encuentra el edificio.

Para ello conviene rellenar un listado básico que nos permita tener una aproximación clara a los puntos principales sobre los que priorizar actuaciones y así poder ver hasta qué nivel llegar, en función de los requerimientos del cliente y el impacto de cada actuación sobre el comportamiento global del edificio.

Se plantea a continuación una ficha tipo de recopilación de datos que permita definir las características constructivas y de instalaciones térmicas del edificio sin necesidad de realizar una visita al mismo, con el objeto de poder tener un orden de magnitud de posibles soluciones, coste de reforma y cálculo de honorarios muy preliminar y útil de cara a dar una respuesta rápida al cliente.

2.2.1. Ficha de toma de datos programada

Formulario para recogida de datos de proyecto de rehabilitación energética

Restablecer Formulario

Nombre de proyecto:

Ubicación

Dirección:

Población: Código Postal:

Provincia: Madrid

Altitud: 650 m

Zona Climática: D3

Ficha catastral

Referencia: Año Construcción:

Nº Plantas: Superficie/planta: Superficie construida:

Relación frente/fondo: Superficie de cubierta:

Medianeras: Si ○ No ○ Longitud: Suelo en contacto con aire: Si ○ No ○

Tipología Edificatoria

Fachada

Material exterior: Espesor cerramiento:

Huecos acristalados

Tipo vidrio: Doble Tipo carpinterías: Metálica sin RPT

Posición relativa: Interior Porcentaje aproximado: %

Aislamiento mínimo recomendado para cumplimiento CTE Calcular Enviar Formulario

Si Rehabiltación < 25% envolvente	Si Rehabiltación > 25% envolvente
SATE:	SATE:
Fachada Ventilada:	Fachada Ventilada:
Aislamiento por interior:	Aislamiento por interior:
Cubierta inclinada int: No aplica	Cubierta inclinada int:
Cubierta plana:	Cubierta plana:

https://alejandrobosqued.com/documentos/ficha_datos.pdf

Una vez se han introducido los datos en el formulario PDF, al pulsar sobre el botón calcular, se calculan los valores de espesor de aislamiento para una serie de soluciones constructivas tipo para la envolvente, con el objeto de cumplir con los requerimientos mínimos del CTE DB-HE, contemplando dos escenarios posibles, rehabilitaciones de menos del 25% de la envolvente, y obra nueva o rehabilitaciones de más del 25% de la envolvente.

Esta primera aproximación, permite dar una primera respuesta al cliente, pero evidentemente requiere de una serie de comprobaciones de la realidad construida del edificio que se analiza para poder dar una respuesta completa.

Entre las más importantes, habrá que asegurar tener los datos de las siguientes:

- Independientemente de la solución de envolvente habitual por año de construcción, comprobar mediante cata, si existe aislamiento en la cámara de aire, tipo y espesor aproximado.

- Comprobación de carpinterías y vidrios de huecos acristalados (Heterogeneidad vs. Homogeneidad)

- Instalaciones de climatización y ACS
  - o Tipo de instalación.
    - ▪ Comunitaria.
    - ▪ Individual.
  - o Combustible/Fuente de energía.
  - o Antigüedad.
  - o Existencia de depósitos acumuladores.
    - ▪ Número.
    - ▪ Volumen.

- Tipo de iluminación (solo para usos distintos del residencial privado).
  - o Tipo de luminaria (incandescente, fluorescente, led, etc…).
  - o Número de luminarias.
  - o Potencia de cada luminaria.

Con estos datos[7] ya se puede realizar una serie de cálculos más completos, que permitan valorar la reducción de demanda energética, de consumo energético y por tanto, el ahorro energético y las emisiones de CO_2 previstas. Para ello será necesario comparar el punto de partida, Estado Inicial, frente a la solución propuesta, Estado Previsto.

El CTE en su documento DB-HE 1, establece una serie de valores mínimos para el comportamiento térmico de los elementos de la envolvente en la tabla 3.1.1.a – HE1

[7] En caso de duda, conviene consultar la EREESE 2020, por tipo de uso, tipología, época, cuáles son las características constructivas más habituales y posibles soluciones.

Tabla 3.1.1.a - HE1 Valores límite de *transmitancia térmica*, U_{lim} [W/m²K]

Elemento	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Muros y suelos en contacto con el aire exterior (U_S, U_M)	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41	0,37
Cubiertas en contacto con el aire exterior (U_C)	0,55	0,50	0,44	0,40	0,35	0,33
Muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno (U_T) Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la *envolvente térmica* (U_{MD})	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65	0,59
Huecos (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana) (U_H)*	3,2	2,7	2,3	2,1	1,8	1,80
Puertas con superficie semitransparente igual o inferior al 50%	5,7					

*Los *huecos* con uso de escaparate en *unidades de uso* con actividad comercial pueden incrementar el valor de U_H en un 50%.

Estableciendo la siguiente matización:

"En el caso de reformas, el valor límite (U_{lim}) de la tabla 3.1.1.a-HE1 será de aplicación únicamente a aquellos elementos de la envolvente térmica:

a) que se sustituyan, incorporen, o modifiquen sustancialmente;

b) que vean modificadas sus condiciones interiores o exteriores como resultado de la intervención, cuando estas supongan un incremento de las necesidades energéticas del edificio.

Asimismo, en reformas se podrán superar los valores de la tabla 3.1.1.a-HE1 cuando el coeficiente global de transmisión de calor (K) obtenido considerando la transmitancia térmica final de los elementos afectados no supere el obtenido aplicando los valores de la tabla."

Por tanto, para Madrid, la transmitancia térmica[8] del hueco en su conjunto variará entre $1,8 < U_H < 2,1$ W/m²K, para zonas climáticas D-E y C respectivamente, por lo que salvo que se instalen carpinterías con valores $U_F \leq 2,1$ o 1,8 W/m²K, los vidrios deberían tener una U_w mínima en el entorno al 1,6 al 1,4 W/m²K, para que el conjunto del cerramiento acristalado alcance los valores mínimos tabulados.

[8] Es una magnitud que considera la transferencia energética a través de unidad de superficie U_{value} (W/m² ºK)

Si se tienen en cuenta los valores de transmitancia estimada que consideran programas de certificación energética como el CE3x:

TRANSMITANCIA DE VENTANAS W/m²K (estimadas)			
Tipo de Carpintería / Vidrio	**Simple**	**Doble**	**Doble bajo emisivo**
Metálica	5,7	3,6	2,5
Metálica con rotura de puente térmico	5,4	3,1	2,4
PVC	5,1	2,8	2,2
Madera	5	2,7	2,1

Se puede considerar por tanto que, para el caso de Madrid, la sustitución de ventanas aporta una mejora del comportamiento energético[9] de las ventanas de entre un 14,3 y un 68,5 %, dependiendo de si las ventanas del estado inicial son de PVC/Madera y vidrio bajo emisivo, o carpintería metálica sin rotura de puente térmico y vidrio simple. En el primer caso, sería un despropósito cambiarlas salvo que representen un porcentaje importante de la superficie de fachada.

De manera análoga se puede considerar la mejora del comportamiento energético de la parte ciega de la envolvente, comparando las transmitancias antes y después. En la siguiente tabla se muestran los valores estimados de los cerramientos tipo más habituales en la construcción en España y más concretamente en la Comunidad de Madrid:

TRANSMITANCIAS PARTES CIEGAS ENVOLVENTE W/m²K (estimadas)				
Tipo de elemento / Composición	**1 Pie ladrillo**	**½ Pie ladrillo**	**Bloque de Hormigón**	**Piedra**
Fachada 1 hoja	1,69	2,38	2,56	2,94
Fachada 2 hojas con cámara de aire		2		
Fachada 2 hojas con cámara y aislamiento 4cm		0,66	0,71	0,73
Fachada ventilada		0,79		
Cubierta plana	2,27			
Cubierta inclinada	2,56			
Solera	1,89			
Forjado en contacto con el aire	1,56 (depende del perímetro)			

[9] Es solo la mejora comparando ventanas antes y después, no el porcentaje de ahorro total que aportan. Cumpliendo estrictamente con requerimientos CTE, por lo que la mejora puede ser considerablemente mayor.

Comparando con lo establecido en la tabla 3.1.1.a del DB-HE1, para el cumplimiento estricto del CTE, podemos ver que en el caso de Madrid, las:

- Fachadas:
  - o La mejora en el comportamiento del elemento ciego de la fachada será entre el 38 % (pre NBE-CT79) y el 85 % (NBE-CT79)

- Cubiertas:
  - o La mejora en el comportamiento del elemento ciego de la cubierta será entorno al 84,6 % en el caso de cubiertas planas y del 86 % para cubiertas inclinadas.

- Solera y forjados con el aire:
  - o En el caso de soleras la mejora del comportamiento energético será entorno al 65 %.
  - o En el caso de forjados en contacto con el aire y forjados sanitarios (contacto con espacios horizontales no habitables), la mejora del comportamiento energético del elemento será del 74 % para forjados en contacto con el aire y del 58 % para forjados sanitarios o sobre espacios horizontales no habitables.

Por tanto, teniendo en cuenta solo las adaptaciones mínimas que requiere el CTE y ponderando los porcentajes de mejora de cada uno de los elementos en función de su superficie en relación con la superficie total de la envolvente, se podrá estimar un porcentaje mínimo de reducción de la demanda energética del edificio frente a su punto de partida.

Por supuesto, hay más variables que influyen en la reducción de la demanda energética del edificio sobre las que se puede actuar, pero en esta primera fase de diagnosis, ya se puede establecer una relación entre beneficio energético y coste que aporta la intervención sobre los elementos constructivos de la envolvente.

Las características de comportamiento energético de cada una de las soluciones constructivas se verán con más detalle en el siguiente capítulo, incluyendo la influencia de los puentes térmicos, la protección frente a pérdidas y/o ganancias térmicas de los huecos acristalados, etc.

2.3. HERRAMIENTAS Y TECNOLOGÍAS

2.3.1. Herramientas

Dentro de las herramientas que existen para evaluar el comportamiento energético de la rehabilitación energética, se pueden distinguir dos tipos diferenciados:

- Procedimiento general para la certificación de edificios[10]
- Procedimiento simplificado para la certificación de edificios

Para el caso que ocupa esta guía cabe indicar que siempre que se intervenga en una rehabilitación de edificios, ya sea menor o mayor al 25 % de la envolvente, hay que justificar el cumplimiento del CTE DB-HE, por lo que siempre habrá que emplear herramientas del procedimiento general.

Las principales herramientas para el procedimiento general son:

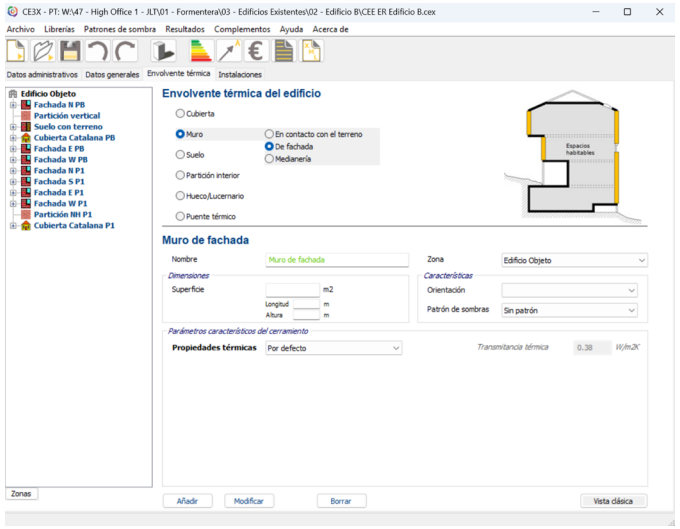
- HULC – Herramienta Unificada Lider-Calener (Herramienta con dificultad para introducir geometrías diferenciadas por plantas o volúmenes y formas complejas) - Manual de uso
- SG-SAVE – Programa realizado por efinovatic para Saint_Gobain (Mayor facilidad de uso que HULC, permite el modelado de la geometría del edificio con SketchUp) - Manual de uso
- CYPETHERM-HE Plus (Programa con flujo de trabajo que requiere el paso por diferentes programas gratuitos de CYPE – Requiere modelos BIM – Permite todo tipo de geometrías de edificios) – Manual de uso
- TeKton3D TK-CEEP (Permite importación de geometrías de modelos BIM a través de IFC) – Manual de uso
- CE3x (El más sencillo de uso, no requiere un modelo geométrico, solo introducir superficies, características termo-físicas, orientación y obstáculos de sombra de los diferentes elementos de la envolvente. NO realiza simulación energética) – Manual de Uso

Hay que tener en cuenta que hay herramientas como el CE3x, que originalmente estaban concebidas como procedimientos simplificados y que, para poder realizar el procedimiento general, requieren de la instalación de componentes complementarios; lo mismo sucede para poder introducir sistemas de instalaciones específicos y justificación del cumplimiento del DB-HE0, HE1 y HE4.

[10] https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/certificacion-energetica/documentos-reconocidos/procedimientos-certificacion-proyecto-terminados.html

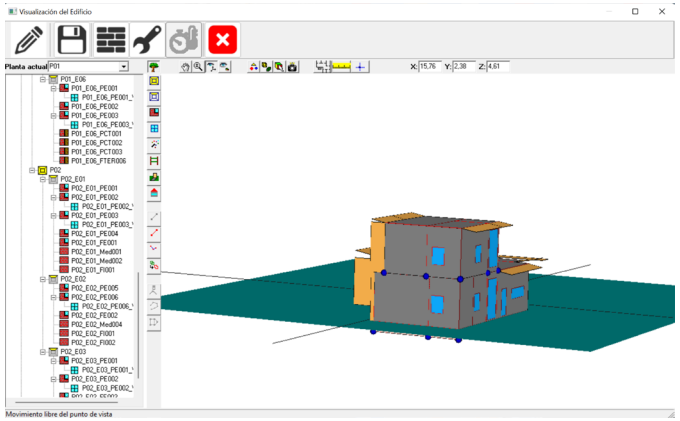
2.3.2. Tecnologías

A excepción de CE3x que utiliza un cálculo tabulado basado en tablas de datos, todas las demás herramientas anteriores están basadas en motores de cálculo para la simulación energética horaria validados científicamente.



Fuente: CE3x v2.3 – Elaboración propia

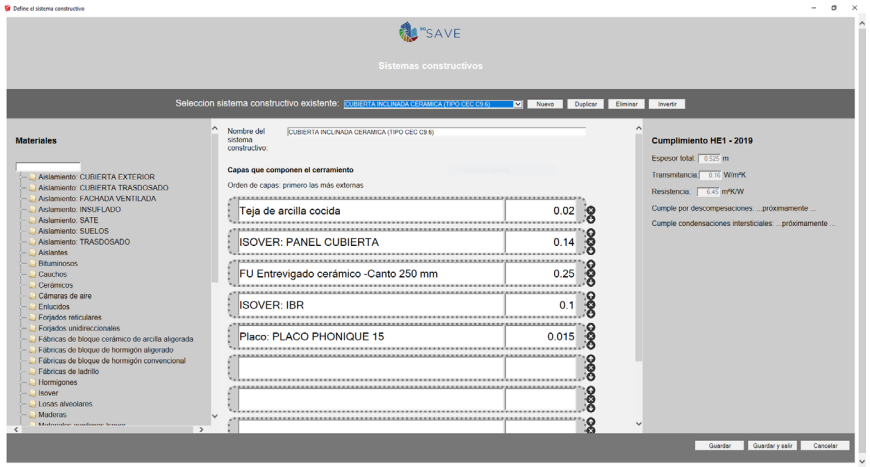
En el caso concreto de HULC, utiliza el motor de cálculo DOE-2[11], el resto están basados en EnergyPlus[12].



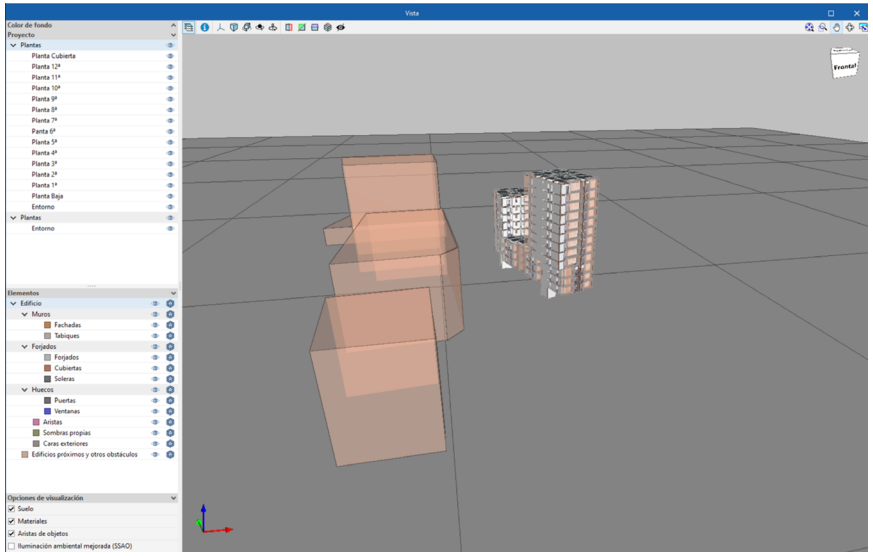
Fuente HULC – Elaboración propia

[11] https://www.doe2.com

[12] https://energyplus.net



SG SAVE – Fuente: Efinovatic

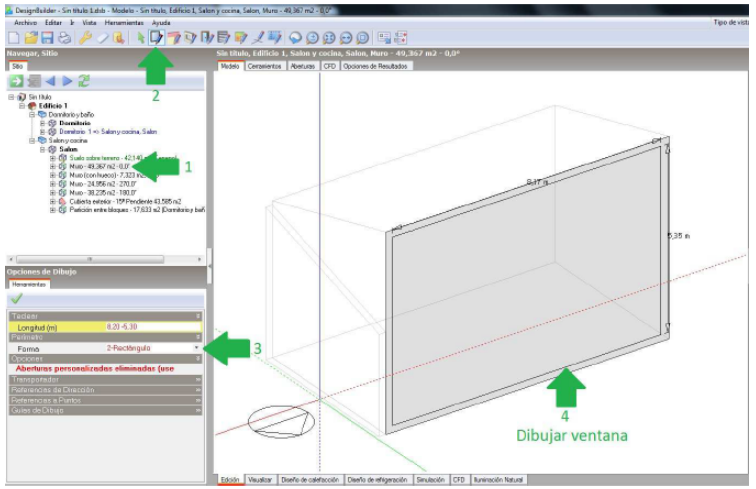


Modelo en CYPETHERM HE PLUS – Fuente: Elaboración propia

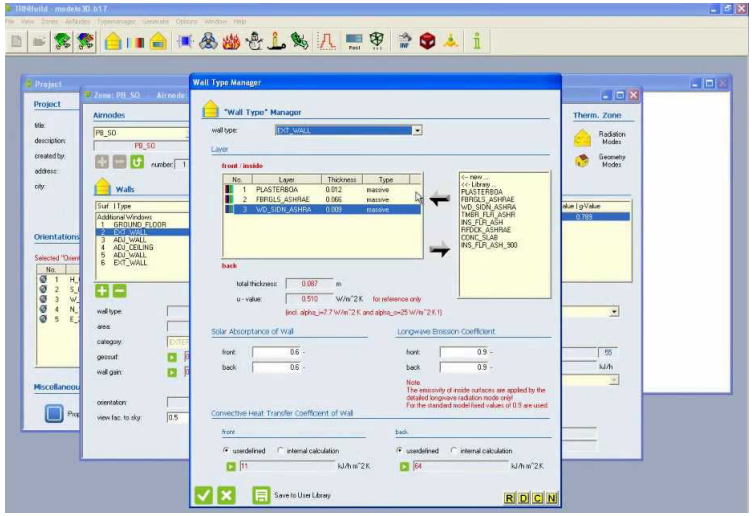
Así mismo existen otros programas que permiten la simulación energética de edificios sin justificación normativa, con una exactitud mayor en cuanto al comportamiento energético, pero sin tener en cuenta las limitaciones que establece el CTE-DBHE. Los principales softwares de pago para estas tareas son Design Builder[13] y TRNSYS[14]

[13] https://ecoeficiente.es

[14] https://aiguasol.coop/es/software-energia/trnsys-18-simulacion-energetica/



Modelo casa Rourke en DesignBuilder. Fuente: José Miguel Márquez Martinón



TRNBuild – TRNSYS – Fuente: Aiguasol

Además, on-line, existen diferentes calculadoras para la transmitancia térmica de sistemas constructivos de la envolvente https://www.es.weber/calculadora-de-transmitancia-termica, un paso previo a la simulación energética[15]. Así mismo hay configuradores para elegir vidrios con las características de transmitancia necesarias https://calumen.com/#/home

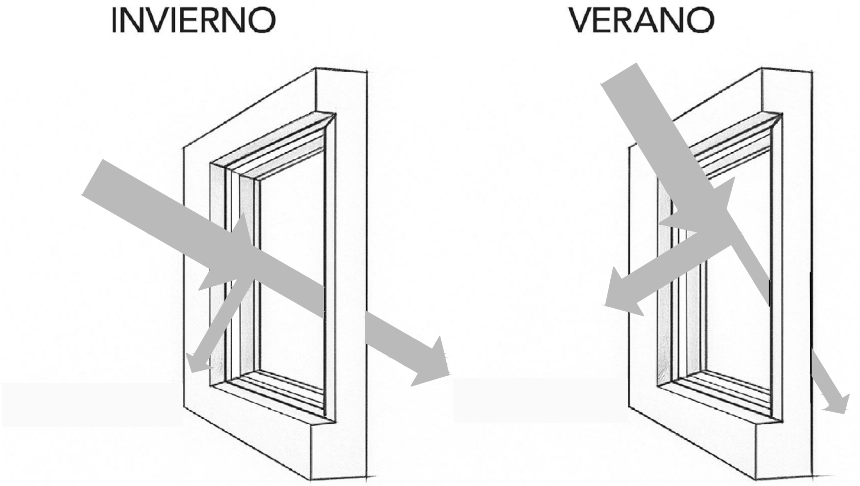
[15] Todas las herramientas citadas en el apartado, incluyen un configurador de elementos de la envolvente donde se puede ver el valor de la transmitancia.

3 SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DE LA ENVOLVENTE

La rehabilitación energética es un proceso que debe partir de una comprensión integral del estado inicial del edificio, teniendo en cuenta las características intrínsecas que no son modificables y que condicionan el comportamiento energético del mismo. Entre estos factores, destaca especialmente la orientación, que determina la captación y gestión de la radiación solar, uno de los principales recursos energéticos pasivos.

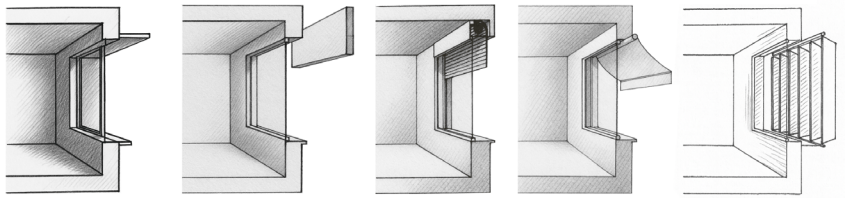
Antes de abordar el diseño energético eficiente, es fundamental evaluar si los elementos existentes de la envolvente se mantendrán en su configuración original o si se eliminarán para dejar la estructura desnuda y plantear una envolvente completamente nueva. Esta decisión inicial tiene un impacto significativo en la estrategia de rehabilitación, ya que define el marco de acción sobre el que se implementarán las mejoras.

En el caso de mantener la configuración geométrica de la envolvente, el diseño debe considerar de forma prioritaria estrategias bioclimáticas que optimicen la relación entre el edificio y su entorno. Esto implica buscar la maximización de la captación de radiación solar en periodos fríos y minimizar su incidencia en periodos cálidos. Puesto que la orientación del edificio no puede ser alterada, es necesario implementar soluciones que adapten la envolvente a estas demandas, como sistemas de sombreamiento fijos o temporales. Es de especial importancia considerar también elementos que sean obstáculos de sombra y sobre los que no se pueda actuar, como edificios existentes o futuros, que dependerán de la normativa urbanística, o vegetación existente.



Incidencia solar en Madrid. Fuente: Elaboración propia

El sombreamiento es particularmente relevante en elementos de la envolvente con gran exposición solar, como fachadas, aunque también debe considerarse en cubiertas, especialmente cuando el factor de forma del edificio –definido como la relación entre superficie de fachada y cubierta– tiende a valores cercanos a 1. En estos casos, la cubierta puede convertirse en un área crítica de ganancia solar que debe ser gestionada adecuadamente.



Soluciones de sombreamiento. Fuente: Elaboración propia sobre base Clima, Lugar y Arquitectura, R. Serra - CIEMAT

Estas estrategias de control solar deben estar diseñadas de manera que favorezcan un equilibrio entre el confort térmico interior, la eficiencia energética y la funcionalidad arquitectónica. Sombreamientos fijos, como aleros o lamas horizontales, pueden ser eficaces para reducir la radiación directa en fachadas orientadas al sur y oeste durante el verano, mientras que sistemas estacionales, como toldos retráctiles o persianas móviles, permiten una mayor flexibilidad para adaptarse a los cambios de estación.

Solo una vez establecidas estas estrategias iniciales y su integración con la geometría y orientación de la envolvente, se puede avanzar hacia el diseño de las soluciones constructivas específicas, como el aislamiento y la inercia térmica. Estos elementos, aunque fundamentales, deben ser considerados como parte de un enfoque holístico que priorice la eficiencia energética sin sacrificar el diseño arquitectónico ni el confort de los ocupantes.

La rehabilitación energética de la envolvente debe ser entendida, por tanto, no solo como un proceso técnico, sino también como una oportunidad para potenciar las capacidades pasivas del edificio y mejorar su integración con el clima y el entorno. Este enfoque garantiza soluciones que no solo cumplen con los objetivos de eficiencia energética, sino que también refuerzan la sostenibilidad y el valor arquitectónico del edificio rehabilitado.

Antes de continuar, es importante indicar que el espesor del aislamiento no tiene un comportamiento térmico lineal, por lo que duplicar el espesor del mismo, no va a reducir la transmitancia a la mitad.

Un correcto espesor de aislamiento ofrece mejoras en el comportamiento térmico de la envolvente al modificar el valor de la transmitancia térmica del cerramiento sobre el que se aplica. A partir del aproximadamente 140 mm de espesor, la incidencia que tiene aumentar el aislamiento es mínima, considerando que se puede conseguir un cerramiento adiabático -sin intercambio térmico con el exterior- a partir de los 200 mm de espesor.

3.1. AISLAMIENTO E INERCIA TÉRMICA

3.1.1. Aislamiento

El aislamiento térmico en edificación se refiere al conjunto de materiales y técnicas aplicadas en la envolvente de un edificio con el objetivo de reducir la transferencia de calor entre el interior y el exterior. Este proceso implica la instalación de barreras térmicas en paramentos verticales y horizontales, ya sean opacos o traslúcidos, utilizando materiales con baja conductividad térmica. El propósito principal es minimizar las pérdidas de calor en invierno y las ganancias de calor en verano, mejorando así la eficiencia energética del edificio, el confort térmico de los ocupantes y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental. El aislamiento térmico es un componente esencial en el diseño y la rehabilitación de edificios, ya que permite cumplir con las normativas energéticas y reducir significativamente el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los materiales aislantes térmicamente tienen una baja conductividad térmica y por tanto una alta capacidad para reducir la transferencia de calor a través de ellos.

La conductividad térmica es una medida de la capacidad de un material para conducir calor, medido en W/m·K. Materiales con baja conductividad térmica, como la lana de vidrio o de roca, el poliuretano expandido, la celulosa o el corcho, se basan en estructuras que dificultan el paso del calor al atrapar multitud de pequeñas cantidades de aire entre sus partículas o fibras. El aire, con una conductividad térmica muy baja (aproximadamente 0,026 W/m·K), actúa como un excelente aislante. Los materiales aislantes suelen tener una estructura porosa o fibrosa que atrapa pequeñas bolsas de aire. Estas bolsas de aire interrumpen el flujo de calor, ya que el aire es un mal conductor térmico. Este fenómeno se conoce como "captura de aire" y es fundamental para la eficacia de los materiales aislantes.

Podría surgir entonces la pregunta de por qué, si el aire es tan mal conductor térmico, es necesario incluir materiales aislantes en un cerramiento. La respuesta es sencilla, la cámara de aire tiene una serie de limitaciones. Las principales son las siguientes:

- Puede transferir calor a través de la convección. En una cámara de aire, el aire puede moverse y formar corrientes convectivas, lo que facilita la transferencia de calor entre las superficies interna y externa. Además, si la cámara no es estanca y está ligeramente ventilada, esta sufre intercambios de aire entre interior y exterior, a través de juntas, mecanismos de instalaciones eléctricas, etc…, produciendo pérdidas considerables de energía.

- El calor también se puede transferir por radiación a través de la cámara de aire. Las superficies internas de la cámara pueden emitir y absorber radiación térmica, lo que contribuye a la transferencia de calor.

- Las superficies que delimitan la cámara de aire, como las hojas interior y exterior, también tienen sus propias conductividades térmicas. Si estas superficies no están adecuadamente aisladas, pueden permitir la transferencia de calor, reduciendo la eficacia de la cámara de aire.

Por este motivo, para mejorar la eficiencia térmica de la cámara de aire, es necesario, especialmente para un clima como el de Madrid, añadir materiales aislantes que tengan una conductividad térmica aún más baja que el aire y que están diseñados para mitigar y limitar tanto la convección como la radiación.

3.1.2. INERCIA TÉRMICA

La inercia térmica en edificación se refiere a la capacidad de los materiales de construcción para absorber, almacenar y liberar calor de manera gradual. Esta propiedad es fundamental para el comportamiento térmico de los edificios, ya que permite amortiguar las fluctuaciones de temperatura entre el día y la noche, así como entre estaciones, según sea el desfase de la onda térmica y las necesidades climáticas. En el caso de Madrid, lo más interesante es tener un desfase de la onda térmica, que amortigüe las diferencias de temperatura entre día y noche.

La inercia térmica depende de la capacidad calorífica de los materiales, que es la cantidad de calor que un material puede almacenar por unidad de masa y por grado de temperatura (J/kg·K). Materiales con alta capacidad calorífica, como el hormigón y la piedra, pueden almacenar grandes cantidades de calor.

Por este motivo, La densidad (kg/m³) y la masa de los materiales influyen directamente en su inercia térmica. Materiales más densos y masivos tienen una mayor capacidad para almacenar calor, lo que contribuye a una mayor inercia térmica.

La inercia térmica se mide mediante la amortiguación y el desfase de la onda térmica. La amortiguación se refiere a la reducción de la amplitud de las variaciones de temperatura, mientras que el desfase es el retraso temporal entre el pico de temperatura exterior y el pico de temperatura interior.

La inercia térmica tiene una serie de implicaciones directas en el comportamiento energético de los edificios, por ejemplo, contribuye significativamente al confort térmico de los ocupantes, manteniendo temperaturas interiores más estables y reduciendo el tiempo de funcionamiento de sistemas convencionales de calefacción y refrigeración. Es un componente esencial en el diseño bioclimático, que busca optimizar el uso de recursos naturales para mejorar la eficiencia energética y el confort de los edificios.

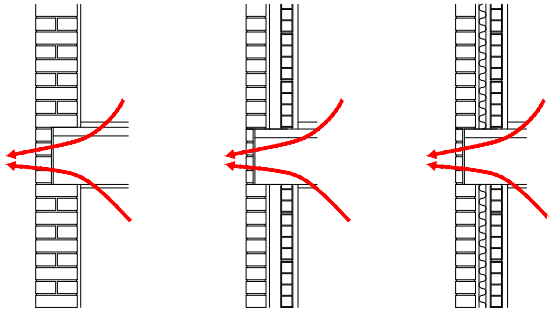
Son pocos los programas de simulación energética que consideran la inercia térmica de la envolvente y los elementos constructivos interiores. En concreto, las herramientas del procedimiento general de certificación energética de edificios no realizan cálculos de inercia térmica.

Hay que tener en cuenta que estas herramientas solo consideran la transmitancia del elemento constructivo, siendo ésta independiente de la posición relativa del aislamiento y por tanto del contacto con el espacio interior del elemento con masa térmica capaz de dotar de mayor inercia térmica al conjunto constructivo, como se verá a continuación, al poner en conjunto los conceptos de aislamiento e inercia térmica.

Es necesario, para poder seguir adelante con la influencia del aislamiento y la inercia térmica en la rehabilitación energética, explicar una serie de conceptos o fenómenos que se producen especialmente en construcciones previas al CTE:

- Infiltraciones: La falta de estanqueidad, especialmente en el contacto Cerramiento de fachada (ciego) – Hueco acristalado, aunque también en la propia carpintería de la ventana, produce unas renovaciones del aire interior -con aire exterior- incontroladas, lo que implica importantes pérdidas energéticas y consumos excesivos de climatización. Este problema también afecta, aunque en menor medida, al cerramiento de fachada propiamente dicho, por intercambios que se pueden producir en las cámaras de aire, en ocasiones ligeramente ventiladas y los elementos de instalaciones incorporados en el trasdós como mecanismos eléctricos, etc.

- Puente térmico[1]: Se define como una zona específica de la envolvente térmica de un edificio donde se produce una discontinuidad en el aislamiento térmico, lo que resulta en una mayor transmisión de calor en comparación con las áreas adyacentes. Esta discontinuidad puede deberse a variaciones en el espesor del cerramiento, cambios en los materiales empleados, o la penetración de elementos constructivos con diferente conductividad térmica. Los puentes térmicos se forman en puntos donde el aislamiento no es continuo, principalmente en encuentros entre estructura y fachada, cubierta y fachada, solera y fachada, y en carpinterías y vidrios. Lo que sucede en estos lugares es la presencia de materiales con conductividades térmicas significativamente diferentes en contacto directo, lo que, si no se trata de manera adecuada, puede crear un camino de menor resistencia térmica, permitiendo una indeseada transferencia de calor.



Fuente: Elaboración propia

[1] Más información detallada sobre puentes térmicos en el Documento de Apoyo al Documento Básico DA DB-HE https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA-DB-HE-3_Puentes_termicos.pdf

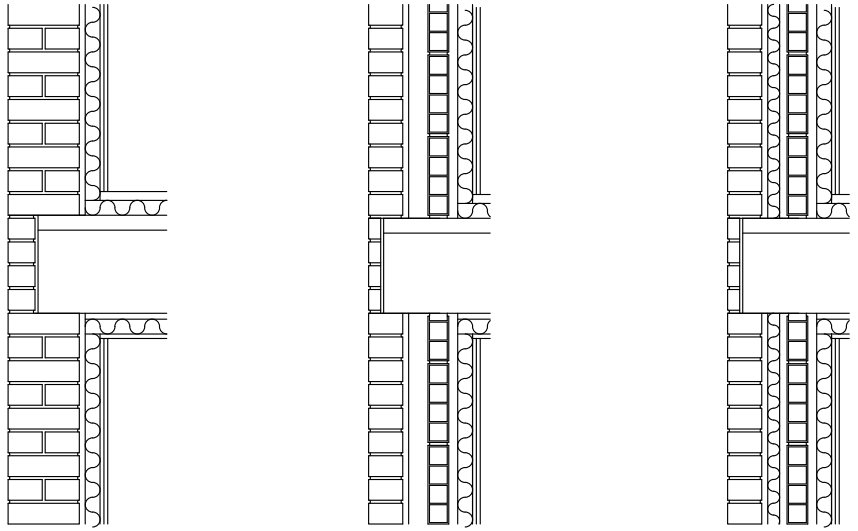
- Los puentes térmicos son puntos críticos que permiten la pérdida de energía en invierno y la ganancia en verano, reduciendo la eficiencia energética del conjunto, con el consiguiente aumento del consumo energético de climatización.
- Además, en climas fríos, pueden producirse condensaciones en las superficies interiores, con los consiguientes problemas de salubridad.
- Se crean variaciones de temperatura longitudinal, suficientemente sensibles, apareciendo zonas frías o calientes que afectan negativamente el confort térmico interior.

Relacionando entre si todo lo expuesto anteriormente, se llega a una serie de soluciones constructivas de la envolvente, dirigidas a optimizar el comportamiento energético, empleando el aislamiento térmico para reducir los puentes térmicos y, cuando es posible, maximizar la inercia térmica de la solución resultante de la rehabilitación energética.

Las soluciones para mitigar al máximo, que no eliminar por completo, los puentes térmicos, pasa por las dos únicas estrategias de aislamiento posibles con sus diferentes variables:

- **Aislamiento por el interior**
  - Es imprescindible asegurar la continuidad del aislamiento, por lo que se requiere una solución tipo caja dentro de la caja. Esta solución consiste en aislar todos los paramentos interiores que delimitan los espacios habitables, abarcando tanto los muros en contacto con el exterior o con espacios no habitables, como en cara superior e inferior de forjados, -suelos y techos-. Uno de los mayores retos de esta estrategia es resolver adecuadamente las uniones entre paredes, techos y suelos, que son zonas críticas donde suelen aparecer pérdidas térmicas importantes. Aquí, la atención al detalle constructivo es esencial para lograr un sellado adecuado. Esta solución presenta una serie de inconvenientes, principalmente la reducción de volumen interior, y especialmente de altura libre de los espacios en los que se realiza, lo que limita la actuación en muchas tipologías en las que la altura libre sea igual o menor de 2,50 m.

  - También hay que considerar que dependiendo de la época de construcción y por tanto de la solución constructiva, en edificios antiguos con fachada de muros portantes con espesores superiores a los 30 – 40 cm en la hoja exterior y estructura de madera, surge una particularidad interesante, pues presentan un comportamiento térmico diferente. En estos casos, el propio espesor del muro actúa como un aislamiento natural, reduciendo significativamente el impacto del puente térmico en los cantos de forjado que están embebidos en la fachada. Este fenómeno puede hacer menos prioritario el tratamiento específico de los cantos de forjado, aunque no exime de la necesidad de asegurar la continuidad del aislamiento en el resto del sistema interior, es decir, en los elementos verticales de la envolvente, especialmente en particiones en contacto con espacios no habitables y cerramientos de



Soluciones pre NBE-CT79 Solución NBE-CT79

Aislamiento por el interior continuo sobre solución existente

Fuente: Elaboración propia

espesor menor a 50 cm.

  - Otro aspecto fundamental en la aplicación del aislamiento interior es la gestión adecuada del vapor de agua. Al intervenir desde el interior, se modifica el equilibrio higrotérmico del cerramiento, lo que puede generar problemas de condensación si no se diseña correctamente. La inclusión de barreras o frenos de vapor en el lado cálido del aislamiento ayuda a evitar este problema, preservando la durabilidad del sistema y la calidad del ambiente interior.

  - El éxito de esta estrategia depende en gran medida de una correcta elección de los materiales. Los aislamientos con baja conductividad térmica, como el poliestireno extruido, la lana mineral o sistemas multicapa, son especialmente eficaces. Sin embargo, más allá de las propiedades térmicas, es crucial prestar atención al comportamiento de los materiales frente a la humedad y su capacidad de adaptarse a las condiciones interiores del edificio.

  - Esta solución impide el aprovechamiento de la inercia térmica, por estar la capa de aislamiento por delante de la hoja con masa térmica, ya sea en el cerramiento de fachada o en las caras superior e inferior de los forjados. Por este motivo habrá que considerar, mediante el análisis con las herramientas de certificación energética, qué solución es la menos

perjudicial, lo que dependerá como es lógico de diversos factores, principalmente la accesibilidad solar del edificio y la longitud de los puentes térmicos que exista.

Programas como CYPETHERM HE Plus, permiten identificar el porcentaje de intercambio energético a través de cada uno de los elementos que afectan al comportamiento energético del edificio.

- **Aislamiento por el exterior**

Las soluciones constructivas que plantean aislamiento térmico por el exterior de la envolvente, en rehabilitación, presentan tres ventajas fundamentales:

1. Permite intervenir sin alterar el uso del espacio interior y mejora significativamente el comportamiento térmico del edificio.
2. La continuidad del aislamiento es inmediata y no requiere más que atacar el problema de manera directa, actuando exclusivamente sobre los elementos de la envolvente.
3. Favorece el aprovechamiento de la inercia térmica en los paramentos verticales interiores, siempre y cuando se tenga en cuenta que la hoja expuesta al ambiente interior sea una hoja con masa térmica, es decir, que cuando se actúa sobre soluciones constructivas de doble hoja, se elimine el trasdós y exista un contacto directo sin aislamiento, ni cámaras de aire, entre la hoja y el acabado interior.

Se diferencian dos soluciones constructivas principales:

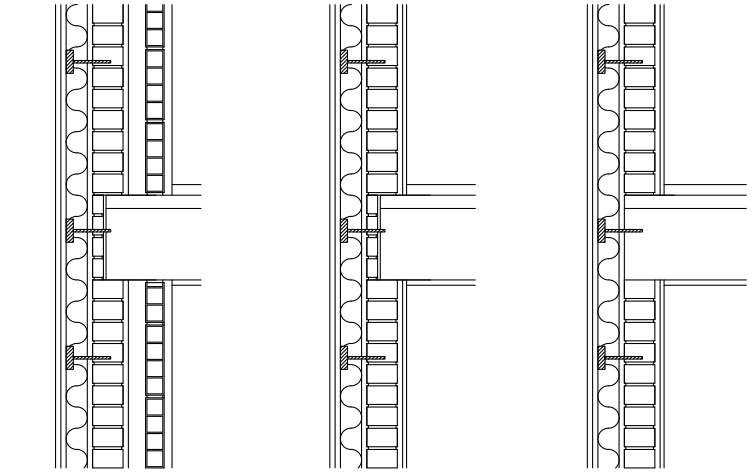
- **SATE – Sistema de Aislamiento Térmico Exterior**

  Es una solución constructiva que consiste en la instalación de una capa continua de aislamiento térmico sobre la cara externa de los cerramientos de un edificio, recubierta con un revestimiento protector y decorativo. Este sistema se fija mediante adhesivos, fijaciones mecánicas, o una combinación de ambos, y se completa con capas de refuerzo, como mallas de fibra de vidrio, para mejorar su resistencia mecánica y durabilidad.

  Es un sistema directo y ligero, que permite una ejecución rápida, ya que el despiece del material de aislamiento permite recortes rápidos con herramientas comunes, lo que facilita la adaptación a geometrías lineales de cualquier tipo, así como mantener elementos existentes en fachada, como máquinas de aire acondicionado, luminarias, etc…, lo que lo convierte en una solución económica y polivalente.

  El SATE ha evolucionado bastante recientemente y ya ofrece acabados exteriores con múltiples posibilidades de apariencia material en su acabado exterior más allá del mortero hidrófugo pintado.

Prácticamente todos los fabricantes de SATE, facilitan un catálogo de detalles constructivos tipo para sus productos.



Fuente: Elaboración propia

- **Fachada Ventilada**

  La fachada ventilada, por su denominación puede llevar al error, puesto que es rara la vez, que la ventilación tiene el efecto chimenea que se le presupone, principalmente porque la irregularidad de los materiales que intervienen en su composición, así como los múltiples elementos que interrumpen el canal de aire que se produce, huecos de ventana, travesaños de la subestructura, etc.

  Por tanto, el principal efecto energético que realmente tiene en todos los casos la fachada ventilada, es el de, al llevar el aislamiento por el exterior, permitir el aprovechamiento de la inercia térmica de la hoja portante, así como el de mantener el aislamiento protegido de la radiación solar y en una cámara de aire, por lo general, libremente ventilada, lo que permite reducir el espesor de éste.

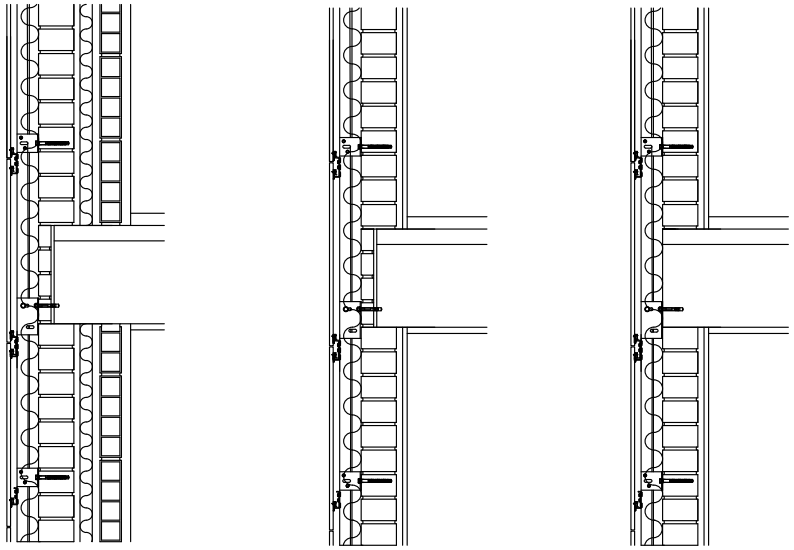
  Es una solución constructiva más pesada que el SATE. Necesita de una subestructura que sea soporte de la solución de acabado exterior, y de mayor nivel de detalle a la hora de su definición, puesto que requiere de piezas específicas que vengan de taller que se adapten a la geometría de la fachada del edificio. Es una solución más cara que el SATE, y requiere mayor tiempo de ejecución; a cambio, tiene mayor durabilidad, mayor calidad, materiales de acabado exterior ilimitados, etc..



Detalle de diferentes aislamientos y capas en un SATE. Instalación en ETSEM UPM.
Foto: A. Bosqued.

Aporta unas ventajas añadidas en el aspecto exterior de fachada como:

- Eliminación de fisuración en la capa de acabado.
- Eliminación de condensaciones intersticiales.
- Supresión de la condensación superficial y aparición de eflorescencias.
- Protección de la estructura y del cerramiento interior contra la acción directa de los agentes atmosféricos.
- Buena conservación del aislante exterior.
- Fácil colocación en obra, independientemente de las condiciones climáticas.
- Facilidad de mantenimiento y sustitución de piezas.



Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, los materiales que componen este tipo de cerramientos deben poseer las siguientes características:

- Elevada resistencia mecánica.
- Elevada resistencia al choque térmico.
- Reducida absorción de agua.
- Incombustibilidad.
- Estabilidad de los colores a la luz solar.
- Resistencia a los ataques químicos y a la contaminación.
- Facilidad de utilización.
- Reducido mantenimiento.
- Fácil reciclabilidad.



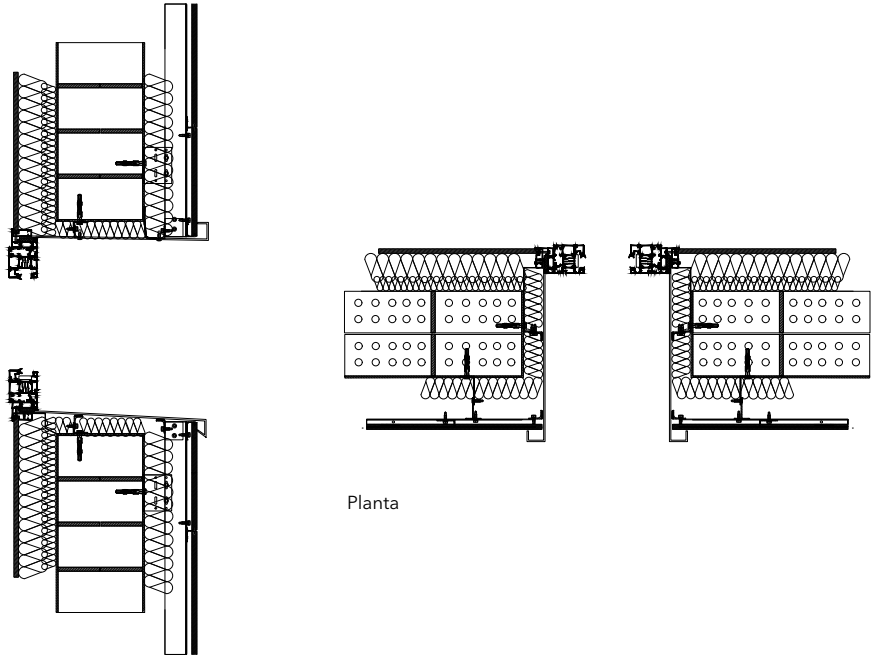
Detalle fachada ventilada de aplacado cerámico faveton. Foto: A.Bosqued.

Por tanto, se puede concluir que las principales estrategias a realizar en la Comunidad de Madrid son:

- Reducir la demanda energética del edificio existente, ya sea mediante la sustitución completa de la envolvente, optimizando la proporción de huecos y opacos de la nueva envolvente, para adaptarse de la mejor manera posible al entorno existente y al clima; o en su defecto, optimizar la envolvente existente.

- Analizar obstáculos de sombra existentes o posibles a futuro para definir elementos de sombreamiento, de manera que permitan el aprovechamiento de la radiación solar a través de los huecos acristalados en periodos fríos y la eliminen o limiten al máximo en periodos cálidos, de manera que reduzcan la demanda energética de la envolvente.

- Plantear soluciones de mejora del aislamiento, tanto en huecos como en opacos de la envolvente, teniendo en cuenta las ventajas que la medida aporta, más allá de la evidente reducción de la transmitancia térmica de la solución resultante.
- A tener en cuenta:
  - o Para combatir los puentes térmicos, es imprescindible asegurar la continuidad del aislamiento en toda la envolvente del edificio.
  - o Para aprovechar la inercia térmica, los paramentos verticales y horizontales



Detalle hueco de ventana en fachada ventilada. Fuente: ULMA

interiores, tienen que tener su capa de masa térmica, el elemento pesado, sin obstáculos como cámaras de aire o aislamiento, es decir, en contacto directo con el ambiente interior.

  - o Es especialmente importante, tener en cuenta el comportamiento de los huecos acristalados, planteando sistemas que tengan un buen comportamiento energético, no solo en lo que a transmitancia térmica se refiere, sino también en cuanto a estanqueidad del sistema, y de la solución constructiva a ejecutar, para asegurar la estanqueidad y la mitigación del puente térmico en el encuentro entre el conjunto carpintería-vidrio y la parte ciega de la fachada.

3.2.

3.3. MATERIALES INNOVADORES

La eficiencia energética en edificación es esencial para reducir el consumo de energía y minimizar el impacto ambiental. La innovación en materiales de construcción ha permitido el desarrollo de soluciones avanzadas que mejoran el aislamiento térmico y la inercia térmica de los edificios.

En las últimas décadas, la creciente demanda de edificios más eficientes y sostenibles ha impulsado el desarrollo de materiales innovadores en el sector de la construcción. Un aspecto notable de esta evolución es que gran parte de estas soluciones no han surgido exclusivamente dentro de la industria de la edificación, sino que son adaptaciones de tecnologías y materiales desarrollados inicialmente para otros sectores, como la aeronáutica, la industria energética, la medicina o la automoción.

Estos sectores, debido a sus exigentes requisitos técnicos y normativos, han liderado históricamente la investigación y desarrollo de materiales avanzados, caracterizados por su ligereza, resistencia, aislamiento térmico y comportamiento frente a condiciones extremas. Por ejemplo, los aerogeles, ampliamente utilizados en la industria aeroespacial por su excepcional capacidad aislante y bajo peso, han sido adaptados como sistemas de aislamiento térmico en edificios, permitiendo una eficiencia energética sin precedentes con espesores reducidos.

De manera similar, los materiales de cambio de fase (PCMs), diseñados originalmente para la regulación térmica en la industria energética y la electrónica, se han integrado en elementos constructivos, como tabiques y suelos, para estabilizar las temperaturas interiores de los edificios. Esta capacidad de almacenar y liberar calor durante sus transiciones de fase es ahora una herramienta clave en el diseño de edificaciones de consumo casi nulo.

La nanotecnología, con aplicaciones pioneras en la medicina y la fabricación de componentes electrónicos, también ha encontrado un lugar en la edificación. Nanomateriales como los nanotubos de carbono o las nanopartículas cerámicas están mejorando las propiedades de aislamientos tradicionales, revestimientos y vidrios, logrando un rendimiento energético optimizado sin incrementar significativamente el peso o el espesor de los sistemas constructivos.

Este enfoque de transferencia tecnológica no solo amplía las posibilidades de diseño y ejecución en la construcción, sino que también acelera la implementación de soluciones altamente eficaces y sostenibles. Sin embargo, la integración de estos materiales en sistemas constructivos convencionales requiere adaptaciones específicas para cumplir con las normativas locales, garantizar la durabilidad a largo plazo y facilitar su aplicación en obra, especialmente en proyectos de rehabilitación energética.

Se presentan algunos de los materiales más destacados en este ámbito.

Aerogeles

Los aerogeles son materiales ultraligeros con una estructura porosa que les confiere una baja conductividad térmica. Su capacidad aislante es superior a la de los materiales tradicionales, permitiendo reducir el espesor de las capas de aislamiento. Además, son resistentes al fuego y presentan una alta durabilidad. Este material lo empleó en construcción por primera vez Richard Buckminster Fuller en el año 1967 en la Biosfera de Montreal[2].

Paneles de Aislamiento al Vacío (VIPs)

Los paneles de aislamiento al vacío consisten en un núcleo poroso encapsulado en una envoltura hermética al vacío, lo que reduce significativamente la transferencia de calor. Ofrecen un alto rendimiento térmico con espesores mínimos, siendo ideales para rehabilitaciones donde el espacio es limitado. Durante el proceso de fabricación, se extrae todo el aire del interior del panel con el fin de evitar que los gases y la humedad puedan penetrar en el panel. Al mismo tiempo, este diseño permite que el panel obtenga un valor mínimo de conductividad térmica inferior a 0,003 W/mK.

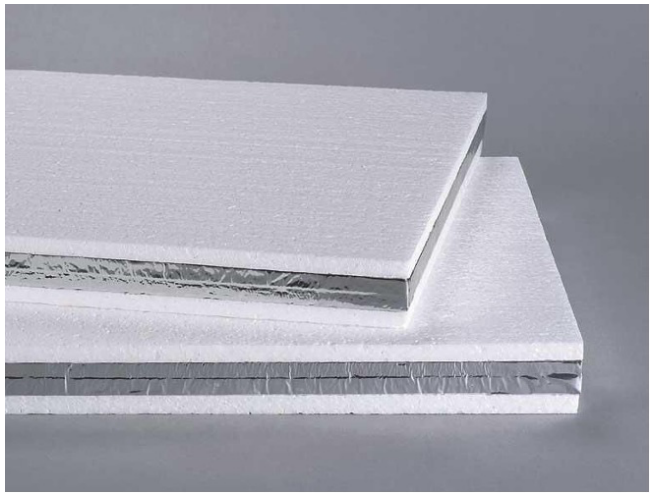


Fuente: https://wp.uaslp.mx/sinergia/2022/11/17/usos-del-aerogel/

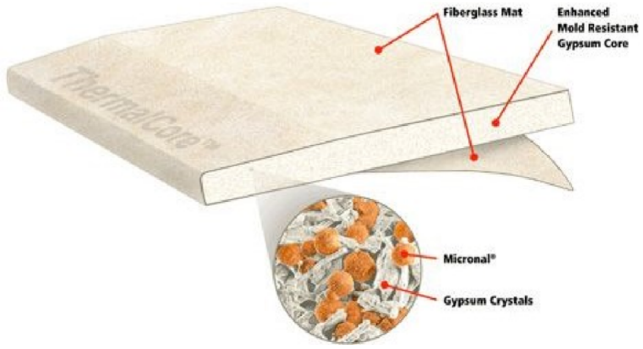
Materiales de Cambio de Fase (PCMs)

[2] https://www.expocihachub.com/nota/construccion-360/aerogel-clave-para-la-construccion-del-futuro

Los materiales de cambio de fase tienen la capacidad de almacenar y liberar energía térmica durante sus transiciones de fase (de sólido a líquido y viceversa). Incorporados en elementos constructivos, ayudan a estabilizar la temperatura interior, mejorando el confort y reduciendo la demanda energética. La empresa BASF desarrolla PCMs bajo la marca Micronal®[3].



Fuente: Vacupor PS-B2-S



Fuente: BASF

[3] https://www.eurogypsum.org/wp-content/uploads/2015/05/N0322.pdf

Nanomateriales

La nanotecnología ha permitido el desarrollo de materiales con propiedades térmicas mejoradas. Por ejemplo, los nanotubos de carbono y las nanofibras pueden incorporarse a aislantes tradicionales para aumentar su eficacia sin incrementar el espesor. Empresas como *Cabot Corporation* están a la vanguardia en este campo.

Materiales naturales y sostenibles

El corcho proyectado es una opción natural, reciclable y sostenible que se está utilizando cada vez más para aislamiento térmico y acústico en fachadas y techos. Su aplicación en forma de membrana proyectada permite crear una barrera eficaz contra las temperaturas extremas, evitando fisuras gracias a su flexibilidad. Además, es resistente al fuego y a la humedad.



Fuente: https://materialeselarco.com/corcho-proyectado/

Espumas de poliuretano de alta densidad

Si bien, no es la solución más adecuada por su alto nivel de toxicidad, las espumas de poliuretano de alta densidad ofrecen excelentes propiedades aislantes con un peso reducido. Su aplicación in situ permite cubrir superficies irregulares, garantizando la continuidad del aislamiento y eliminando puentes térmicos. No obstante, salvo que se aplique sobre un espacio abierto que pueda ser confinado inmediatamente durante el corto periodo de expansión de la espuma (sistemas tipo Wood Frame[4], cubiertos con una plancha de madera), resulta imposible asegurar homogeneidad y continuidad en el espesor del aislamiento.

[4] https://www.dreamstime.com/male-builder-insulating-wooden-frame-house-man-worker-spraying-polyurethane-foam-inside-future-cottage-using-plural-component-video262810858

4
SISTEMAS DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN EFICIENTES

La optimización de los sistemas de calefacción y refrigeración constituye uno de los pilares fundamentales en la rehabilitación energética de edificios. En el contexto de Madrid, donde las variaciones térmicas diurnas y estacionales requieren soluciones adaptativas, la elección de tecnologías de alto rendimiento resulta decisiva tanto para reducir la demanda energética como para garantizar el confort térmico interior. Este capítulo analiza en profundidad dos líneas de actuación: las bombas de calor y los sistemas solares (pasivos y activos), resaltando su integración y sinergia en proyectos de rehabilitación.

4.1. INTRODUCCIÓN

La rehabilitación energética de edificios es un pilar clave para alcanzar los objetivos de descarbonización en Europa, especialmente en entornos urbanos consolidados como la Comunidad de Madrid. En las edificaciones existentes, la climatización (calefacción y refrigeración) y el agua caliente sanitaria (ACS) representan una fracción sustancial del consumo energético. La sustitución de sistemas convencionales (como calderas de gasóleo o gas natural y equipos de aire acondicionado antiguos) por tecnologías más eficientes y renovables se ha convertido en una estrategia imprescindible. En este contexto, las bombas de calor despuntan como la solución protagonista al aprovechar energía térmica del ambiente (aire, suelo o agua) para climatizar con un consumo eléctrico muy reducido. Las bombas de calor permiten cubrir tanto la demanda de calefacción en invierno como la de refrigeración en verano con un solo sistema, algo especialmente valioso en climas continentales extremos como el de Madrid (inviernos fríos y veranos calurosos). Además, cuando cumplen ciertos requisitos de rendimiento, se consideran fuentes de energía renovable según la normativa europea y española, contribuyendo al porcentaje mínimo de renovables exigido en edificios[1].

Este capítulo ofrece abordar las tecnologías de calefacción y refrigeración eficientes basadas en bombas de calor, detallando los tipos principales (aire-agua –aerotermia–, geotermia, configuraciones monobloc y bibloc) y sus principios de funcionamiento. A continuación, se realiza una comparativa entre aplicaciones domésticas y del sector terciario/industrial, ilustrando diferencias de escala, rendimientos y ejemplos de fabricantes líderes. Seguidamente, se explora la integración de sistemas híbridos, como la combinación de aerotermia con energía solar fotovoltaica o de geotermia con solar térmica, analizando las implicaciones técnicas y espaciales (por ejemplo, la duplicidad de depósitos de acumulación). Se presentan los rendimientos alcanzables por estas tecnologías y se resume la normativa vigente (europea y española) que define en qué condiciones una bomba de calor se considera fuente renovable.

Asimismo, se incluye un estudio detallado de los refrigerantes empleados: refrigerantes actualmente autorizados, sustancias ya prohibidas y aquellas que lo estarán próximamente en España y la UE, incluyendo cómo influyen en el diseño y tamaño de las unidades exteriores. El capítulo también destaca los avances

[1] https://www.caloryfrio.com/ahorro-energia/rehabilitacion-energetica/aplicacion-de-bombas-de-calor-aerotermicas-en-rehabilitacion-edificios.html

tecnológicos recientes, las previsiones de mercado y los retos para la implementación masiva de estas soluciones tanto en viviendas como en edificios terciarios.

Finalmente, se aportan consideraciones normativas específicas (CTE, RITE, IDAE, Eurovent, etc.), propuestas innovadoras y referencias a herramientas de simulación energética útiles en el proceso de proyecto. Todo ello se presenta con un estilo técnico y riguroso, estructurado en secciones claras (introducción, desarrollo técnico, análisis normativo, conclusiones), incluyendo datos empíricos y recomendaciones prácticas adaptadas al clima y normativa de la Comunidad de Madrid.

4.2. BOMBAS DE CALOR: TECNOLOGÍA, TIPOLOGÍAS Y APLICACIÓN

Las bombas de calor son equipos de climatización que transfieren calor de un medio a otro mediante un ciclo termodinámico, en lugar de generarlo directamente por combustión o efecto Joule. Gracias a ello, pueden entregar más energía térmica útil de la que consumen en forma de electricidad, alcanzando coeficientes de rendimiento muy superiores a 1 (por ejemplo, un COP = 4 implica que por cada 1 kWh de electricidad consumida se aportan 4 kWh de calor). Este principio de bomba térmica permite aprovechar fuentes de energía del entorno: el aire exterior (aerotermia), el terreno (geotermia) o incluso el agua de acuíferos o subterránea (hidrotermia). A continuación, se describen los tipos más relevantes en rehabilitación de edificios:

4.2.1. Principio de funcionamiento y ventajas técnicas

Bombas de calor aerotérmicas (aire-agua)

Las bombas de calor aire-agua, comúnmente denominadas aerotermia, extraen energía térmica del aire exterior y la ceden al interior del edificio a través de un circuito de agua. Son actualmente las más instaladas en España por su versatilidad y relativa sencillez de instalación[2]. Estas unidades cuentan con un intercambiador exterior (evaporador) que absorbe calor del aire ambiente incluso en invierno, gracias a que el fluido refrigerante interno se evapora a baja temperatura. Mediante un compresor eléctrico, ese calor se "eleva" a una temperatura mayor en el condensador, que está acoplado a un circuito de agua. De este modo, el sistema proporciona agua caliente para calefacción (ya sea a radiadores de baja temperatura, suelo radiante o fan-coils) e incluso para ACS, y a la vez puede invertirse el ciclo en verano para enfriar el agua y climatizar los espacios.

El atractivo de la aerotermia en rehabilitación radica en que no requiere más fuente externa que el aire exterior, evitando la necesidad de captadores solares o perforaciones geotérmicas. En edificios residenciales, una bomba de calor aire-agua típicamente se ubica en exteriores (fachada, cubierta, patio) y se conecta a un hidrokit o depósito interior para distribuir calor/frío. Sus prestaciones han mejorado notablemente en la última década: hoy día, equipos residenciales de aerotermia pueden alcanzar COP nominales de 4 a 5 (por ejemplo, a 7°C exterior/35°C de agua) y coeficientes estacionales SCOP del orden de 3 a 4 en climas como el de Madrid[3]. Esto significa que durante la temporada de calefacción pueden promediar rendimientos estacionales del 300–400%, cumpliendo sobradamente con el umbral para ser considerados renovables (SPF > 2,5). No obstante, su rendimiento disminuye en condiciones extremas de frío: a temperaturas exteriores cercanas a 0°C, o negativas el COP baja significativamente (por ejemplo a 0°C puede caer a ~2), y además el equipo debe realizar ciclos de desescarche periódicos para eliminar la escarcha del evaporador, lo que añade un ligero consumo.

Aun así, los fabricantes mitigan esto sobredimensionando el intercambiador, usando compresores de velocidad variable (tecnología inverter) y sistemas de inyección de vapor que mantienen un aporte de calor confiable hasta -15 o -20°C. En el clima de Madrid (donde el diseño invernal ronda -2°C a -4°C), las bombas de calor aerotérmicas bien dimensionadas pueden cubrir el 100% de la demanda de calefacción sin apoyo auxiliar en la mayoría de los casos.

En cuanto a la producción de agua caliente sanitaria, las bombas de calor aerotérmicas suelen incorporar un depósito de almacenamiento (acumulador) y pueden calentar el agua hasta temperaturas del orden de 50–60°C con buen rendimiento. Algunos modelos de alta temperatura, pensados para rehabilitación, logran incluso 70–75°C de agua de ACS sin apoyo eléctrico, gracias al uso de nuevos refrigerantes. Un ejemplo representativo es la bomba de calor Vaillant aroTHERM Plus que emplea propano (R290) como refrigerante natural: este equipo puede entregar agua caliente hasta 75 °C de forma autónoma[4], lo que la hace apta para sustituir calderas en edificios con radiadores convencionales de alta temperatura. Esta capacidad es especialmente útil en rehabilitaciones donde no es viable cambiar todos los emisores; con bombas de calor de alta temperatura, el sistema existente de radiadores puede mantenerse operando eficientemente. En modo refrigeración, las aire-agua funcionan como enfriadoras reversibles: enfrían el agua para abastecer fan-coils o techos fríos, logrando EER (coeficiente de eficiencia en frío) típicamente entre 2,5 y 4 según condiciones.

Conviene prever un adecuado drenaje de condensados en verano y asegurarse de que la unidad exterior esté en un emplazamiento bien ventilado, para disipar el aire frío de rechazo.

Bombas de calor geotérmicas (agua-agua)

Las bombas de calor geotérmicas (geotermia somera) aprovechan la temperatura relativamente estable del subsuelo terrestre como fuente de calor en invierno (y sumidero de calor en verano). Se basan en un ciclo termodinámico similar al de las aerotérmicas, pero en lugar de evaporar el refrigerante con aire exterior, lo hacen

[2] https://geotermiaonline.com/13905/idae-registra-en-espana-mas-de-5-millones-de-bombas-de-calor-instaladas-con-37-g-depotencia/

[3] https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/Eficiencia/RITE/documentosreconocidosrite/Otros%20documentos/Prestaciones_Medias_Estacionales.pdf

[4] https://www.pv-magazine.com/2023/03/27/vaillant-unveils-propane-heat-pump-for-residential-applications/

intercambiando calor con un circuito enterrado en el terreno. Este circuito puede ser vertical (sondeos perforados a profundidades típicas de 50–150 m donde se instalan sondas con fluido) u horizontal (tuberías enterradas a ~1,5 m de profundidad cubriendo una superficie de terreno). En Madrid, a partir de cierta profundidad (>10-15 m) la temperatura del suelo permanece aproximadamente constante todo el año, en torno a 15°C, proporcionando una fuente térmica de alta calidad en invierno (mucho más cálida que el aire exterior) y un sumidero fresco en verano. Gracias a ello, las bombas de calor geotérmicas suelen mantener COP estacionales más elevados y regulares que las aerotérmicas. En aplicaciones reales, es factible lograr SCOP del orden de 4 a 5 en geotermia bien diseñada, incluso en climas continentales, ya que el evaporador siempre "ve" una fuente a temperatura moderada. Esto implica consumos muy bajos: por cada 1 kWh eléctrico consumido se pueden entregar 4-5 kWh térmicos durante la temporada, superando holgadamente el criterio de renovabilidad



Ejemplo de sistema bibloc: La imagen muestra una unidad interior compacta (tipo mural) instalada en el espacio de una alacena de cocina, mientras la unidad exterior con ventilador se ubica en la terraza. Fotos: A. Bosqued.

Otro punto fuerte de la geotermia es que no requiere unidades exteriores con ventiladores, lo que elimina ruido y problemas de impacto estético en fachadas. Toda la maquinaria (bomba de calor, intercambiadores, bombeos) se ubica en la sala técnica interior, conectada hidráulicamente a los intercambiadores enterrados. Esto la hace muy discreta, factor interesante en rehabilitaciones de edificios protegidos o con limitaciones urbanísticas para equipos visibles en cubierta. Asimismo, las bombas de calor geotérmicas suelen poder ofrecer en un solo equipo potencias mayores que las aerotérmicas típicas, por lo que se emplean también en aplicaciones terciarias de cierta envergadura (edificios de oficinas, hoteles, hospitales) integradas en sistemas centralizados de climatización.

No obstante, la geotermia presenta retos importantes: el costo inicial y la disponibilidad de terreno. La instalación de los sondajes geotérmicos supone una inversión elevada y requiere estudios previos del subsuelo. En entornos urbanos como Madrid, puede ser complicado realizar perforaciones profundas cerca de cimentaciones o infraestructuras enterradas; en rehabilitación de viviendas unifamiliares con jardín es más viable, pero en edificios en parcela reducida se suele optar por sondeos verticales múltiples en patios o aceras, con la debida autorización administrativa. Pese a estos desafíos, existen ejemplos exitosos en la Comunidad de Madrid de edificios rehabilitados con geotermia: por ejemplo, bloques de viviendas que han reemplazado calderas comunitarias por bombas de calor geotérmicas con campos de sondas bajo el aparcamiento, logrando importantes ahorros energéticos y mejoras en la calificación energética.

En términos de operación, un sistema geotérmico bien diseñado evitará extraer más calor del terreno del que este puede regenerar estacionalmente, para prevenir una caída progresiva de temperatura en los sondeos. En climas con veranos calurosos, el modo refrigeración de la bomba de calor geotérmica "recarga" el suelo con el calor extraído del edificio, ayudando a equilibrar el balance térmico anual.

Esta sinergia hace que la geotermia sea especialmente eficiente en edificios con demanda significativa de frío en verano y de calor en invierno (edificios de uso continuo, hoteles, etc.). Los equipos geotérmicos comerciales suelen ser de tipo agua-agua (condensador y evaporador, ambos intercambian con agua o salmuera), por lo que a menudo incorporan intercambiadores intermedios y bombas de circulación. Su rendimiento en frío es igualmente bueno: pueden alcanzar EER altos al tener un sumidero (suelo) más frío que el aire exterior en pleno verano.

4.2.2. Tipos de sistemas principales

Sistemas monobloc vs. bibloc en aerotermia

Cuando se emplea una bomba de calor aire-agua, existen dos configuraciones principales para distribuir los componentes del ciclo frigorífico: sistemas monobloc (o monobloque) y sistemas bibloc (también llamados unidades partidas o split). La diferencia radica en cómo se reparten los elementos entre el exterior y el interior de la edificación, con implicaciones en la instalación y mantenimiento.

Sistemas bibloc: Son los más tradicionales en equipos residenciales de aerotermia. Constan de dos unidades separadas: una unidad exterior que aloja el compresor, el evaporador (batería exterior), el ventilador y a veces la válvula de expansión; y una unidad interior (hidrokit) instalada dentro de la vivienda o sala técnica, que contiene el condensador (intercambiador refrigerante-agua), la bomba de circulación, vaso de expansión y usualmente un depósito de ACS. Entre ambas unidades discurren tuberías frigoríficas (línea de líquido y gas) por las que circula el refrigerante. En esencia, es similar a un aire acondicionado split, pero en lugar de entregar aire frío/caliente, el módulo interior intercambia con agua.

La conexión frigorífica entre ambas requiere manipulación de gases refrigerantes en la instalación, lo que implica que el instalador debe ser frigorista certificado. Como ventaja, este sistema permite colocar la unidad interior cerca de los puntos de consumo (minimizando pérdidas en ACS) y a resguardo de heladas; además, las unidades exteriores suelen ser algo más pequeñas y ligeras que en un monobloc equivalente, al albergar menos componentes. Como inconveniente, existe riesgo

de fuga de refrigerante dentro del edificio si las tuberías o conexiones fallan, y la longitud de tubería frigorífica es limitada (típicamente decenas de metros) para no comprometer el rendimiento. En rehabilitación, los sistemas bibloc son adecuados cuando se dispone de un pequeño cuarto técnico interior y se quiere evitar componentes voluminosos en fachada más allá de la unidad exterior.

Sistemas monobloc: En este diseño todos los componentes frigoríficos van integrados en una única unidad exterior, eliminando la unidad interior de refrigeración. El monobloc incluye el compresor, ventilador, evaporador y también el intercambiador condensador hidráulico (hidrokit), de modo que entrega directamente agua caliente o fría hacia el interior de la vivienda a través de tuberías aisladas.





Ejemplo de sistema monobloc: La imagen muestra una unidad monobloc exterior de aerotermia instalada en la terraza, de la cual solo salen tuberías de agua hacia el interior. No hay unidad interior frigorífica, solo un depósito de inercia o ACS en el interior para almacenamiento.Foto: A. Bosqued

La principal ventaja de los monobloc es su simplicidad de instalación hidráulica: solo requieren conectar las tuberías de ida y retorno de agua, sin necesidad de cargar refrigerante ni realizar empalmes frigoríficos. Esto implica también que no es necesaria certificación de manipulador de gases fluorados para su montaje, y se evitan potenciales fugas de refrigerante (el circuito viene herméticamente sellado de fábrica) Además, puede salvar grandes distancias entre la unidad exterior y los emisores/interiores simplemente dimensionando adecuadamente la bomba de agua, algo útil en edificaciones donde el equipo deba situarse alejado de la sala de máquinas. Como contrapartida, el equipo monobloc suele ser más voluminoso y pesado que la combinación de split equivalente, ya que integra el intercambiador de placas, bomba y demás elementos en la carcasa exterior[5]. También requiere proteger adecuadamente las tuberías de agua exteriores contra heladas (a menudo se utilizan glicoles anticongelantes en el circuito hidráulico externo). Otra consideración es que, al contener todo el refrigerante en el exterior, muchos fabricantes están optando por usar refrigerantes de menor impacto ambiental pero más inflamables (p. ej., propano R290) en unidades monobloc, ya que un escape en el exterior no compromete la seguridad interior. Las bombas de calor monobloc son ideales cuando el espacio interior es muy limitado y se prefiere un sistema plug-and-play. Suelen instalarse en viviendas unifamiliares o en cubiertas comunitarias, donde se agrupan varias unidades monobloc (una por vivienda). Eso sí, es importante no ubicarlas en recintos cerrados (como garajes) debido a la necesidad de ventilación y, en caso de usar refrigerante inflamable, por motivos de seguridad.

En resumen, la elección monobloc vs bibloc dependerá de las condiciones de cada proyecto: disponibilidad de espacio interior, distancia entre exterior e interior, normativa de refrigerantes y preferencia de instalación. En rehabilitación de un piso en altura, por ejemplo, podría convenir un sistema bibloc si se puede poner el hidrokit en la cocina, minimizando la longitud de tuberías de agua caliente. En cambio, en una casa unifamiliar con cuarto de calderas distante de la fachada, un monobloc evita largas líneas frigoríficas. Ambos ofrecen, en cuanto a funcionamiento, prestaciones similares una vez instalados (el rendimiento final viene dado más por la máquina en sí que por su configuración), por lo que la decisión es principalmente logística. Muchos fabricantes ofrecen ambas versiones de un mismo modelo para adaptarse a distintas necesidades.

Comparativa entre Sistemas Domésticos y Terciarios/Industriales

Las bombas de calor se emplean tanto en viviendas individuales como en grandes edificios comerciales o industriales, pero con diferencias notables en escala, diseño y requisitos. En esta sección se comparan las aplicaciones domésticas/residenciales frente a las terciarias/industriales, destacando ejemplos representativos de fabricantes reconocidos en cada segmento.

Ámbito residencial (doméstico): Aquí predominan las bombas de calor de pequeña y mediana potencia, típicamente entre 3 kW y 20 kW térmicos, adecuadas para climatizar viviendas unifamiliares, pisos o pequeños edificios de viviendas. Suelen ser unidades compactas de aerotermia (aire-agua) o mini-geotermia, diseñadas pensando en facilidad de instalación, integración estética y funcionamiento silencioso. Varios fabricantes líderes ofrecen gamas completas en este rango: por ejemplo, Daikin Altherma, Mitsubishi Ecodan, Panasonic Aquarea, Vaillant aroTHERM, Saunier Duval GeniaAir, Bosch Compress 7000, entre otros. Estas marcas gozan de reputación por su eficiencia y fiabilidad, figurando consistentemente entre las mejor valoradas en el mercado de aerotermia[6]. Los equipos residenciales normalmente incluyen funcionalidad todo-en-uno, combinando calefacción, refrigeración y ACS.

Muchos vienen con depósitos de ACS integrados o módulos compactos tipo torre (unidad interior con bomba de calor + acumulador), optimizados para ocupar poco espacio dentro de la vivienda.

[5] https://lasian.es/aerotermia-monobloc-bibloc/

[6] https://manairsat.com/mejores-marcas-de-equipos-de-aerotermia-2025/

Asimismo, incorporan controladores inteligentes compatibles con termostatos modulantes, apps móviles, etc., pensando en la comodidad del usuario final.

Un ejemplo doméstico típico sería la Daikin Altherma 3, bomba de calor aire-agua disponible en versiones de 4 a 16 kW, con opciones bibloc o monobloc, refrigerante R-32 de bajo PCA, y etiquetada con eficiencia estacional A+++ en calefacción. Esta gama ilustra la tendencia del sector residencial: refrigerantes más ecológicos, electrónica inverter avanzada, bajos niveles sonoros (alrededor de 50 dB(A) a 1 m) y posibilidad de híbridos con fotovoltaica. Otro ejemplo, la Vaillant aroTHERM Plus mencionada antes, con potencias ~3,5 a 12 kW, destaca por el uso de propano y aptitud para reformas.

Thermor o Ariston ofrecen bombas de calor ACS específicamente para producir agua caliente doméstica con aerotermia (volúmenes de 100–300 L), que son soluciones muy demandadas en sustitución de termos eléctricos o calderas en apartamentos.

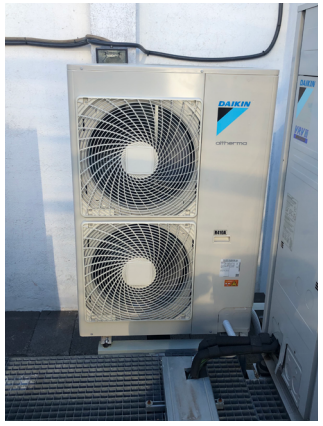
En viviendas plurifamiliares (bloques de pisos), la adopción de bombas de calor puede abordarse de dos maneras: sistemas individuales por vivienda (cada piso instala su propia aerotermia, generalmente en su balcón/terraza, conectada a suelos radiantes o fan-coils) o sistemas centralizados comunitarios.

Los sistemas individuales ofrecen independencia a cada usuario pero implican multiplicidad de unidades exteriores (potencialmente un impacto visual y acústico en fachada si no se controla). En cambio, las instalaciones centralizadas ubican una o varias bombas de calor de mayor capacidad en la cubierta o sala de calderas, abasteciendo a la red de calefacción/ACS comunitaria; esta estrategia requiere un buen reparto de costes y control, pero puede ser más eficiente a gran escala. Algunos fabricantes, como Clivet o CIAT, ofrecen bombas de calor centralizadas modulares (30-100 kW) pensadas para pequeños edificios residenciales o terciarios, que se pueden instalar en cascada para dar redundancia y cubrir la demanda.

Ámbito terciario/industrial: En edificios de oficinas, centros comerciales, hospitales, hoteles, instalaciones industriales, etc., las cargas térmicas son mucho mayores y los sistemas deben diseñarse para funcionar con altos niveles de fiabilidad y flexibilidad. Aquí las bombas de calor adoptan formatos distintos: enfriadoras/bombas de calor agua-agua de gran capacidad, sistemas VRF (flujo de refrigerante variable) con recuperadores de calor, o rooftops con bomba de calor integrada para tratamiento de aire. Las potencias pueden ir desde ~20-30 kW por unidad hasta varios cientos de kW en equipos individuales; para demandas mayores se instalan múltiples unidades en paralelo.

Los fabricantes reconocidos en este segmento incluyen a Carrier, Trane, York (Johnson Controls), Daikin Applied, Mitsubishi Heavy Industries, LG, Climaveneta/Mitsubishi Electric, Lennox, etc. Por ejemplo, Carrier AquaSnap es una familia de enfriadoras/bombas de calor aire-agua paquete de 50-400 kW muy utilizada en edificios terciarios, y Daikin VRV/VRF es referente en sistemas de expansión directa multi-zona para oficinas (si bien estos últimos son aire-aire más que aire-agua).

También destaca Mitsubishi Electric Q-ton, una bomba de calor aerotérmica con CO_2 pensada para producir ACS en edificios grandes (hasta 90°C) con alta





Instalación de aerotermia de alta temperatura para ACS y calefacción baños en Hotel. La maquina exterior de aerotermia, aparece junto a dos VRV III de Daikin, para climatización por fan-coils. Fotos: A. Bosqued.

eficiencia. Este equipo, instalado en cascada, se emplea en hoteles y hospitales para reemplazar termos o calderas de gas en la producción centralizada de agua caliente, demostrando la versatilidad de la tecnología de bomba de calor incluso en aplicaciones de muy alta temperatura[7].

En entornos industriales, además de climatización de espacios, las bombas de calor pueden aprovecharse para procesos térmicos: por ejemplo, recuperación de calor de procesos de refrigeración para agua caliente de limpieza, secaderos industriales con bomba de calor, etc. Existen equipos de alta temperatura capaces de proporcionar agua a 80–90 °C eficientemente (usando ciclos de dos etapas, refrigerantes especiales o CO_2 transcrítico), aptos para procesos industriales de mediana entalpía. Las bombas de calor industriales a menudo se diseñan a medida o con configuraciones especiales, integrándose en la gestión térmica global de la planta (pudiendo trabajar en combinación con calderas de apoyo o sistemas de almacenamiento de calor).

Comparativa de prestaciones: Mientras que una bomba de calor residencial monofásica puede tener un COP nominal de 4 y un SCOP ~3-3.5, una gran enfriadora de 300 kW con bomba de calor puede mostrar EER ~3 y COP ~3.5 a plena carga (ligeramente menores debido a diseños optimizados para robustez más que para eficiencia máxima). Sin embargo, en carga parcial muchas de estas máquinas grandes operan muy eficientemente gracias a compresores en paralelo y control inteligente, logrando IPLV (índice de rendimiento integrado) altos. Los sistemas VRF en oficinas permiten recuperar calor entre zonas (calefacción y refrigeración simultánea), alcanzando eficiencias globales excelentes al mover calor de las zonas frías a las calientes dentro del edificio con mínimos consumos eléctricos.

[7] https://www.acae.es/cat/MIH/mitsubishi-heavy.html/EQHBCC__MIH/EQHBCC__MIH1/bomba-de-calor-q-ton-para-acshasta-90--c-y-calefaccion-con-co2.html

Consideraciones de diseño: En residencial se prioriza la compacidad, bajo ruido (normativas urbanas imponen límites de inmisión sonora nocturna, típicamente 45 dB(A) en fachada del vecino) y facilidad de uso. En terciario/industrial se enfatiza la redundancia (por ejemplo, N+1 unidades por si falla una), la integración con sistemas de gestión (BMS) y la adaptabilidad a cargas variables. Un hotel en Madrid podría, por ejemplo, combinar una bomba de calor aire-agua central para calefacción y ACS precalentamiento, con calderas de gas como apoyo punta o para llevar ACS de 60°C a 70°C en horas pico; mientras que un edificio de oficinas podría emplear bombas de calor reversibles aire-agua para alimentar fan-coils en invierno y verano, eliminando calderas por completo.

En cuanto a fabricantes y ejemplos: en el sector terciario en España, Climaveneta (hoy parte de Mitsubishi Electric) ha suministrado bombas de calor enfriadoras para edificios emblemáticos; CIAT (de grupo Carrier) ha instalado grandes aerotermias en polideportivos y centros comerciales; Eurovent certifica muchos de estos equipos, garantizando sus prestaciones reales. La disponibilidad de servicio técnico y repuestos es un factor crucial a considerar al elegir marca en este rango, dado que la vida útil esperada de una bomba de calor grande supera fácilmente los 15-20 años con buen mantenimiento.

4.2.3. Integración de sistemas híbridos y soluciones combinadas

La combinación de bombas de calor con otras fuentes de energía renovable o con sistemas complementarios puede optimizar el rendimiento global de la instalación y aportar flexibilidad. A continuación, se analizan dos esquemas híbridos especialmente relevantes en rehabilitación energética: aerotermia con energía solar fotovoltaica y bomba de calor con energía solar térmica (geotermia + solar térmica o aerotermia + solar térmica). Se discuten sus beneficios, desafíos técnicos y consideraciones de espacio.

Aerotermia con apoyo de energía solar fotovoltaica

La integración de una bomba de calor (aerotermia) con un sistema de generación solar fotovoltaica se ha convertido en una de las estrategias más efectivas para lograr edificios de consumo casi nulo. En este esquema, los paneles fotovoltaicos producen electricidad in-situ que alimenta parcial o totalmente a la bomba de calor, reduciendo drásticamente la energía eléctrica que hay que tomar de la red. Dado que la bomba de calor ya de por sí multiplica el calor útil por cada kWh eléctrico consumido, al abastecerla con energía solar se consigue un efecto multiplicador de la contribución renovable. En climas soleados como el de Madrid, una instalación fotovoltaica bien dimensionada puede cubrir una parte muy significativa de la demanda anual de la bomba de calor. De hecho, experiencias reales muestran que con aerotermia + fotovoltaica se puede llegar a cubrir en torno al 90% de las necesidades térmicas de una vivienda con energía gratuita y renovable, disminuyendo la factura eléctrica en proporciones similares (70–80% de ahorro reportado por usuarios) y reduciendo prácticamente a cero el consumo de combustibles fósiles.

Las ventajas de esta hibridación son numerosas: la energía solar capturada durante las horas diurnas de sol se emplea para calefacción, refrigeración o ACS, desplazando consumo a las horas de producción y aliviando la red. Si la demanda térmica no coincide exactamente con la producción FV (por ejemplo, en verano sobran excedentes al mediodía, o en invierno la bomba de calor demanda algo por la mañana temprano antes de que haya sol), se pueden utilizar técnicas de almacenamiento térmico para maximizar el autoconsumo: por ejemplo, sobrecalentar ligeramente el tanque de ACS o activar la calefacción (subiendo la temperatura de consigna del suelo radiante) durante las horas de sol abundante, acumulando calor en la masa del edificio para luego reducir consumo al atardecer.



Instalación de producción eléctrica mediante paneles fotovoltaicos para autoconsumo en vivienda (climatización + ventilación + resto electricidad). Foto: A. Bosqued.

Asimismo, es posible incorporar baterías eléctricas para almacenar excedentes fotovoltaicos y alimentar la bomba de calor en horarios nocturnos, aunque una solución más económica suele ser dimensionar la instalación de forma que los excedentes se destinen en lo posible a carga térmica en vez de baterías.



Instalación de acumulación de energía eléctrica fotovoltaica en baterías. Fuente: Powen

Desde el punto de vista técnico, la aerotermia con FV no implica interconexiones especiales más allá de la conexión eléctrica habitual: la bomba de calor toma la energía de la red interna de la vivienda, que a su vez recibe la inyección fotovoltaica. No obstante, para maximizar la sinergia se pueden usar controladores que

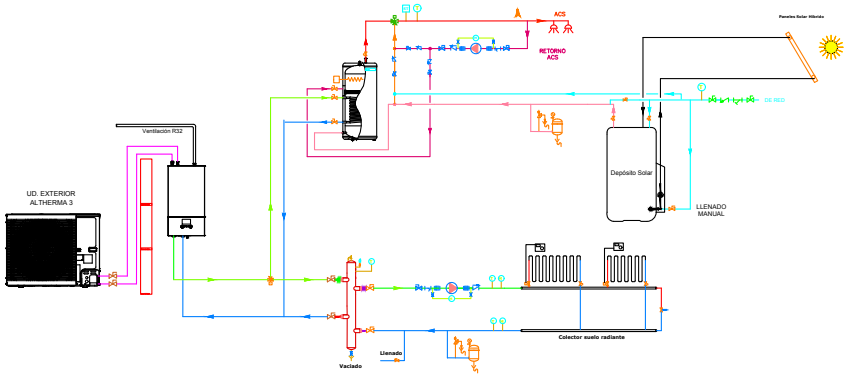
coordinen el funcionamiento de la bomba de calor con la producción solar. Por ejemplo, algunos sistemas permiten que la bomba de calor aumente su consigna de ACS cuando hay excedente solar (función de solar boost), o que arranque en modo calefacción un poco antes si detecta que en ese momento hay mucha generación FV y la temperatura interior puede elevarse unos grados anticipadamente. Estos algoritmos de gestión consiguen que el porcentaje de consumo cubierto con solar sea aún mayor. En viviendas con contador neto o vertido a red, aprovechar al máximo la energía en sitio es ventajoso económicamente.

Un aspecto importante a considerar es el dimensionamiento: tanto la bomba de calor como la instalación fotovoltaica deben dimensionarse según la demanda y la disponibilidad solar. En Madrid, una cubierta típica puede generar del orden de 1500 kWh anuales por cada kWp instalado. Si una vivienda unifamiliar consume 6000 kWh térmicos al año en calefacción/ACS, su bomba de calor (con SCOP medio ~3) necesitará ~2000 kWh eléctricos para ello; bastaría una planta FV de ~1.5 kWp para generar esa energía anual, aunque para cubrir simultaneidad y otros consumos se suelen instalar 3-5 kWp o más. En rehabilitación, es frecuente que la superficie disponible de cubierta sea limitada (especialmente en comunidades de vecinos), por lo que habrá que optimizar la relación entre potencia fotovoltaica y capacidad de la bomba de calor. En edificios multifamiliares, se puede plantear autoconsumo compartido: por ejemplo, paneles en la azotea que alimenten la bomba de calor central comunitaria, repartiendo beneficios entre los vecinos.

La experiencia operativa de aerotermia con fotovoltaica en Madrid es muy positiva: se logran reducciones enormes en las emisiones de CO_2 y en costes energéticos. Este sistema híbrido está alineado con las directrices de edificios de energía casi nula (nZEB) exigidas por la UE y reflejadas en el CTE. Además, suele ser subvencionable; existen programas autonómicos y municipales que apoyan con ayudas la instalación conjunta de bombas de calor y paneles solares. En la práctica, esta combinación convierte la vivienda en una "microcentral renovable" capaz de autoabastecerse en gran medida. Es importante, desde la óptica del arquitecto, prever correctamente la integración arquitectónica de los paneles (evitando sombreados, orientándolos al sur preferentemente, etc.) y el espacio para la unidad exterior de la aerotermia. Asimismo, debe considerarse la capacidad de la acometida eléctrica: al sumar potencia FV y bomba de calor, se puede requerir aumentar la potencia contratada como respaldo, aunque el consumo neto se reduzca.

Bombas de calor con apoyo de energía solar térmica (sistemas duales)

Otra posible integración híbrida es la de bombas de calor con sistemas solares térmicos para producción de ACS o apoyo a calefacción. Antes de la irrupción masiva de la aerotermia, la forma más común de cumplir con los requisitos de contribución renovable del CTE (antiguo HE4 2013) era mediante paneles solares térmicos para ACS. Hoy, la normativa permite que esa contribución se logre también con bombas de calor de suficiente rendimiento, pero combinar geotermia + solar térmica o aerotermia + solar térmica puede aún tener sentido en ciertos casos, aprovechando lo mejor de cada fuente.



Esquema de principio instalación de aerotermia con apoyo solar térmico. Fuente: Daikin – Adaptación propia

En un esquema típico, coexisten: un campo de captadores solares térmicos (por ejemplo, paneles planos o tubos de vacío) que calientan agua o un fluido térmico, y una bomba de calor que también puede calentar agua para ACS/calefacción. La idea es que la energía solar térmica cubra parcialmente la demanda de ACS y quizás precaliente el agua de calefacción en días soleados, reduciendo el trabajo de la bomba de calor y elevando aún más la fracción renovable. Esto resulta atractivo en instalaciones con elevado consumo de ACS constante (hoteles, gimnasios, residencias) donde los paneles solares pueden cubrir una porción apreciable de la carga base de agua caliente, dejando a la bomba de calor el complemento. También en sistemas geotérmicos, se ha explorado el uso de colectores solares térmicos en verano para reinyectar calor en el terreno y regenerar el suelo, evitando que se enfríe tras extraer calor en invierno. De este modo, los paneles solares ayudan indirectamente a mantener el rendimiento de la geotermia a largo plazo.

No obstante, la integración bomba de calor + solar térmico conlleva complejidad en el diseño hidráulico y de control. Uno de los principales retos es el almacenamiento y gestión de ambas fuentes: generalmente se requieren dos depósitos de acumulación o intercambiadores separados para diferenciar la aportación solar de la de la bomba de calor. En España, la normativa de energía solar térmica tradicionalmente prohíbe mezclar aportes en un mismo depósito con doble serpentín, para garantizar que se pueda contabilizar el aporte solar de forma clara y evitar que una fuente convencional "suplante" a la solar. Esto implica que en un sistema híbrido, los captadores solares calientan un depósito intermedio (depósito solar), y desde allí el agua precalentada entra como entrada de agua fría al depósito de ACS principal calentado por la bomba de calor[8]. Así se consigue que la bomba de calor trabaje menos cuando el sol ha aportado calor. La consecuencia espacial es obvia: duplicidad de depósitos y más equipo en la sala técnica, lo cual en rehabilitación puede ser un problema si el cuarto de instalaciones es reducido. Además, se requieren válvulas de control,

[8] http://www.morisarroes.es/solar/deposito-solar/

bombas de circulación adicionales, centralita solar, etc., incrementando el coste y los puntos de mantenimiento.

Por ejemplo, imaginemos la rehabilitación de un hotel en Madrid: se decide instalar una bomba de calor geotérmica para climatización y ACS, pero como la demanda de ACS es muy alta, también se coloca un campo solar térmico en la cubierta. El esquema resultante tendría un tanque solar (donde el circuito primario de los paneles calienta el agua hasta, digamos, 40-60°C durante el día) y un tanque de ACS final donde llega ese agua pre-calentada; la bomba de calor eleva la temperatura hasta los 60°C requeridos solo si el solar no lo logró. En verano, el excedente solar podría incluso inyectarse a los pozos geotérmicos. Este sistema proporcionaría una fracción renovable altísima y redundancia de fuentes. Sin embargo, hay que coordinar cuidadosamente los controles para priorizar el uso de la energía solar siempre que esté disponible, y activar la bomba de calor solo de apoyo. También es vital dimensionar bien los paneles para evitar sobrecalentamientos en verano (si la bomba de calor está apagada y no hay consumo, los paneles podrían estancarse; se suele prever disipadores o cubrirlos parcialmente en verano si solo son para ACS).

Dado el avance de la aerotermia fotovoltaica, la combinación con solar térmica ha perdido algo de protagonismo en la vivienda unifamiliar (donde es más sencillo y barato poner paneles FV extra que mantener un sistema solar térmico con sus bombas y mantenimiento). No obstante, en edificios de viviendas u otros donde ya existe una instalación solar térmica funcionando, puede ser interesante mantenerla operativa al incorporar la bomba de calor. En ese caso, se reconfigura el esquema para que la aerotermia aporte solo lo que falte. Algunos fabricantes ofrecen kits de integración: por ejemplo, controles que admiten entrada de temperatura de paneles solares para modular la bomba de calor o gestionar válvulas de forma automática.

Una variante de híbrido es la bomba de calor bivalente con caldera (gas o biomasa).

Tradicionalmente, en climas fríos se recurre a un sistema bivalente en el que la bomba de calor cubre la demanda hasta cierta temperatura exterior (punto de bivalencia) y por debajo de esta arranca una caldera de apoyo. En Madrid, con inviernos moderados, esto podría plantearse en edificios que aún conserven la caldera existente: la bomba de calor llevaría el peso la mayor parte del tiempo y la caldera solo puntualmente (ej. noches extremadamente frías o para respaldo). Esta es una forma de hibridación que garantiza el servicio en cualquier circunstancia, aunque disminuye el porcentaje renovable total.

Por ello, en rehabilitaciones orientadas a ser 100% renovables se busca eliminar completamente las calderas fósiles, salvo que estas sean necesarias como soporte en caso de emergencia.

4.2.4. Rendimientos, eficiencia estacional y consideración renovable

Uno de los aspectos más cruciales al evaluar bombas de calor es su eficiencia, tanto en condiciones nominales como a lo largo de la estación de calefacción/refrigeración. Esta eficiencia se mide con diferentes indicadores: COP (coeficiente de rendimiento en calor, instantáneo), EER (ratio de eficiencia en frío), y sobre todo SCOP y SEER (coeficientes estacionales en calor y en frío, respectivamente), que promedian el rendimiento a lo largo de un perfil climático y de carga estacional. Entender estos parámetros es esencial para asegurarse de que la instalación cumpla requisitos normativos y aporte realmente los ahorros esperados.

Coeficiente de rendimiento (COP) nominal: Es la relación entre la potencia térmica entregada por la bomba de calor en calefacción y la potencia eléctrica consumida, en unas condiciones de ensayo específicas (por ejemplo, A7/W35 según norma EN 14511, que significa aire exterior a 7°C, agua de impulsión a 35°C en calefacción). Valores típicos de COP nominal en bombas de calor modernas oscilan entre 3 y 5. Un COP=4 indica que el 75% de la energía térmica proviene del entorno (aire, suelo) y solo el 25% es electricidad, lo cual evidencia la aportación renovable. Sin embargo, el COP nominal es solo un punto; en la realidad varía con la temperatura exterior y de impulsión. Por ejemplo, ese mismo equipo con COP=4 a 7°C exterior podría bajar a COP=2 a -7°C exterior, o subir a COP=6 a 15°C exterior. Por ello, se introdujo la métrica SCOP (Seasonal COP), que pondera el rendimiento en distintos puntos de funcionamiento representativos de la temporada de calefacción para climas medio, cálido y frío. El Reglamento (UE) 813/2013 de diseño ecológico exige un SCOP mínimo según clase energética; la mayoría de bombas de calor actuales alcanzan clase A+ o superior (SCOP > 3,4 en clima medio). Cabe señalar que el SCOP considera también consumos auxiliares en modo de bajo carga, etc., siendo un índice más realista.

En España, el Código Técnico de Edificación ha incorporado la exigencia de SPF > 2,5 para que una bomba de calor se contabilice como renovable en la contribución de ACS (DB HE4 2019). Este SPF (factor de rendimiento estacional) equivale básicamente al SCOPnet definido por la UE[9]. La Directiva (UE) 2018/2001 (RED II) y la Decisión 2013/114/UE[10] de la Comisión fijan que solo se considerará energía aerotérmica o geotérmica útil aquella proveniente de bombas de calor con SPF superior a 1,15/η, donde η es el rendimiento medio del mix eléctrico. Tomando η=0,455 (45,5%, valor establecido para la UE), resulta SPF > 2,5. Por tanto, los equipos deben demostrar un rendimiento estacional de al menos 250%. En la práctica, casi cualquier bomba de calor actual de calidad alcanza ese valor, pero es importante justificarlo documentalmente en proyecto: bien aportando la ficha técnica con el SCOP según EN14825 para clima de referencia (por ejemplo SCOP de 3,8 en clima medio, que cumpliría en toda España), o calculándolo mediante método reconocido. El IDAE ha publicado en el años 2014[11] un documento de Prestaciones Medias Estacionales que proporciona factores de corrección para estimar SPF en distintas zonas climáticas españolas a partir de COP nominal y tipo

[9] https://www.boe.es/doue/2018/328/L00082-00209.pdf

[10] https://www.boe.es/doue/2013/062/L00027-00035.pdf

[11] https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/Eficiencia/RITE/documentosreconocidosrite/Otros%20documentos/Prestaciones_Medias_Estacionales.pdf

de emisión. Por ejemplo, para Madrid (zona D) con una bomba de calor aire-agua a baja temperatura, un equipo con COP nominal 4,5 podría lograr un SPF ~3,8 según esas tablas, superando el umbral legal con margen.

Eficiencia en frío (EER, SEER): En modo refrigeración, las bombas de calor (reversibles) tienen ratios de eficiencia semejantes a los de los aires acondicionados. Un buen equipo aire-agua puede tener EER = 3 a 3,5 a plena carga (35°C exterior, agua 7/12°C por ejemplo) y un SEER estacional >4 en clima medio, lo que le da también calificación A+ o A++ en frío. Esto significa un ahorro considerable comparado con sistemas antiguos. Un detalle en rehabilitación: si se sustituye una enfriadora antigua (EER quizá 2 o menos) por una bomba de calor moderna (SEER ~4), el consumo eléctrico para climatización estival puede reducirse a la mitad. Dado el creciente peso de la refrigeración en el clima de Madrid por las altas temperaturas estivales, este es un argumento fuerte a favor de la bomba de calor en rehabilitación frente a simplemente poner splits o mantener sistemas viejos.

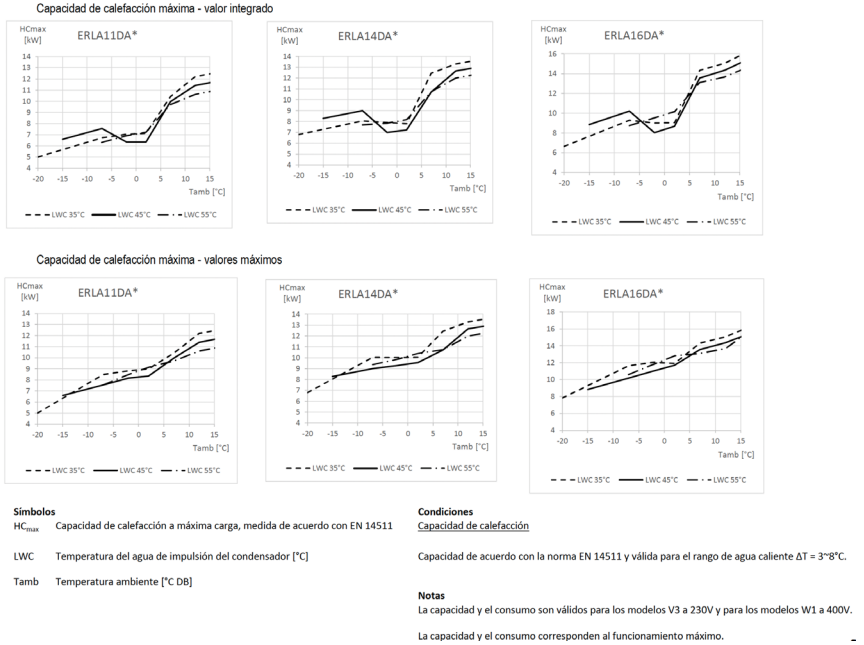
Curvas de rendimiento y temperatura de impulsión: Un factor que afecta mucho la eficiencia es la temperatura de salida de agua. Las bombas de calor son más eficientes trabajando a menor temperatura de impulsión (idealmente 30–45°C para suelo radiante o fan-coils de baja temperatura). Si en una rehabilitación se conectan a radiadores existentes dimensionados para 70°C con caldera, la bomba de calor tendrá que trabajar a 55–60°C o más, lo que penaliza su COP. En esos casos, conviene analizar medidas complementarias: sobre-dimensionar radiadores, añadir

UNIDADES EXTERIORES					ERGA04EV*	ERGA06EV*	ERGA08EV*
Temperatura	ambiente	impulsión					
Calefacción	7	45	Capacidad nom. / máx.	kW	4,6 / 6,08	5,9 / 7,4	7,8 / 8,86
			Consumo nom. / máx.	kW	1,26 / 1,65	1,69 / 2,01	2,23 / 2,55
	7	35	Capacidad nom. / máx.	kW	4,3 / 6,41	6 / 7,74	7,5 / 9,37
			Consumo nom. / máx.	kW	0,84 /1,3	1,24 / 1,63	1,63 / 2,08
	-2	35	Capacidad máxima	kW	5,43	6,2	7,24
			Consumo máximo	kW	1,68	1,97	2,41
Refrigeración	35	7	Capacidad nom. / máx.	kW	4,31 / 4,62	4,87 / 5,57	5,35 / 6,34
			Consumo nom. / máx.	kW	1,18 / 1,24	1,33 / 1,6	1,51 / 1,91
	35	18	Capacidad nom. / máx.	kW	4,86 / 5,98	5,96 / 7,45	6,25 / 8,57
			Consumo nom. / máx.	kW	0,81 / 1,06	1,06 / 1,54	1,16 / 1,87
COP / EER	7 / 35	35 / 18			5,10 / 5,94	4,85 / 5,61	4,60 / 5,40
Caudal de aire				m^3/h	2.280	2.520	2.770
Refrigerante R-32			kg / TCO_2eq / PCA		1,5 / 1,01 / 675,0	1,5 / 1,01 / 675,0	1,5 / 1,01 / 675,0
Dimensiones			Al.xAn.xF.	mm	740 x 884 x 388	740 x 884 x 388	740 x 884 x 388
Peso				Kg	58,5	58,5	58,5
Compresor					SWING	SWING	SWING
Potencia sonora			Refrig. / Calef.	dB(A)	61 / 58	62 / 60	62 / 62
Presión sonora			Refrig. / Calef.	dB(A)	48 / 44	49 / 47	50 / 49
Alimentación eléctrica					I / 230 V (monofásico)	I / 230 V (monofásico)	I / 230 V (monofásico)
Conexión Refrigerante					ø 1/4" - ø 5/8"	ø 1/4" - ø 5/8"	ø 1/4" - ø 5/8"
Líneas Refrigerante Lmax (d) / Desnivel max (h)					3<d<30 / h<20	3<d<30 / h<20	3<d<30 / h<20
Clase de eficiencia energética 55ºC LOT1 (SCOP)2					A++ (3,29)	A++ (3,28)	A++ (3,35)
Clase de eficiencia energética 35ºC LOT1 (SCOP)2					A+++ (4,54)	A+++ (4,52)	A+++ (4,61)

Ficha técnica sistemas aerotermia – Fuente: Daikin

radiadores de apoyo, o elegir una bomba de calor específica de alta temperatura (con ciclo de doble etapa o refrigerante especial) para mantener buen rendimiento. A 60°C de impulsión, una bomba de calor estándar puede ver su COP reducido un 20-30% respecto a a 45°C, y a 65°C quizás un 40% o más. Por tanto, la adaptación del sistema de emisión es clave en la rehabilitación. En Madrid, muchos edificios antiguos con radiadores sobredimensionados (por seguridad o por antiguas normativas) permiten trabajar a media temperatura tras mejorar aislamientos, lo cual es beneficioso para la bomba de calor.

Rendimientos alcanzables hoy: Con la tecnología actual, se logran COP



Curvas de Capacidad aerotermia – Fuente: Daikin

impresionantes en condiciones favorables. Por ejemplo, en modo calefacción, algunas aerotermias declaran COP > 5,0 (A7/ W35). En geotermia, COP de 5-6 no son raros (B0/W35, con salmuera a 0°C), y en modo ACS a 40-50°C, COP de 3-4. Un dato a resaltar: una bomba de calor con SCOP 3,5 está utilizando aproximadamente un 70% de energía renovable (gratuita) y un 30% de energía de la red en su balance anual. Ese 70% renovable computa para reducir emisiones y para cumplir cuotas de renovables. Esto ha hecho que, por ejemplo, muchas viviendas de nueva construcción en Madrid opten por aerotermia para cumplir la exigencia de que el 50% del consumo de ACS provenga de renovables. En realidad, con SCOP > 2,5 ya se logra, por lo que con aerotermia típica (SCOP 3-4) se cumple holgadamente, permitiendo no instalar colectores solares térmicos en cubierta. De hecho, desde la revisión del CTE de 2019, se acepta explícitamente la "aportación aerotérmica" como alternativa al solar térmico, siempre que SPF comprobado ≥ 2,5.

Rendimiento y normativa: Además de la consideración renovable, las bombas de calor deben cumplir otras normativas de eficiencia. El RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios) establece rendimientos mínimos para generadores de calor. En su última actualización, para bombas de calor eléctricas exige básicamente que cumplan con la normativa Ecodesign y estén etiquetadas (no se permite instalar equipos por debajo de clase B, lo que en la práctica descarta equipos obsoletos).

Asimismo, el RITE obliga a que equipos > 70 kW dispongan de sistemas de regulación eficientes y, en algunos casos, de análisis de eficiencia estacional. Por su parte, el CTE DB HE0 (Eficiencia Energética Global) valorará muy positivamente la alta eficiencia de la bomba de calor al calcular el consumo de energía primaria no renovable del edificio: dado que parte de la energía eléctrica se multiplica por el COP, y además parte puede ser renovable, los edificios con bomba de calor suelen cumplir más fácilmente los límites de HE0 que aquellos con calderas tradicionales. De cara a certificación energética (herramienta CE3X o HULC), la presencia de bomba de calor también mejora la calificación debido a su menor consumo y emisiones asociadas.

En proyectos de rehabilitación, es imprescindible solicitar o calcular el SCOP/SPF de proyecto. Esto puede hacerse bien con datos de fabricante (ensayos standard) o mediante simulación horaria con herramientas como EnergyPlus, TRNSYS o HULC, incorporando las características de la envolvente y los perfiles de uso para estimar el desempeño real. La simulación detallada permite, por ejemplo, estimar el impacto de periodos de descongelación, modulación a cargas parciales, etc., proporcionando un SPF más ajustado. El IDAE y algunas comunidades autónomas ofrecen herramientas simplificadas basadas en grados día y COP nominal (como las tablas mencionadas) para estas justificaciones. En cualquier caso, a la hora de redactar la memoria técnica, conviene documentar que la bomba de calor seleccionada alcanza un SPF>2,5 en las condiciones del proyecto, citando la normativa y los ensayos correspondientes, que aportan las fichas técnicas de los fabricantes, para que sea reconocida como aporte renovable en la licencia y subvenciones.

4.2.5. Refrigerantes

Situación actual, regulación y tendencias:

Los refrigerantes son el fluido de trabajo dentro del circuito de la bomba de calor, y su elección ha cobrado gran relevancia por motivos ambientales y de seguridad. A lo largo de las últimas décadas se ha producido una transición importante: se abandonaron refrigerantes que dañaban la capa de ozono (CFC y HCFC como R-22) y más recientemente se están sustituyendo los gases de alto potencial de calentamiento global (PCA o GWP) como R-134a, R-410A o R-404A, en favor de alternativas con menor impacto climático. A continuación, se presenta un análisis de los refrigerantes más utilizados en bombas de calor, los prohibidos y los que están en proceso de prohibición, junto con sus implicaciones en el diseño de los equipos, especialmente las unidades exteriores.

Refrigerantes HFC tradicionales (alto GWP): Durante muchos años, el refrigerante estándar en bombas de calor domésticas fue el R-410A (mezcla de HFC, GWP ≈2088). También se usó el R-407C (GWP ≈1770) en algunos equipos aire-agua, y el R-134a (GWP ≈1430) en bombas de calor agua-agua y enfriadoras. Estos refrigerantes, si bien no afectan la capa de ozono, presentan un altísimo potencial de calentamiento global, contribuyendo al efecto invernadero en caso de fugas. La UE, mediante el Reglamento (UE) 517/2014 de Gases Fluorados (F-Gas), ha impuesto un calendario de reducción de uso de HFC de alto GWP. Concretamente, desde 1 de enero de 2025 está prohibida la instalación de nuevos equipos de aire acondicionado y bombas de calor con carga de refrigerante < 3 kg que utilicen gases con GWP > 750[12]. Esto afecta directamente al R-410A (GWP 2088) y a otros HFC similares, que no podrán cargarse en equipos pequeños nuevos desde 2025. En la práctica, esto significa el fin de la comercialización de bombas de calor R-410A para uso residencial en Europa a muy corto plazo[13]. De hecho, muchos fabricantes ya han migrado sus gamas domésticas hacia refrigerantes alternativos anticipándose a esta fecha. El R-22 (HCFC, GWP ~1800) ya estaba prohibido desde 2004 en nuevos equipos y desde 2015 incluso su uso en mantenimiento, por lo que ha desaparecido del mercado. Otros refrigerantes de alto GWP prohibidos en determinados usos: el R-404A y R-507 (GWP ~4000) se vetaron para refrigeración comercial nueva y para recarga de sistemas grandes desde 2020, aunque no eran comunes en climatización.

Refrigerantes actuales de bajo GWP (HFC/HFO y naturales): La industria ha adoptado varias alternativas. En bombas de calor residenciales aire-aire y aire-agua el dominante es el R-32 (difluorometano, HFC puro, GWP ≈675). El R-32 es en realidad un componente del R-410A (que es 50% R-32 / 50% R-125); usado puro tiene mejor eficiencia y aproximadamente un 70% menos de PCA que el R-410A. Es ligeramente inflamable (clasificación A2L), pero manejable con medidas de seguridad básicas. Desde ~2018-2020 casi todas las grandes marcas (Daikin, Mitsubishi, Panasonic, etc.) lanzaron modelos con R-32, y hoy es estándar en splits y aerotermia doméstica. Otra opción emergente para aire-agua es el R-454B (mezcla HFC/HFO, GWP ≈467, A2L), que algunos fabricantes como Carrier emplean en sus nuevas bombas de calor en reemplazo de R-410A. De forma similar, en equipos tipo enfriadora reemplazo de R-134a, se usan mezclas HFO como R-513A (GWP ~631, no inflamable) o R-515B (GWP ~300, no inflamable), para lograr reducciones de GWP sin modificaciones drásticas de diseño.

Mención especial merecen los refrigerantes naturales: el propano (R-290), el CO_2 (R-744) y el amoníaco (R-717). En bombas de calor compactas domésticas ha irrumpido el R-290 propano debido a su mínimo PCA (~3) y excelentes propiedades termodinámicas. Su inconveniente es la inflamabilidad alta (A3), pero al utilizarlo en unidades monobloc exteriores, el riesgo para el usuario es muy bajo. Marcas como Vaillant, Wolf, Nibe, entre otras europeas, han lanzado bombas de calor monobloc con R-290.

Estas unidades aprovechan que el propano tiene un calor latente elevado y buen rendimiento incluso inflamabilidad en caso de fuga), lo que a veces se logra modularizando con dobles circuitos en una misma unidad cuando se necesita más potencia. También requieren componentes eléctricos antideflagrantes o encapsulados, y ventiladores que garanticen dispersión rápida de fugas. En la práctica, los fabricantes han conseguido integrar propano sin aumentar demasiado

[12] https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2024-80236

[13] https://gesmansoluciones.es/gases-refrigerantes-se-dejara-de-comercializar-el-r-410-en-2025-para-equipos-de-hasta-3kg/

el tamaño del equipo; de hecho, algunos modelos R-290 son incluso más eficientes que sus predecesores con R-410A.

Eso sí, las unidades con propano no pueden instalarse en recintos cerrados ni en interior, siempre al aire libre.

El CO_2 (R-744) es otro refrigerante natural utilizado, principalmente en bombas de calor para ACS de alta temperatura. Opera en ciclo transcrítico, lo que le permite elevar la temperatura del agua hasta 90 °C o más. Equipos como el mencionado Mitsubishi Q-ton utilizan CO_2 para generar ACS a 90°C incluso con -20°C exterior, algo inviable con otros refrigerantes sin resistencias. El CO_2 no es inflamable ni tóxico, pero trabaja a presiones muy elevadas (hasta 120 bar), lo cual implica intercambiadores y compresores especiales (más robustos). Las unidades de CO_2suelen ser voluminosas y costosas, por lo que su nicho es por ahora instalaciones comerciales e industriales donde se necesite alta temperatura y se valore su cero PCA. A nivel de eficiencia, el CO_2 tiene COP menores en calefacción a media temperatura (puede rondar COP 2,5–3,5 a 55°C), pero paradójicamente es muy eficiente en preparación de ACS a 70–80°C por cómo se adapta el ciclo transcrítico a ese salto térmico.

El amoníaco (R-717), refrigerante natural con GWP nulo, es excelente termodinámicamente pero tóxico y ligeramente inflamable, por lo que se usa solo en grandes sistemas industriales, típicamente de absorción o compresión en plantas de proceso o enfriamiento central. En climatización de edificios no es común debido a temas de seguridad (se ubica solo en salas de máquinas aisladas si acaso).

Calendario y futuras prohibiciones: Como se indicó, en 2025 queda prohibido R-410A en equipos pequeños nuevos. Mirando más adelante, la UE tiene planeado endurecer aún más las restricciones: se debate para la próxima revisión del Reglamento F-Gas la posibilidad de prohibir cualquier refrigerante con GWP >150 en sistemas nuevos hacia 2030, lo que prácticamente obligaría a usar solo A2L muy bajos o naturales en todos los casos. Incluso sin prohibición explícita, la reducción de cuotas de HFC (phase-down) encarece y dificulta conseguir gases de alto GWP, empujando al mercado hacia alternativas. En España, el Real Decreto 552/2019 adapta el reglamento europeo y establece controles de fugas, registro de equipos de climatización con >5 toneladas de CO_2 equivalente, etc., para cualquier sistema con gases fluorados. Esto implica, por ejemplo, que una bomba de calor con 3 kg de R-410A (equivalente a ~6 toneladas CO_2) necesita mantenimiento periódico con control de fugas, algo que desaparecerá al usar refrigerantes de menor GWP o menor carga.

Implicaciones en el diseño de unidades exteriores: El tipo de refrigerante influye en diversos aspectos del equipo:

- **Tamaño de intercambiadores:** Algunos refrigerantes nuevos tienen distinta capacidad volumétrica. El R-32, por ejemplo, tiene mayor densidad de refrigeración que R-410A, permitiendo en teoría intercambiadores algo más compactos o cargas menores. Sin embargo, también tiene mayor temperatura de descarga, por lo que los compresores requieren ajustes (inyección de líquido en algunos casos para evitar sobrecalentamiento). En general, los equipos R-32 han podido mantener tamaños muy similares a los antiguos R-410A, o incluso reducir peso debido a menor carga refrigerante requerida (aprox. 30% menos de cantidad).

- **Ventilación y disposición:** Para refrigerantes A2L o A3, los fabricantes optimizan la construcción para que, ante una fuga, el gas no se acumule. Las unidades exteriores suelen tener carcasas con aperturas inferiores para que el gas pesado pueda salir (el R-32 es más pesado que el aire, al igual que R-290). Esto puede llevar a unidades ligeramente más altas o con más rejillas. También se incorporan a veces sensores de fuga y sistemas de corte en instalaciones interiores con A2L (en cuartos técnicos cerrados, normativas como EN378 obligan a detección si la concentración pudiera llegar a >20% LFL).

- **Compresores y electrónica:** Cada refrigerante requiere compresores optimizados (por ejemplo, el CO_2 utiliza compresores específicos transcríticos, muy diferentes de los scroll para R-410A). La tendencia a presiones más altas ha llevado a desarrollos de compresores scroll reforzados (R-32 tiene presión algo mayor, R-454B similar). Los variadores de frecuencia se reprogramen para los mapas operativos diferentes. Todo esto ocurre "bajo el capó" y el arquitecto no lo ve, pero conviene saber que el cambio de refrigerante no es trivial: por eso no se suele reconvertir una bomba de calor existente de un gas a otro, se reemplaza el equipo entero.

- **Peso y dimensiones:** En algunos casos, para mantener capacidad con gases menos densos, se aumentan los tamaños de componentes. Un ejemplo es el paso de R-134a a R-513A en enfriadoras: este último tiene ligeramente menor capacidad volumétrica, a veces los intercambiadores tuvieron que crecer un poco. No obstante, la diferencia raramente supera el 10-15%. Con R-290, al limitar carga, se han visto en catálogos modelos modulares: por ejemplo, existen fabricantes que ofrecen una bomba de calor 12 kW R-290 que físicamente son dos circuitos de 6 kW dentro de la misma carcasa, cada uno con ~1 kg de propano, en lugar de un solo circuito de 2 kg. La unidad resultante es más grande (básicamente dos equipos en uno) y pesa más, pero cumple normativa de seguridad.

- **Normativa de ubicación:** Como ya se dijo, no se pueden instalar unidades exteriores con refrigerante inflamable en huecos cerrados o mal ventilados. Esto

afecta a la fase de proyecto: un error sería pretender colocar una bomba de calor R-290 en un patio de luces cerrado o en un local interior. Las instrucciones del fabricante y la UNE EN378 establecen volúmenes mínimos de sala y distancias para evitar acumulación peligrosa. En la práctica, para R-32 y pequeñas cargas se permiten incluso splits interior A2L con ciertas precauciones, pero para R-290 generalmente solo sistemas monobloc (exterior) o unidades compactas de ACS situadas en exteriores o espacios técnicos dedicados.

- **Refrigerantes prohibidos próximamente:** Además de las fechas ya mencionadas de 2025, se espera que en adelante: - R-410A deje de usarse incluso en bombas de calor grandes antes de 2030, reemplazado por R-32, R-454B o incluso R-290 en sistemas medianos. - R-134a será eliminado de equipos nuevos gradualmente, posiblemente a favor de HFO (R-1234ze con GWP < 1, que ya se usa en grandes enfriadoras aunque es ligeramente inflamable A2L)[14].

- Surgen refrigerantes sintéticos nuevos como R-466A (no inflamable, GWP ~733) aunque su adopción es incierta. - En automoción se pasó a R-1234yf (GWP = 4), y en bombas de calor para buses o trenes está entrando CO_2.

- Se discute que a futuro solo queden naturales (R-290, R-744, R-717) y HFOs en el mercado, pero los HFO también tienen sus retos (descomposición en trifluoruro de carbono, etc.).

Desde el punto de vista del arquitecto que proyecta una rehabilitación:

- Asegurarse de elegir equipos con refrigerante actualizado para no instalar tecnología obsoleta. Por ejemplo, no especificar una bomba de calor R-410A en 2024/2025 porque podría tener restricciones de suministro o un ciclo de vida acotado. Optar por R-32 o alternativas de nuevo desarrollo.

- Considerar la seguridad y normativas de refrigerante: si el equipo es split con R-32 interior, verificar que la carga no excede los límites para la sala donde va (los fabricantes indican la carga máxima admisible según el volumen del local, aunque en residencias típicas no suele haber problema porque los splits no superan 1-1,5 kg). – En caso de R-290, planificar la ubicación exterior idónea, alejada de fuentes de ignición, y prever distancias (normalmente 1-2 m libres alrededor en plano horizontal y sin nichos debajo).

- Para grandes instalaciones, tener en cuenta el registro en Industria de los equipos con HFC según RD 552/2019 y la necesidad de mantenimiento por empresa certificada.

[14] https://www.eseficiencia.es/2024/09/19/ehpa-publicado-informe-sobre-mercado-europeo-bombas-calor-estadisticas

4.2.6. Avances tecnológicos, tendencias de mercado y retos de implementación

El sector de las bombas de calor está en plena expansión e innovación. En esta sección se abordan, por un lado, los avances tecnológicos recientes y las líneas de desarrollo futuro, y por otro, las previsiones de mercado y desafíos que enfrenta la generalización de estas soluciones tanto en el ámbito residencial como en el terciario.

Avances tecnológicos recientes

Mejoras en compresores y ciclo frigorífico: La adopción masiva de la tecnología invertir (compresores de velocidad variable) ha sido quizá el avance más significativo de la última década.

Permite modular la capacidad de la bomba de calor ajustándose exactamente a la demanda térmica instantánea, evitando ciclos de arranque/parada y mejorando notablemente la eficiencia estacional en cargas parciales. Prácticamente todas las bombas de calor modernas incorporan compresores twinrotary o scroll con variador de frecuencia. Además, se han implementado mejoras como la inyección de vapor refrigerante en compresores scroll (flash injection), que incrementa la capacidad y COP en condiciones de baja temperatura exterior. Esto ha ampliado el rango operativo de las aerotermias: equipos con inyección de vapor pueden entregar calor útil hasta -20°C fuera sin caída abrupta de rendimiento, lo que antes era difícil.

Aumento de temperaturas de impulsión: Tradicionalmente, las bombas de calor aire-agua trabajaban bien hasta ~50°C. Recientemente, con nuevos refrigerantes (R-32, R-290) y diseños de ciclo de dos etapas, se consiguen bombas de calor de alta temperatura capaces de 70–80°C para ACS o radiadores existentes. Por ejemplo, algunos modelos incorporan un segundo compresor o un circuito de subenfriamiento interno para lograr esos saltos térmicos. Esto abre el mercado de la rehabilitación de edificios antiguos que antes no podían pasarse a bomba de calor sin cambiar los radiadores. Ahora es posible cubrir esas necesidades con bombas de calor específicas, eliminando calderas de combustión incluso en sistemas centralizados de 70°C.

Integración de componentes y soluciones "todo en uno": Los fabricantes han desarrollado unidades muy compactas que integran bomba de calor + acumulador + electrónica en un solo módulo tipo electrodoméstico (especialmente para viviendas). También hidro-unidades modulantes, que combinan bomba de calor y apoyo eléctrico, gestionando ambas inteligentemente para asegurar confort y eficiencia. Se observan soluciones paquetizadas para rehabilitación, como las "calderas híbridas" que combinan en fábrica una pequeña bomba de calor aerotérmica con una caldera de gas de apoyo en un mismo equipo mural; aunque este enfoque híbrido fósil-renovable está perdiendo fuerza en favor de sistemas 100% eléctricos.

Control y conectividad: La domótica y el IoT han permeado en estas instalaciones. Ahora es común que las bombas de calor vengan con conexión WiFi o a sistemas domóticos, permitiendo control remoto vía app, monitorización de consumos,

integración con asistentes de voz, etc. Pero más allá del confort del usuario, esto facilita la gestión inteligente de la demanda: por ejemplo, adaptarse a tarifas eléctricas horarias (programando la producción de ACS en las horas valle), o responder a señales de la red eléctrica (programas de demand response donde la bomba de calor reduce temporalmente carga en picos de red, a cambio de incentivos). En entornos comerciales, la integración BMS (Building Management System) es total, con protocolos abiertos (Modbus, BACnet) para supervisar y optimizar la operación conjuntamente con otras instalaciones.

Reducción de nivel sonoro: Se han hecho avances en la acústica de las unidades exteriores, un tema sensible en entornos urbanos. Ventiladores de diámetro mayor a menor rpm, palas optimizadas aerodinámicamente, compresores con envolventes insonorizantes y modos nocturnos de funcionamiento reducen el ruido. Hoy día muchas aerotermias incluyen un "modo silencio" programable que baja la potencia de compresor/ventilador en horas nocturnas a cambio de menor capacidad, para cumplir ordenanzas. Algunas unidades monobloc R-290 incluso han conseguido ser más silenciosas que sus predecesoras R-410A gracias a intercambiadores sobredimensionados (menos esfuerzo del ventilador). Esto es crucial para viabilidad en rehabilitación, pues instalaciones en patios de luces o fachadas medianeras deben garantizar bajos niveles de ruido en viviendas colindantes.

Tecnologías emergentes: A medio plazo despuntan desarrollos como:

- Bombas de calor de adsorción/absorción impulsadas por energía térmica (ej. gas o calor residual), que podrían usarse en híbridos donde haya solar térmica o calderas de biomasa, aunque su COP aún es modesto.

- Ciclos magnetocalóricos o bombas de calor sólidas (usando materiales que calientan/enfrían al aplicar campos magnéticos). Están en prototipo; prometen eliminar refrigerantes químicos y reducir ruido vibracional (sin compresor), pero aún no han llegado al mercado comercial.

- Uso de AI y sensores avanzados: para diagnóstico predictivo (mantenimiento preventivo), autoajuste según clima (muchas bombas de calor ya vienen con sondas exteriores y curvas de calefacción auto-adaptativas).

- Integración con baterías térmicas: Por ejemplo, tanques de sales fundidas o materiales de cambio de fase acoplados a bombas de calor para almacenar excedentes y liberar calor/frío según demanda. En edificios de oficinas se experimenta con hacer hielo nocturno con electricidad barata y usarlo para refrigeración diurna, complementando la bomba de calor (sistemas ice-storage).

- Microbombas de calor para ventilación: unidades de recuperación de calor con bomba de calor incorporada para climas muy fríos, o ventilación descentralizada con mini-bomba de calor reversible en cada espacio (una idea en desarrollo, que combinaría ventilación y climatización en un solo dispositivo de pared).

Muchos de estos avances buscan mejorar la eficiencia a carga parcial y en climas extremos, reducir costes o eliminar totalmente emisiones directas. En España, iniciativas de I+D (a menudo con apoyo de programas europeos) involucran universidades y centros tecnológicos trabajando en optimizar bombas de calor para district heating, para almacenamiento estacional, o en el concepto de bomba de calor reversible de muy alta temperatura que podría servir para redes de calor urbanas (70-90°C) alimentadas por electricidad verde.

Perspectivas de mercado

El mercado de las bombas de calor vive un crecimiento sin precedentes en Europa y España. Diversos factores confluyen: objetivos climáticos (reducción de CO_2), la necesidad de reducir dependencia de combustibles fósiles importados, la mejora tecnológica y la competitividad económica cada vez mayor respecto a alternativas tradicionales. La Unión Europea explicitó en su estrategia REPowerEU la meta de instalar anualmente millones de bombas de calor para acelerar la transición energética. Se ha llegado a hablar de unos 30 millones de bombas de calor adicionales para 2030 en la UE como objetivo orientativo, lo que beneficiaría especialmente a países del centro y norte de Europa.

Informes recientes de la Asociación Europea de Bombas de Calor (EHPA) señalan que en 2023 había ya alrededor de 24 millones de bombas de calor en servicio en Europa , y que para 2030 podrían alcanzarse 45 millones con las tendencias actuales, aunque esto se quedaría corto respecto a los objetivos climáticos (que exigen del orden de 60 millones). Esto implica prácticamente triplicar el ritmo de ventas anual en la segunda mitad de la década.

En España, como se vió, el parque instalado superó los 5,4 millones en 2022. Muchas de ellas son en realidad bombas de calor aire-aire (splits de aire acondicionado reversibles que cuentan en la estadística como bomba de calor para calefacción). Pero el crecimiento específico de bombas de calor para calefacción central (aerotermia, geotermia) también es notable: por ejemplo, en 2023 se vendieron más de 200.000 bombas de calor de climatización en España, con un crecimiento del 13% respecto al año anterior[15]. Estas cifras sitúan a España aún por debajo de la media europea en instalaciones per cápita, lo que indica un amplio margen de expansión en los próximos años[16]. El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC)[17] y la Estrategia de Rehabilitación a Largo Plazo del gobierno español prevén un papel central de las bombas de calor para electrificar la demanda térmica de edificios, aspirando a que decenas de miles de viviendas al año sustituyan sus sistemas fósiles por bombas de calor apoyadas con renovables. Los fondos europeos (Next Generation EU) han destinado ayudas significativas para rehabilitación que incluyen

[15] https://elperiodicodelaenergia.com/las-ventas-de-bombas-de-calor-se-incrementaron-un-13-en-espana-pero-caen-un-5-enla-ue/

[16] https://climatizacion-y-confort.cdecomunicacion.es/noticias/sector-hvac/126077/espana-se-encuentra-por-debajo-de-lamedia-europea-en-la-compra-de-bombas-de-calor

[17] https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.html

bombas de calor (programas como PREE, programas municipales Cambia360 en Madrid, etc. subvencionan entre un 20% y 50% del coste).

Tendencias de mercado: - En residencial, la aerotermia individual se está convirtiendo en la opción preferida en obra nueva y cada vez más en rehabilitación de viviendas unifamiliares. Los precios, aunque aún elevados comparados con una caldera, han ido bajando con la competencia y producción en volumen. Además, al eliminar también el aire acondicionado, el coste combinado mejora. Se espera que la tendencia continúe y que en pocos años la mayoría de viviendas unifamiliares nuevas lleven aerotermia, y un porcentaje creciente de reformas de calefacción se decanten por ella. - En edificios colectivos y terciarios, empiezan a proliferar ejemplos de sustitución de salas de calderas por bombas de calor centralizadas. Aquí el reto principal es la potencia necesaria y la temperatura de suministro.

Con la llegada de bombas de calor de alta temperatura y cascadas modulares, muchas tipologías de edificios (colegios, hoteles pequeños, edificios administrativos) ya pueden pasarse a bomba de calor.

Para edificios muy grandes o distritos, se plantean redes de calor urbanas con bombas de calor centralizadas, aprovechando fuentes como el agua residual (alcantarillado) o agua de río. En España hay pilotajes en marcha (por ejemplo, en Barcelona una bomba de calor toma calor del alcantarillado para una red de climatización de barrio). - Un mercado en crecimiento es el de bombas de calor híbridas para proceso industrial, donde se recupera calor residual y se eleva mediante bomba de calor para reutilizarlo en el proceso, ahorrando energía. Esta aplicación industrial podría ver un auge si el coste de la energía eléctrica se estabiliza y se avanza en descarbonización industrial.

Retos y barreras: A pesar del panorama optimista, existen desafíos importantes:

- Económico: La inversión inicial de una bomba de calor sigue siendo alta. En rehabilitación, convencer al propietario de sustituir su caldera de 1000 € por una aerotermia de, digamos, 8.000-10.000 € (equipo más adaptación) no es trivial sin ayudas o sin hacer una reflexión de costo ciclo de vida. Las ayudas públicas están mitigando esto, pero su gestión burocrática a veces frena a la gente.

- Cultural y formativa: Muchos técnicos tradicionales (instaladores de calderas, etc.) necesitan capacitación en refrigeración y electricidad para instalar bombas de calor. La falta de profesionales formados puede ralentizar las tasas de instalación. Las administraciones y asociaciones (como AFEC) están organizando cursos y certificaciones para ampliar el número de instaladores cualificados. Asimismo, hay cierta reticencia en usuarios mayores acostumbrados al gas ("la caldera de toda la vida") que requiere campañas de divulgación; no es solo vender un aparato, es cambiar una cultura de calefacción.

- Infraestructura eléctrica: La electrificación de la calefacción conlleva mayor demanda eléctrica en invierno. Si bien la bomba de calor reduce mucho la energía necesaria, aun así en un vecindario donde antes la electricidad apenas se usaba para luz y electrodomésticos, ahora se suman calefacción y ACS. Esto podría requerir reforzar redes de baja tensión, centros de transformación y acometidas en edificios antiguos. Un caso típico: en un piso que tenía 4 kW contratados, si se quita el gas y se pone aerotermia + cocina eléctrica, quizás necesite 8 o 9 kW. Multiplicado por decenas de pisos, la infraestructura comunitaria puede requerir mejora. Las compañías eléctricas y reguladores deben anticipar estos crecimientos de carga y facilitar las ampliaciones. Al mismo tiempo, se promueve la gestión inteligente (bombas de calor funcionando en horarios óptimos) para aplanar la curva de demanda.

- Estacionalidad y picos: En climas fríos, todos los equipos pueden funcionar a máxima potencia simultáneamente (ej. ola de frío). Aunque en Madrid extremo no es tan severo, en otros lugares se estudia el impacto de que miles de bombas de calor arranquen a la vez una madrugada fría. Mecanismos de control agregados, o mantener algún respaldo distribuido (por ejemplo, en Suiza algunos edificios con bomba de calor tienen resistencias eléctricas que la compañía puede activar remoto en caso de necesitar limitar el consumo de compresores en punta, usando la inercia térmica para pasar el pico). Son conceptos avanzados de Smart Grid que pueden ser necesarios cuando la penetración sea muy alta.

- Aislamiento de edificios: Para que la bomba de calor funcione eficientemente, el edificio debe tener demandas razonables. En rehabilitación es fundamental acompañar la sustitución del sistema con mejoras en la envolvente (aislamiento, carpinterías) si esta es deficiente. De lo contrario, la bomba de calor tendría que trabajar muchas horas a plena carga, lo cual aunque sigue siendo más eficiente que resistencias, puede no lograr confort o implicar alto consumo. Los programas integrales de rehabilitación por tanto combinan ambas cosas: mejora pasiva y cambio de sistema activo. El CTE DB HE1 (2019) obliga a que, ante ciertas reformas, se aislen elementos; y el HE0 no se cumplirá si la demanda es enorme aunque la bomba de calor sea eficiente. Así que equipos de diseño de arquitectura e instalaciones deben coordinar actuaciones de envolvente y maquinaria para un resultado óptimo.

- Integración arquitectónica: En edificios existentes, no siempre es fácil encontrar sitio para los equipos nuevos. ¿Dónde colocar la unidad exterior de una aerotermia en un piso alto sin balcón? A veces se plantean soluciones colectivas (por ejemplo, agrupar unidades exteriores en la azotea con conductos verticales para cada vivienda), pero pueden requerir acuerdos de comunidad y obra en zonas comunes.

- También el peso puede ser un problema en azoteas antiguas si se agregan muchos equipos; puede requerir refuerzos estructurales locales o bancadas especiales. El ruido y vibraciones deben mitigarse con soportes antivibratorios y ubicaciones adecuadas.

- Normativa local y trámites: La instalación de bombas de calor exteriores puede requerir licencias (por ejemplo, autorización de elemento en fachada, o perforaciones en acera para geotermia). Simplificar y agilizar trámites es importante. Madrid, por ejemplo, ha eliminado la necesidad de licencia de obras para paneles solares en cubierta (actuación comunicada), habría que facilitar similarmente la instalación de aerotermia. Igualmente, las comunidades de propietarios a veces tienen restricciones estéticas; tocará a los técnicos justificar y explicar los beneficios para obtener los permisos internos.

A pesar de estos desafíos, la trayectoria es clara y el mercado se está adaptando. Los costes de los equipos de bombas de calor tienden a bajar a medida que aumentan los volúmenes de producción (se prevé que las economías de escala, especialmente con la entrada de nuevos fabricantes y la automatización de fábricas, reduzcan precios un 20-30% en los próximos 5 años). Además, los costes de operación son cada vez más favorables: los precios del gas en Europa se han vuelto volátiles y altos, mientras la electricidad, aunque subió, se puede auto-producir con fotovoltaica. Un coeficiente COP 3 implica que incluso si el kWh eléctrico cuesta el triple que el kWh de gas, el coste de calor entregado es similar; y si el COP es mayor o hay fotovoltaica, la balanza se inclina claramente a favor de la bomba de calor. Con las actuales tarifas y COP medios, calentar con bomba de calor ya es más barato que con gas natural en muchos casos, y prácticamente siempre más barato que con gasóleo o propano.

En términos de política y normativas futuras: Es previsible que se sigan endureciendo las exigencias de eficiencia de los edificios (posiblemente futuras revisiones de la Directiva EPBD obligue a eliminar sistemas fósiles en rehabilitaciones profundas a partir de cierta fecha). Algunos países europeos plantean prohibir la instalación de calderas de gas en obra nueva y en sustituciones a partir de 2026-2030.

España aún no ha dado ese paso normativo, pero la dirección apunta a que la bomba de calor se convierta en la opción por defecto. Eurovent y otras certificadoras seguirán elevando el listón de rendimiento para clasificaciones A+++, incentivando la innovación.

4.2.7. Consideraciones normativas y herramientas de diseño

Al encarar un proyecto de rehabilitación energética con bombas de calor en la Comunidad de Madrid, es imprescindible tener en cuenta el marco normativo aplicable y contar con herramientas de apoyo para el diseño y la justificación del desempeño energético. A continuación se resumen las normativas clave y algunas herramientas técnicas relevantes:

Código Técnico de la Edificación (CTE): Dentro del CTE, el Documento Básico HE Ahorro de Energía es el que concierne directamente. Varias secciones del DB-HE afectan a la implantación de bombas de calor:

- CTE DB HE0 (2019) (Limitación del consumo energético): Impone un límite de consumo de energía primaria no renovable (kWh/m²·año) para edificios nuevos y rehabilitaciones importantes. Las bombas de calor, al usar energía renovable del aire o suelo, reducen el cómputo de energía no renovable (especialmente si parte de la electricidad es de origen renovable o fotovoltaica in situ). Así, su inclusión facilita cumplir HE0 en muchos casos. Sin embargo, si la bomba de calor es poco eficiente o la electricidad se contabiliza con un factor de paso alto, hay que vigilar que el consumo global siga dentro de los rangos.

- CTE DB HE1(2019) (Condiciones de demanda): Aunque HE1 se enfoca en la envolvente, indirectamente favorece a las bombas de calor. Una envolvente bien aislada reduce la demanda de calefacción y refrigeración, permitiendo instalar bombas de calor más pequeñas y con mejores factores de carga, lo que aumenta su rendimiento. En rehabilitación, cumplir HE1 suele requerir trasdosados o aislamientos adicionales que, además de ahorrar energía, mejoran la viabilidad de la bomba de calor como único sistema de climatización. - CTE DB HE4 (2019) (Contribución mínima de energías renovables para ACS):

Actualizado en 2019, reconoce explícitamente las bombas de calor como fuente renovable siempre que su SPF ≥ 2,5 . En Madrid (zona climática D), antes era obligatorio cubrir un porcentaje de la demanda de ACS con solar térmico; ahora se puede optar por una bomba de calor aerotérmica/ geotérmica en su lugar, siempre que se justifique su rendimiento. El HE4 pide incluir en el proyecto el cálculo del porcentaje de contribución renovable, para lo cual se puede seguir la metodología de la Directiva 2018/2001 (como vimos, energía renovable aportada = Qusable * (1 - 1/SPF)). Si SPF>2,5, prácticamente toda la energía térmica suministrada cuenta como renovable. Por ejemplo, si una bomba de calor produce 10000 kWh de ACS al año y tiene SPF=3, de esos, 1/3 (3333 kWh) son electricidad de entrada (no renovable) y 2/3 (6667 kWh) se consideran renovables aportados. Esto seguramente cumplirá con el porcentaje que exigía la tabla de HE4 (que para cualquier zona climática ahora es 60% de aporte renovable en ACS). Es importante reseñar en la memoria de HE4 qué normativa y datos se han usado (ficha ErP del equipo, etc.) para validar la contribución. - CTE DB HE3 (Instalaciones de iluminación) y otras no afectan directamente, pero conviene mencionarlo: a veces en rehabilitación integral se tocan todas las instalaciones, y un menor consumo en climatización por bomba de calor puede permitir más margen en iluminación u otros usos dentro del balance de HE0.

En el proyecto de Real Decreto para la trasposición de la EPBD de la Directiva Europea UE 2024/1275, (CTE DB-HE 2026) en demanda (HE1), se mantienen los valores de U y de Klim y el límite de control solar q_sol;jul, lo que cambia es el cómo y cuándo se aplican: se amplía y precisa qué intervenciones en la envolvente se consideran "sustitución, incorporación o modificación sustancial" (más reformas pasan a estar obligadas a cumplir HE1), se separa con más claridad la evaluación de K por usos (vivienda / resto) y, sobre todo, se introduce un límite de hermeticidad mucho más exigente cuando hay ventilación con recuperación de calor ($n_{50} \leq 1\ h^{-1}$ frente a los 3–6 h^{-1} genéricos de 2019), lo que en la práctica obliga a envolventes casi tipo Passivhaus cuando se instala VMRC. En consumo (HE0), las tablas de Cep,nren,lim y Cep,tot,lim para residencial se mantienen, pero se afinan criterios (definición de superficie de referencia, exclusiones, reporte de horas fuera de consigna total y por mes, etc.),

reduciendo márgenes "interpretables" que en la práctica permitían holguras en 2019. Donde sí hay un salto claramente más restrictivo es en la contribución mínima de renovables: en HE4 se acotan mejor las fuentes que pueden computar como renovables (solo sistemas urbanos "eficientes", límites más claros al aprovechamiento de frío residual en residencial, definición más estricta del rendimiento estacional de bombas de calor), cerrando puertas a soluciones borderline que antes entraban como renovables "baratas". En HE5 se mantiene la fórmula de potencia mínima P_min, pero se multiplica el número de edificios obligados a instalar generación eléctrica renovable: pasa de aplicarse solo a edificios >1.000 m² a afectar a la mayoría de edificios nuevos no residenciales y todos los públicos a partir de 250 m², y a más casos de reformas y cambios de uso, extendiendo de facto la obligación de fotovoltaica. Finalmente, el nuevo HE6 "Generación mínima de energía solar" añade otra exigencia de potencia solar mínima P_min = 0,025·S_c para edificios nuevos >250 m² no residenciales y públicos, independiente de HE5, de modo que el conjunto HE4+HE5+HE6 hace mucho más dura, respecto a 2019, la obligación de integrar renovables en cubierta aunque los límites de demanda y consumo "en papel" parezcan casi iguales.

Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE): Es la normativa que rige el diseño, dimensionado, instalación y mantenimiento de sistemas térmicos (calefacción, climatización y ACS). En una rehabilitación con cambio de sistema, habrá que cumplir RITE como si de una instalación nueva se tratase. Algunas implicaciones:

- Exigencia de eficiencia mínima: RITE (ITE 1.2) exige que los generadores térmicos tengan rendimientos mínimos estacionales. Para bombas de calor, básicamente remite a Ecodesign: cumplimiento del Reglamento 813/2013 (etiquetado energético). En resumen, no se puede instalar una bomba de calor de mala eficiencia. Todas las actuales de marca cumplen de sobra, pero hay que documentar la clasificación energética (por ej. A+). Equipos > 400 kW requieren incluso estudio específico de alternativas y justificación de elección.

- Control de temperatura y contabilización: RITE obliga a que las instalaciones tengan sistemas de regulación adecuados (termostatos por estancia, control de curva de calefacción, etc.) y contadores si es centralizada en varios usuarios. Esto influye en que, por ejemplo, en una comunidad de vecinos con aerotermia central se deban poner repartidores de costes o contadores de consumo de calefacción/ACS por vivienda.

- Energía solar térmica y apoyo con bomba de calor: RITE aún menciona la preferencia por solar térmica en ACS, pero ya se ha adaptado a la realidad de la aerotermia. De hecho, en su Instrucción Técnica 1.2.4 se indica que las bombas de calor pueden contribuir a la cobertura renovable cumpliendo la normativa correspondiente.

- Seguridad e higiene: Aspectos como temperaturas de acumulación (se pide ≥ 60°C periódicamente en ACS para evitar legionela, lo cual la bomba de calor debe poder proporcionar o apoyarse con resistencias para ello), o ventilación de locales donde haya equipos con refrigerante. Estos detalles hay que revisarlos: por ejemplo, un acumulador de ACS con bomba de calor debe tener protección antilegionela (ciclos de choque térmico o ultravioleta), lo mismo que se exigía a termos eléctricos.

- Mantenimiento: Tras la puesta en marcha, la instalación de bomba de calor debe ser mantenida según RITE: esto significa mantener un libro de mantenimiento, contratos con mantenedores autorizados si la potencia térmica instalada > 70 kW, revisiones anuales, etc. También si hay gases fluorados en cantidad >5 ton CO_2 eq (unos 2,4 kg de R-410A, umbral que casi cualquier aerotermia supera), se debe llevar control de fugas y certificaciones según Reglamento F-gas. Todo esto es parte de la documentación final.

Regulación local (Comunidad/Ayuntamiento): La Comunidad de Madrid suele adherir y controlar RITE, certificaciones energéticas, etc. No hay por ahora requisitos adicionales autonómicos sobre bombas de calor, pero sí incentivos: por ejemplo, deducciones fiscales por rehabilitación energética (un 20-40% en IRPF de las inversiones, bajo ciertas condiciones de mejora de consumo), ayudas directas (Programa Cambia360 en Madrid capital subvenciona con hasta 3000€ la sustitución de calderas por aerotermia) y facilidades urbanísticas. El Ayuntamiento de Madrid en su Ordenanza de Calidad del Aire y Sostenibilidad ha simplificado trámites para instalaciones renovables; es aconsejable verificar si la instalación de unidades exteriores en fachadas requiere licencia o declaración responsable. En general, unidades en patios interiores no suelen requerir licencia, pero si se colocan en fachada principal, podría considerarse alteración estética (consultar planeamiento o acuerdos de comunidad).

Eurovent y certificaciones de rendimiento: En proyectos profesionales es buena práctica especificar equipos certificados por Eurovent u otro organismo independiente. La certificación Eurovent garantiza que los rendimientos (COP, capacidades) declarados por el fabricante han sido verificados mediante ensayos estandarizados[18]. Esto da confianza de que el equipo rendirá como se espera. Especialmente en bombas de calor grandes, donde el consumo es significativo, es importante poder fiarse de las cifras de catálogo. Muchos pliegos de condiciones en concursos públicos ya incluyen la necesidad de certificado Eurovent. Además, Eurovent publica guías y ratings de eficiencia estacional que pueden ayudar a comparar marcas y modelos. Para el proyectista, usar esas fuentes asegura transparencia frente a la propiedad y cumplimiento de la normativa de eficiencia.

Herramientas de simulación y cálculo: Los arquitectos cuentan con diversos programas para integrar las bombas de calor en el diseño energético, softwares que en su mayoría, ya se han analizado en detalle en el capítulo 2:

[18] https://refindustry.com/news/market-news/heat-pump-certification-simplified-through-eurovent-and-etl-collaboration/

- La Herramienta Unificada LIDER-Calener (HULC), empleada para justificar HE0 y certificación, incluye en su base de datos las bombas de calor.

- Permite introducir los COP/SCOP de la máquina o usar valores por defecto según eficiencia estacional. Conviene introducir los reales para obtener calificaciones más precisas. HULC calcula el consumo horario del edificio teniendo en cuenta la contribución renovable si se marca la opción de aerotermia en ACS (pide el SPF para computar cuánta energía es renovable).

- Calener VYP (viviendas) y Calener GT (terciario) eran las antiguas, ahora integradas en HULC, pero se mencionan porque algunos técnicos aún las utilizan para simulaciones de detalle, especialmente en terciario, donde permite modelar enfriadoras y bombas de calor en configuraciones variadas.

- CE3X: como herramienta de certificación energética de edificios existentes, también contempla bombas de calor. Al introducir una, se solicita su rendimiento o en su defecto asigna por categoría. Para una auditoría energética pre-rehabilitación, CE3X puede simular el ahorro al pasar de caldera a bomba de calor, generando indicadores económicos.

- Programas dinámicos (EnergyPlus, TRNSYS, DesignBuilder, etc.): Son útiles para estudios más avanzados, por ejemplo en un edificio de oficinas complejo con múltiples zonas, para simular estrategias de control, efectos de masa térmica, etc. TRNSYS se usa mucho en proyectos europeos de I+D para simular sistemas híbridos solares-bomba de calor, permitiendo modelar el depósito solar, los controles, etc. Estas herramientas requieren más tiempo y manejo experto, pero dan resultados muy detallados (COP instantáneos, cálculo de SPF anual exacto, etc.).

- Herramientas de los fabricantes: La mayoría de grandes fabricantes ofrecen software propio de selección y simulación. Por ejemplo, Daikin Heating Solutions Navigator, Mitsubishi Ecodan Selection Tool, Vaillant geoSIM (para geotermia), etc. Estos permiten introducir datos de la vivienda (ubicación, superficies, aislamientos) y calculan la carga térmica, sugieren un modelo de bomba de calor y estiman el consumo estacional. Si bien pueden tener cierto sesgo (optimistas hacia su producto), suelen basarse en datos de prueba reales y pueden ahorrar tiempo en predimensionados. También proporcionan diagramas de ciclo, planos de conexiones, etc. que son útiles para el diseño de la sala de máquinas.

- Herramientas de diseño de intercambiadores geotérmicos: En caso de geotermia, existen software específicos como EED (Earth Energy Designer) o GeoTSOL, que calculan la longitud de sondeo necesaria, temperatura del terreno a lo largo de años, etc. Es importante usarlos en fase de proyecto para asegurar que los pozos serán suficientes para la carga impuesta por la bomba de calor en invierno y verano sin producir agotamiento térmico del terreno.

- Herramientas de análisis económico: Por último, para convencer a clientes, se pueden emplear hojas de cálculo o herramientas como RETScreen (gratuita de NRCan) que permiten comparar escenarios energéticos, calcular ahorros, periodos de retorno, ROI de la inversión en bomba de calor, e incluso reducción de emisiones. Incluir este análisis en el proyecto de rehabilitación ayuda a valorar el impacto real más allá del mero cumplimiento normativo.

Documentación y referencias oficiales: Es recomendable consultar fuentes oficiales y guías técnicas existentes. El IDAE ha publicado manuales específicos, como la Guía de Bombas de Calor en Rehabilitación de Edificios (desarrollada junto a AFEC)[19] que contiene casos prácticos, datos de mercado y recomendaciones. También documentos de Eurovent/CECASA sobre mejores prácticas de instalación, y guías del IDAE/Ministerio para la justificación de renovables (p.ej., la ya citada guía de SPF). Mantenerse actualizado con las modificaciones normativas es crítico: por ejemplo, el nuevo Reglamento de Productos de Construcción exigirá posiblemente declaraciones ambientales para equipos, y en algunos concursos se piden ya análisis de ciclo de vida (donde la bomba de calor suele salir bien parada por reducción de emisiones operativas, pero hay que contar también su huella de fabricación). Así mismo el futuro Documento Básico HE del Código Técnico de la Edificación (DB-HE 2026)[20] incrementará sustancialmente las exigencias sobre la eficiencia energética y la contribución mínima de energías renovables, afectando directamente a los sistemas de aerotermia y geotermia. Se prevé que estos sistemas adquieran mayor relevancia debido a que ofrecen altos rendimientos estacionales y bajas emisiones, alineándose perfectamente con los objetivos europeos de descarbonización. Aspectos clave a considerar incluirán la obligatoriedad de justificar con mayor rigor el dimensionamiento en función de la demanda energética específica del edificio, el uso de refrigerantes con menor potencial de calentamiento global (GWP), así como la integración obligatoria con generación fotovoltaica o térmica solar. Esto conllevará también ajustes en las instalaciones eléctricas, aumentando generalmente la potencia contratada e impulsando la necesidad de redes trifásicas para soportar mayores cargas energéticas. Por ello, será fundamental anticiparse mediante un diseño integrado que considere simultáneamente las necesidades térmicas, eléctricas y espaciales del edificio rehabilitado.

4.3. SISTEMAS SOLARES PASIVOS Y ACTIVOS

Madrid, con un clima continental mediterráneo de inviernos fríos y veranos calurosos, presenta un alto potencial de aprovechamiento solar tanto para reducir la demanda de calefacción en invierno como para mitigar la de refrigeración en verano. En el contexto de la rehabilitación energética de edificios, la integración de sistemas solares pasivos y activos se ha convertido en una estrategia clave para

[19] https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/Guias_IDAE_La_Bomba_de_calor_2023_V11.pdf

[20] https://gbce.es/el-gobierno-de-espana-se-compromete-a-incluir-un-documento-dedicado-a-la-sostenibilidad-en-la-revision-del-codigo-tecnico-de-la-edificacion-de-2026/

mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones. Las recientes actualizaciones normativas, como el Código Técnico de la Edificación (CTE 2019) y la eliminación de barreras al autoconsumo fotovoltaico (Real Decreto 15/2018 y RD 244/2019), han impulsado la incorporación de estas soluciones en proyectos de rehabilitación[21].

Se abordan en detalle los principales sistemas solares pasivos (invernaderos adosados, muros de inercia, estrategias bioclimáticas de orientación y sombreamiento, y soluciones tradicionales madrileñas), así como sistemas solares activos (instalaciones fotovoltaicas para autoconsumo, sistemas solares térmicos para agua caliente y climatización, y paneles híbridos fotovoltaico-térmicos). Se analiza su aplicación en rehabilitación urbana en Madrid, sus implicaciones en edificios residenciales frente a terciarios, estrategias de instalación en comunidades de propietarios, y recomendaciones prácticas de diseño, integración arquitectónica, normativa y mantenimiento.



F. Barredo – Galeria acristalada. Alia Arquitectura, Energía y Medioambiente, S.L. – Foto: A.Bosqued

4.3.1. Sistemas Solares Pasivos en rehabilitación

Los sistemas solares pasivos aprovechan la energía solar de forma arquitectónica, sin dispositivos mecánicos, para contribuir al acondicionamiento térmico de los espacios interiores. Su correcto diseño puede disminuir o incluso eliminar la dependencia de sistemas convencionales de climatización, al maximizar los aportes gratuitos de calor en invierno y minimizar la ganancia solar no deseada en verano[22]. A continuación, se describen las principales soluciones pasivas relevantes en la rehabilitación de edificios madrileños:

[21] https://www.edpenergia.es/es/blog/energia-fotovoltaica/la-era-del-autoconsumo-en-espana/

[22] https://www.e-zigurat.com/es/blog/arquitectura-solar-pasiva-invernaderos-muros-trombe-muros-parietodinamicos/

- **Invernaderos adosados (galerías solares)**: Consisten en recintos anexos a la fachada del edificio, predominantemente acristalados, que actúan como espacios intermedios no climatizados. Durante el día captan la radiación solar creando un efecto invernadero que precalienta el aire en su interior; este aire calentado puede recircular hacia la vivienda o precalentar aire de ventilación. Por la noche, el invernadero actúa como colchón térmico reduciendo pérdidas de calor. El CTE define el invernadero adosado como un espacio acristalado adyacente a la fachada, que puede incluir aperturas para recirculación de aire interior o entrada de aire exterior de ventilación. En rehabilitación, es posible cerrar terrazas o balcones preexistentes con acristalamientos para crear galerías solares, muy frecuentes en la arquitectura tradicional madrileña de principios del siglo XX (los miradores acristalados). Estas soluciones, además de aportar calor solar en invierno, mejoran el aislamiento de la fachada al añadir una capa adicional. Es importante prever ventilación o sombreamiento en dichos invernaderos para evitar sobrecalentamiento en verano, mediante ventanas practicables o elementos móviles que disipen el calor acumulado.



Chimenea Solar monitorizada para ventilación natural nocturna.
Foto: A. Bosqued

- **Muros de inercia ventilados / chimeneas solares:** Consisten en un muro de masa, de inercia térmica, pintado de color oscuro, orientado al sur, separado del ambiente exterior por una cámara de aire y un acristalamiento frontal. El sol incide en el muro a través del vidrio, calentándolo y acumulando calor en su masa térmica. Al mismo tiempo, calienta el aire de la cámara, provocando convección natural: el aire calentado asciende y puede introducirse al interior a través de aperturas superiores, mientras que aire más frío del interior entra por aperturas inferiores hacia la cámara para calentarse (circuito de termosifón). Durante la noche, el muro cede el calor almacenado al interior por radiación y convección, suavizando el descenso de temperatura nocturno. Su eficacia es estacional, aportando calor útil en invierno pero pudiendo suponer una carga térmica en verano si no se protege. Si en lugar de conexiones directas a la estancia interior, se diseñan para forzar el tiro, por efecto chimenea, se pueden utilizar en periodos cálidos para realizar una ventilación natural del interior. Por ello, requieren de un diseño adecuado. En rehabilitación, la viabilidad de incorporar un muro de este tipo depende de demasiados factores como la orientación de la fachada (idealmente sur o suroeste), quedando limitados prácticamente a viviendas unifamiliares o partes de edificios singulares.

Estrategias de orientación y distribución: Una de las medidas pasivas fundamentales es el aprovechamiento óptimo de la orientación del edificio y la distribución de huecos. En la rehabilitación, aunque no se puede cambiar la orientación del inmueble, sí se pueden optimizar los huecos solares existentes: maximizar las superficies acristaladas al sur para captación en invierno, minimizar aberturas en orientaciones norte (frías) u oeste (sobrecalentamiento de tarde), o mejorar el aislamiento de estos huecos. También se pueden reubicar usos dentro del edificio (por ejemplo, destinar las estancias de mayor uso diurno a zonas más soleadas). En Madrid, la orientación sur es la más favorable para la captación solar; desvíos moderados de hasta ±45° (sureste o suroeste) reducen muy poco la eficiencia, del orden del 5%[23]. Incluso con orientaciones este u oeste, una disminución de la inclinación de los captadores puede compensar pérdidas, manteniéndolas en torno al 15% respecto a una configuración óptima[24]. Esto significa que edificaciones con cubiertas orientadas al este-oeste baún pueden beneficiarse significativamente de la energía solar pasiva y activa, adecuando ángulos y superficies.

- **Sombreamientos fijos y móviles:** Controlar la radiación solar que ingresa por los huecos es Imprescindible, en Madrid, pueden llegar a suponer la reducción del 50% de la demanda energética de refrigeración y es imprescindible para compatibilizar el confort de verano e invierno. Los elementos de sombreamiento fijo, integrados en la arquitectura, se diseñan según la orientación: voladizos horizontales o aleros sobre ventanas sur (bloquean el sol alto de verano y permiten el sol bajo de invierno), lamas verticales o parasoles para fachadas este/oeste (mitigan la radiación de mañana o tarde), celosías y elementos arquitectónicos como vuelos de forjado o balcones. Por otro lado, los dispositivos móviles ofrecen flexibilidad estacional y diaria: persianas enrollables (muy típicas en viviendas madrileñas), contraventanas, persianas mallorquinas de lamas orientables[25], toldos y estores exteriores, e incluso sistemas modernos motorizados que ajustan la posición según un programa solar. En la rehabilitación de edificios residenciales en Madrid, la incorporación o sustitución de sistemas de persianas tradicionales por otras de aislamiento mejorado, o la instalación de toldos en balcones, son medidas sencillas y efectivas. Las persianas alicantinas (enrollables de lamas de madera) y los voladizos de forja presentes en la arquitectura castiza servían originalmente para tamizar el sol intenso del verano madrileño; actualizarlos o complementarlos con tecnologías modernas (por ejemplo, lamas regulables automáticas) permite conservar la estética tradicional a la par que se optimiza el desempeño energético. Un caso particular de sombreamiento móvil tradicional son las enredaderas de hoja caduca en fachadas o pérgolas: dan sombra en verano y dejan pasar el sol en invierno, una solución vernácula que puede recuperarse en patios y jardines urbanos.

- **Soluciones tradicionales adaptadas a la rehabilitación madrileña:** La arquitectura popular de Madrid y de la Meseta ha empleado históricamente estrategias pasivas que hoy podemos reinterpretar. Por ejemplo, las corralas y patios interiores de las viviendas tradicionales facilitaban la ventilación natural y el refresco evaporativo nocturno, estrategias pasivas de enfriamiento que siguen siendo válidas (apertura nocturna de ventanas enfrentadas para freecooling, instalación de fuentes o vegetación en patios para refrescar el aire). Las fachadas de gran inercia térmica (muros de ladrillo macizo y piedra de las construcciones centenarias) actuaban como reguladores térmicos diarios, manteniendo la frescura interior en días cálidos; en rehabilitación, revalorizar y no cubrir con pladur esos muros interiores puede ayudar a conservar ese efecto de masa térmica. También el uso de colores claros en fachadas y cubiertas para reflejar la radiación (encalados tradicionales) es una técnica pasiva de reducción de ganancia solar que puede recuperarse con pinturas reflectantes modernas. Otra solución es la instalación de chimeneas solares o torres de ventilación, inspiradas en la arquitectura mediterránea, para mejorar la ventilación natural aprovechando el tiro térmico.

4.3.2. Sistemas Solares Activos

A diferencia de los pasivos, los sistemas solares activos emplean equipos mecánicos o eléctricos para convertir la energía solar en electricidad o en calor utilizable, que se distribuye mediante circuitos a los servicios del edificio (electricidad, agua caliente, calefacción, etc.). Suelen requerir equipos especializados (paneles, bombas, inversores, acumuladores) y un cierto mantenimiento, pero proporcionan una contribución energética directa y cuantificable que reduce el consumo de fuentes convencionales. La integración de sistemas activos en rehabilitación energética se ve favorecida por los requisitos normativos actuales: el CTE exige una contribución mínima de energías renovables tanto en producción de agua caliente sanitaria (sección HE4) como en generación eléctrica en edificios nuevos o intervenidos (sección HE5)[26]. A continuación, se abordan las principales tipologías:

Sistemas solares fotovoltaicos (Electricidad solar)

Los paneles solares fotovoltaicos (FV) convierten la radiación solar en energía eléctrica aprovechable en el edificio. La aplicación principal en rehabilitación es el autoconsumo eléctrico, donde la electricidad generada se utiliza prioritariamente para abastecer consumos del propio edificio (viviendas, alumbrado, climatización, etc.), reduciendo la energía tomada de la red. Existen dos modalidades fundamentales:

[23] https://eave.es/blog/perdida-de-energia-por-mala-orientacion-de-las-placas-solares-la-inclinacion-y-orientacion-correctas/

[24] https://sotysolar.es/blog/como-afecta-la-orientacion-de-tu-tejado-a-tu-instalacion-de-placas-solares

[25] https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/ventanas-puertas/persianas-mallorquinas-sombreado-solar.html

[26] https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2022-9848

- **Autoconsumo sin acumulación (sin baterías):** El sistema FV se conecta en paralelo a la red interior del edificio; cuando el sol produce electricidad, esta se consume directamente en los equipos en funcionamiento, y cualquier excedente se vierte a la red de distribución. Si la instalación está acogida a compensación, la energía excedentaria vertida se resta de la facturación eléctrica (hasta el equivalente al consumo de la red) según lo establecido en RD 244/201927. En caso de no acogerse a compensación simplificada, la energía sobrante podría venderse al mercado mediante acuerdo con la comercializadora, aunque para pequeñas instalaciones residenciales es más común la compensación en factura. Esta modalidad, al carecer de baterías, tiene menores costes y complejidad. Su desafío principal es ajustar la producción solar a los patrones de consumo: en horarios solares (mediodía) suele haber excedentes, especialmente en viviendas donde el mayor consumo ocurre por la mañana temprano o noche. Aun así, con un correcto dimensionamiento, se puede alcanzar un elevado grado de autoconsumo instantáneo. En España, tras la supresión del llamado "impuesto al sol" y la simplificación administrativa, este tipo de instalaciones proliferó: solo en 2021 el sector del autoconsumo residencial creció más de un 100%, añadiendo ~1.200 MW de nueva potencia fotovoltaica distribuida. La normativa actual exime de permisos de acceso y conexión a instalaciones pequeñas sin vertido a red o con potencia ≤ 15 kW, agilizando su implantación en comunidades de vecinos. Además, un posterior cambio legislativo amplió de 15 kW a 100 kW el umbral de potencia exento de trámites de acceso (y de garantías económicas), facilitando incluso instalaciones colectivas de mayor tamaño sin grandes trabas burocráticas.

- **Autoconsumo con acumulación (con baterías):** Incorpora uno o varios acumuladores eléctricos (baterías) para almacenar la energía fotovoltaica sobrante en las horas de sol y utilizarla en periodos sin generación (noche o puntas de consumo). Esta solución aumenta el porcentaje de autoconsumo aprovechando prácticamente el 100% de la producción solar (lo que no se consume instantáneo se almacena para más tarde), proporcionando además mayor independencia de la red y resiliencia ante cortes de suministro. Los sistemas con baterías requieren reguladores o inversores híbridos capaces de gestionar la carga/descarga de los acumuladores. En los últimos años, la tecnología de baterías de litio-ion (LiFePO4, NMC, etc.) ha avanzado notablemente, con vida útil de 6000+ ciclos y proveedores ofreciendo garantías de 10 años (por ejemplo, la empresa Sonnen comercializa baterías modulares para hogar con sistemas de gestión inteligente y posibilidad de agregación virtual entre usuarios). A pesar de su coste adicional, la bajada de precios de baterías (~80% de reducción en la última década) y la disponibilidad de subvenciones específicas están haciendo rentable su adopción en instalaciones residenciales. Desde un punto de vista técnico, la presencia de baterías exige un correcto diseño para evitar sobrecargas o descargas profundas y garantizar la seguridad (los inversores cortan la conexión a red en caso de apagón para evitar islanding y disponen de protecciones según normativa UNE-EN 50549). Cabe mencionar que en la práctica, muchos proyectos de rehabilitación optan inicialmente por sistemas sin acumulación por su sencillez, dejando la posibilidad de añadir baterías en el futuro conforme bajen de precio o cambien las necesidades.

[27] https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2019-5089

Importancia del inversor: El inversor fotovoltaico es el corazón de la instalación activa, ya que transforma la corriente continua generada por los paneles en corriente alterna sincronizada con la red del edificio. Además, implementa los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para optimizar la captación en cada momento, y sistemas de protección y control (anti-isla, monitorización, etc.). La elección de un buen inversor influye tanto en el rendimiento (eficiencias de conversión típicas >98% hoy día) como en la fiabilidad. En rehabilitaciones de viviendas multifamiliares, a veces se emplean microinversores (uno por módulo o por cada pocos módulos) u optimizadores para gestionar mejor posibles sombreados parciales y repartir la producción, frente a un único inversor centralizado. Los inversores modernos permiten integrar gestión de baterías (inversores híbridos), comunicaciones para tele-supervisión y funciones inteligentes (limitación de vertido según normativa, funciones de inyección cero, etc.). Es fundamental dimensionarlos correctamente en potencia nominal (muchos diseños sobredimensionan ligeramente la potencia de paneles respecto a la del inversor para maximizar la generación en condiciones subóptimas sin incurrir en grandes pérdidas por clipping).

También se debe prever su ubicación en zonas ventiladas y de fácil acceso, dado que son componentes que pueden requerir sustitución pasados ~15 años.

Eficiencia de los paneles y avances tecnológicos: Los módulos fotovoltaicos convencionales (silicio cristalino) han experimentado un notable incremento de eficiencia en los últimos años, pasando de valores típicos del 15% hace una década a eficiencias del 20-22% en módulos comerciales actuales. Esto se ha logrado mediante mejoras como las células tipo PERC, la interconexión de células partidas (half-cut) con múltiples bus-bars, y tecnologías de heterounión (HJT) o de contacto pasivado (TOPCon) desarrolladas por fabricantes punteros. Por ejemplo, fabricantes europeos como Meyer Burger o REC ofrecen módulos de 120 células half-cut con potencias de 380–400 W en formato residencial (~1,7 m²), alcanzando rendimientos del orden del 20–21% y con garantías de producto de 25 años. Paneles de mayor tamaño (144 o 156 células) superan hoy los 500 W por módulo, lo que reduce el número de paneles necesarios para una determinada potencia instalada, optimizando la ocupación de cubierta. Se recomienda en rehabilitación elegir paneles de alta potencia pico y elevada eficiencia, puesto que la superficie disponible suele ser limitada en cubiertas urbanas; así se maximiza la generación por metro cuadrado. Asimismo, la fiabilidad es un factor clave: módulos de calidad garantizan más del 80-85% de su potencia tras 25 años de servicio. Algunos fabricantes heterogéneos destacables en calidad y larga vida son, por ejemplo, la ya mencionada Meyer Burger (células HJT fabricadas en Europa), REC (pionera en garantías de rendimiento potenciado) o Viessmann, que además de equipos térmicos ofrece módulos FV (Vitovolt) integrables en sus soluciones de energía.

Influencia de la orientación e inclinación de los paneles: Al igual que en los sistemas pasivos, la posición de los módulos FV respecto al sol determinará su producción. En Madrid, la orientación óptima es sur geográfico con una inclinación cercana a la latitud (~30–35°) para maximizar la captación anual.

No obstante, las desviaciones no son críticas: una orientación sureste o suroeste (±45°) apenas reduce la producción anual en un 1-3%, y es posible compensar orientaciones este-oeste disminuyendo la inclinación (por ejemplo, a 15°) para reducir pérdidas al ~15%. En cubiertas planas de edificios existentes, a veces por estética o por minimizar cargas de viento se opta por estructuras con inclinación moderada (10–15°) o por orientación este-oeste con filas opuestas de paneles. Esta configuración Este-Oeste permite producir más uniformemente a lo largo del día (picos más repartidos en la mañana y tarde), lo cual puede ser beneficioso si el consumo diario de la comunidad se distribuye en ambos periodos. En cualquier caso, se debe procurar evitar sombras proyectadas sobre los paneles, ya que sombras parciales pueden disminuir drásticamente la producción de un string fotovoltaico. En entornos urbanos densos, es esencial estudiar las sombras arrojadas por edificios



Integración de paneles fotovoltaicos en sombreamiento de huecos. Ampliación ED. 70 Ciemat. Foto: A.Bosqued

colindantes, chimeneas, áticos, árboles, etc., y quizás implementar soluciones como optimizadores de potencia en módulos puntuales afectados por sombra.

Integración arquitectónica (BIPV): La integración arquitectónica de la fotovoltaica (denominada Building-Integrated Photovoltaics, BIPV) es especialmente relevante en rehabilitación cuando se busca minimizar el impacto visual o aprovechar elementos constructivos para generar energía. Las soluciones BIPV permiten que los paneles formen parte de la envolvente del edificio, cumpliendo simultáneamente funciones arquitectónicas (cubierta, fachada, lucernario) y de generación eléctrica. Ejemplos de integración incluyen: tejas solares o cubiertas fotovoltaicas que sustituyen al tejado tradicional, módulos transparentes o semitransparentes integrados[28] en lucernarios o marquesinas de patios de luces, fachadas ventiladas fotovoltaicas (placas solares cubriendo paramentos verticales, como en algunos edificios institucionales en Madrid donde fachadas acristaladas con células FV generan electricidad), y brise-soleil fotovoltaicos (lamas de sombreamiento que incorporan células solares).

La BIPV presenta ventajas de estética y optimización del espacio, y puede reducir costes al sustituir materiales convencionales de cerramiento[29]. No obstante, también conlleva desafíos: las orientaciones de fachada raramente son las óptimas (una fachada sur vertical recibe menos irradiación anual que una cubierta inclinada), y la eficiencia de las células puede reducirse con mayores temperaturas operativas si la ventilación es limitada (en fachada). Aun así, avances en este área, apoyados por la IEA PVPS Task 15, están dando lugar a productos cada vez más eficientes y versátiles, desde vidrios fotovoltaicos de silicio amorfo para ventanas hasta placas cerámicas con células integradas. En Madrid, la Comisión de Patrimonio y normativas municipales pueden condicionar la instalación visible de paneles en cascos históricos; en esos casos, la integración solar es la solución idónea, manteniendo la estética (por ejemplo, tejas solares imitando la teja árabe) y cumpliendo objetivos energéticos. Cabe citar que la sección HE5 del CTE (Generación mínima de energía eléctrica) no obliga a que los paneles sean integrados, pero sí incentiva su incorporación en proyecto, y su cumplimiento puede lograrse con BIPV siempre que se acredite la producción requerida.

Normativa vigente (CTE DB-HE5): La exigencia básica HE5 del CTE, introducida en 2019 y actualizada posteriormente (RD 450/2022) [30], obliga a edificios de nueva construcción y a grandes rehabilitaciones a disponer de un mínimo de generación eléctrica renovable. La potencia pico a instalar depende del uso del edificio y de su superficie. Por ejemplo, para uso residencial en zona climática D (Madrid se cataloga D3) la tabla de HE5 fija una determinada potencia por cada 100 m² de superficie construida, con umbrales a partir de los cuales es obligatorio. En términos generales, edificios residenciales de más de 3000 m² o terciarios de más de 1000 m² deben instalar del orden de varios kilovatios pico que cubran una fracción de su consumo. Un caso práctico: un edificio de viviendas de 5000 m² en Madrid tendría que instalar alrededor de 30 kW de paneles fotovoltaicos para cumplir la contribución mínima. Estas exigencias han de verificarse en el proyecto de rehabilitación energética y, de facto, están impulsando la adopción de fotovoltaica distribuida. Adicionalmente, el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT) y la normativa de conexión a red

[28] https://onyxsolar.es

[29] https://www.pv-magazine-latam.com/2025/03/25/guia-tecnica-de-la-energia-fotovoltaica-integrada-en-edificios/

[30] https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2022-9848

(RD 1699/2011[31] y posteriores) establecen las condiciones técnicas: protección de inversores, dispositivos de seccionamiento, inversores con marcado CE y conformes a UNE, etc. Todos estos aspectos deben ser tenidos en cuenta por los proyectistas e instaladores, si bien muchas de las soluciones actuales ya vienen homologadas para facilitar su cumplimiento.

Mantenimiento y vida útil: Las instalaciones FV tienen relativamente bajo mantenimiento. Se recomienda una limpieza periódica de los paneles (1–2 veces al año) para eliminar polvo, polución o excrementos que puedan mermar la captación, especialmente en Madrid donde las lluvias son limitadas en verano y la acumulación de suciedad puede reducir un ~5% la producción si no se atiende.

Los inversores requieren eventualmente una revisión de su ventilación (limpiar filtros o disipadores de polvo) y, tras 12-15 años, es posible que necesiten ser sustituidos o reparados (muchos fabricantes, no obstante, ofrecen garantías ampliadas de hasta 10 años para estos equipos críticos). La fijación y estructuras deben inspeccionarse para garantizar su integridad mecánica frente al viento; en Madrid se han dado casos de rachas fuertes (>100 km/h) por lo que es fundamental verificar anclajes en azoteas durante las inspecciones. Por último, el mantenimiento incluye la vigilancia de la producción a través de monitorización: hoy día, prácticamente todas las instalaciones incorporan sistemas que envían datos a la nube, permitiendo a técnicos o a los propios usuarios detectar caídas de rendimiento, posibles averías en strings o suciedad localizada (muchos fabricantes como SMA, Fronius, Huawei, etc., ofrecen portales de monitorización gratuitos). Una práctica recomendada en rehabilitación comunitaria es formalizar contratos de mantenimiento con empresas especializadas, que por un coste reducido anual se encargan de estas inspecciones y de tramitar garantías en caso de fallos. Con estos cuidados, la vida útil esperada de los paneles supera fácilmente los 30 años (aún con ligera degradación), lo que convierte a la fotovoltaica en una inversión altamente rentable y duradera para la comunidad.

Sistemas solares térmicos (Energía solar térmica)

Los sistemas solares térmicos aprovechan la radiación solar para calentar un fluido, típicamente para producir agua caliente sanitaria (ACS), apoyar calefacción o climatizar piscinas. En edificios residenciales, la aplicación clásica es la producción de ACS mediante paneles solares térmicos en cubierta, almacenamiento en depósitos y un sistema de apoyo (caldera de gas, bomba de calor, etc.) para cubrir la fracción no solar. En Madrid, con una generosa irradiación solar, es factible cubrir con solar térmica entre el 50% y el 70% de la demanda de ACS de una vivienda estándar, dependiendo del tamaño de la instalación y de la gestión de la energía. Los componentes principales de estos sistemas son:

Colectores solares: pueden ser planos acristalados (los más comunes en vivienda, constituidos por una caja plana con cubierta de vidrio y un absorbedor metálico con tubos donde circula el fluido), colectores de tubos de vacío (más eficientes a altas temperaturas o en climas fríos, compuestos por tubos cilíndricos al vacío que reducen pérdidas convectivas) o sistemas integrados como termosifones y depósitos integrados (menos habituales en entornos urbanos por estética). En rehabilitación de edificios residenciales, suelen emplearse paneles planos por su buena relación coste/eficiencia y su integración más sencilla en cubiertas inclinadas o terrazas. Un aspecto crítico en Madrid es el riesgo de sobretemperatura en verano: durante agosto, la radiación es máxima mientras que el consumo de ACS puede disminuir (edificios vacíos por vacaciones, colegios cerrados, etc.). Esto puede llevar al estancamiento del fluido caloportador (la bomba se detiene al estar lleno el depósito y sin consumo, y el líquido en paneles puede alcanzar temperaturas muy altas, >180 °C, generando vapor)[32]. El estancamiento frecuente acorta la vida del fluido (glicol) y somete a estrés a componentes (juntas, vasos de expansión). Tradicionalmente, para mitigar esto se han usado sistemas de disipación (radiadores de excedentes, disipadores por aire), estrategias de volcado de calor (piscinas, intercambiadores a la intemperie) o simplemente sobredimensionar ligeramente el consumo en esas fechas (vaciar parcialmente el depósito antes de vacaciones, etc.).

La innovación tecnológica ha aportado soluciones auto-reguladas para evitar sobrecalentamientos. Un ejemplo destacado es la tecnología ThermProtect de Viessmann: un recubrimiento selectivo del absorbedor que cambia sus propiedades ópticas a cierta temperatura límite, reduciendo drásticamente la absorción solar cuando el panel alcanza ~75–80 °C . En esencia, el colector se "apaga" cuando ya no puede volcar más calor útil, evitando la formación de vapor sin necesitar intercambiadores externos.

Viessmann introdujo esta innovación en sus colectores planos Vitosol, siendo el primer sistema de autolimitación incorporado en el propio panel. Gracias a ello, se elimina la necesidad de dispositivos de disipación adicionales o vaciados de emergencia, mejorando la confiabilidad en climas cálidos. Otros fabricantes han adoptado estrategias similares, como materiales con cambio de fase en el absorbedor o sistemas de drenaje automático del fluido cuando no hay demanda (sistemas drainback que vacían los paneles al apagar la bomba, evitando estancamiento). En cualquier caso, en rehabilitaciones en Madrid es muy recomendable prever estas soluciones o, como mínimo, incorporar válvulas de seguridad, vasos de expansión adecuados y control de sobretemperatura conforme al RITE, para garantizar la seguridad del sistema solar térmico.

- **Circuito hidráulico y acumulación:** El calor captado por los paneles se transfiere normalmente a un circuito primario cerrado que contiene un fluido anticongelante (mezcla de agua y glicol). Una bomba solar circuladora mueve este fluido desde los paneles hasta un intercambiador de calor en el depósito de almacenamiento (acumulador de ACS). En el acumulador, generalmente un tanque bien aislado térmicamente, el calor se transfiere al agua sanitaria. El control diferencial acciona la bomba cuando los paneles están más calientes que el depósito, y la detiene cuando la

[31] https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-19242

[32] https://www.energias-renovables.com/solar-termica/thermprotect-de-viessmann-adios-al-sobrecalentamiento-en-20160707

diferencia cae o el depósito alcanza su setpoint. En rehabilitación de edificios, puede plantearse un esquema centralizado (gran depósito común para todo el edificio, con intercambiador solar, como suele exigirse en viviendas nuevas) o esquemas descentralizados (cada vivienda con su pequeño sistema solar individual). Los esquemas centralizados son más eficientes y económicos a gran escala, pero requieren espacio para sala de máquinas, acuerdos comunitarios para reparto de la energía y equilibrado hidráulico; su ventaja es que con unos pocos colectores grandes se abastece a todos. Los sistemas individuales en un edificio colectivo, en cambio, implican muchos kits solares pequeños, lo que no suele ser viable por espacio saturado en cubierta y mayor coste unitario. Por ello, en rehabilitación se suele optar por una solución solar térmica colectiva, dimensionada para cubrir un porcentaje de la demanda global de ACS y que inyecta el calor en los circuitos comunitarios (o pre-calienta el agua que luego se distribuye a cada vivienda). El RITE y la norma UNE 94002 proporcionan directrices para el diseño de estas instalaciones centralizadas, incluyendo la estratificación correcta del tanque, la recirculación de ACS para evitar Legionella (mantener >60 °C en depósito) y la integración con la caldera auxiliar.

- **Exigencias normativas (CTE DB-HE4):** La sección HE4 del CTE "Contribución mínima de energía renovable para ACS" establece que una fracción significativa de la demanda anual de agua caliente sanitaria debe cubrirse mediante sistemas renovables (solar térmica u otras fuentes como biomasa o aerotermia). En la versión original del CTE 2006 se especificaban porcentajes entre 30% y 70% según zonas climáticas y consumos, lo que en la práctica obligaba a instalar colectores solares en casi cualquier edificio de viviendas nuevo. En la actualización de 2019, se flexibilizó la exigencia permitiendo alternativas como bombas de calor aerotérmicas de alta eficiencia para cubrir esa fracción renovable[33]. En síntesis, como se dice al inicio de éste capítulo, si se emplea una bomba de calor para ACS con un rendimiento estacional (SPF) ≥ 2,5, esta se considera energía renovable a efectos de cubrir la exigencia. Esto tiene implicaciones en rehabilitación: edificios que opten por poner sistemas de bomba de calor para ACS y calefacción (aerotermia) pueden estar exceptuados de instalar solar térmica siempre que justifiquen esos SPF altos. No obstante, en muchos casos la solución óptima es combinar ambas tecnologías: solar térmica para precalentar el ACS y bomba de calor como apoyo, reduciendo el consumo eléctrico de esta. El HE4 también contempla que se deben cumplir ciertos criterios de dimensionamiento (por ejemplo, no sobredimensionar tanto la instalación solar que vuelque energía inútil) y de calidad: los colectores han de estar certificados (Solar Keymark o equivalente), y el conjunto debe justificarse con simulación o cálculo según UNE. En rehabilitación energética incentivada (programas estatales PREE, ayudas NextGen), la instalación de solar térmica suele ser una de las medidas subvencionables, siempre que cubra un porcentaje mínimo de la demanda de ACS del edificio (por ejemplo, los programas de ayudas exigen lograr al menos el 30% de contribución solar para considerarlo mejora significativa).

- **Mantenimiento en climas cálidos (caso de Madrid):** Un sistema solar térmico eficiente requiere operaciones de mantenimiento regulares. En Madrid, donde las variaciones estacionales son marcadas, es importante revisar antes del verano el estado del fluido caloportador (con un densímetro para comprobar la concentración de glicol y su punto de ebullición), verificar la presión de llenado en frío del circuito primario y el correcto funcionamiento de la válvula de seguridad y vaso de expansión. También se debe inspeccionar visualmente si hay señales de sobrecalentamiento (por ejemplo, fluidos tostados en el vaso de expansión o ventilación del glicol por la válvula de seguridad, indicativo de que ha hervido). Un adecuado mantenimiento prolonga la vida útil de la instalación más allá de 15-20 años. Los principales recambios suelen ser: el fluido caloportador (conviene renovarlo cada 8-10 años o antes si análisis químicos muestran degradación), los ánodos de sacrificio en los depósitos (para evitar corrosión), y eventualmente bombas o juntas. Los colectores en sí pueden durar décadas si bien su rendimiento puede decaer ligeramente por ensuciamiento o pérdida de vacío en tubos (en el caso de colectores de vacío). Por ello, la limpieza periódica de los vidrios de los paneles es recomendable (remover polvo para mantener alta transmitancia solar). Igualmente, asegurar que no crecen sombras nuevas (por ejemplo, árboles o antenas instaladas posteriormente). Un desafío en entornos urbanos es el acceso a la cubierta para estas labores: en rehabilitación debe preverse un acceso seguro y puntos de anclaje, ya que el RITE exige poder realizar mantenimiento con seguridad.



Integración de campo de captación solar térmica en pérgola de sombreamiento de cubierta del ED. 70 Ciemat – Foto: A. Bosqued.

[33] https://icaen.gencat.cat/web/.content/20_Energia/24_usos_energia/02_edificis/01_certificacio_eficiciencia_energetica/02_preguntes_frequents/Enllacos_Arxius/20201210_Manual_Justificacio_Aerotermia_CAST_Acc.pdf

- **Fabricantes y soluciones comerciales:** El mercado ofrece variedad de equipos adaptados a climas cálidos como el de Madrid. Además de Viessmann (con su tecnología ThermProtect ya mencionada), otros fabricantes europeos como Junkers-Bosch, Vaillant, Viessmann, Solisart, etc. ofrecen kits compactos de solar térmica con controladores inteligentes. Firmas nacionales también han estado presentes en el sector solar térmico. Es importante seleccionar equipos con certificación Solar Keymark y comprobar que el fabricante provea servicio técnico y repuestos locales, dado que la fiabilidad a largo plazo es crucial. Como ejemplo de innovación, la empresa española Abora Solar (Zaragoza) ha desarrollado paneles híbridos que priorizan la producción térmica de forma muy eficiente (véase sección 2.3) y que pueden ser una alternativa en ciertas rehabilitaciones donde se busque maximizar el aprovechamiento solar total.

Sistemas solares híbridos (Fotovoltaico-Térmicos, PV-T)

Los paneles híbridos PV-T combinan en un único módulo la generación fotovoltaica y la térmica: generalmente son paneles que en su cara expuesta tienen células fotovoltaicas y por la cara posterior incorporan un intercambiador (canales por donde circula un fluido) que extrae el calor. Así, con el mismo elemento se produce electricidad y se recupera calor útil (normalmente para ACS o calefacción de apoyo). La gran ventaja de estos sistemas es su elevado rendimiento energético total: un panel híbrido puede alcanzar eficiencias combinadas del 60-80%, mucho mayores que el ~20% eléctrico de uno FV convencional por sí solo. De hecho, ciertos diseños optimizados logran hasta casi un 90% de aprovechamiento de la radiación incidente[34], como es el caso de paneles híbridos desarrollados en España con récord mundial de eficiencia.

Ventajas y aplicaciones específicas: Al producir calor al mismo tiempo que electricidad, los paneles híbridos aprovechan el efecto de refrigeración de las células FV: al extraer calor para el ACS, se mantiene la célula más fría, lo que mejora ligeramente su rendimiento eléctrico (las células solares pierden eficiencia cuando se calientan; enfriándolas con el flujo del circuito térmico se mitiga esa pérdida). En instalaciones con espacio limitado, los PV-T permiten obtener el cuádruple de energía en el mismo espacio que un panel fotovoltaico convencional[35], sumando ambas formas. Esto es especialmente interesante en rehabilitación de edificios residenciales con poca superficie de cubierta utilizable: por ejemplo, instalando paneles híbridos en vez de separados, una comunidad podría cubrir tanto parte de su demanda eléctrica como la mayor parte de su demanda de agua caliente, sin duplicar equipos ni superficies. También se evitan algunas duplicidades estructurales (un único sistema de soporte y anclaje) y estéticas (menor número de paneles visibles). Son adecuados en edificios que requieran calor de baja temperatura durante todo el año (ACS continua, piscinas climatizadas) además de electricidad.

Eficiencia térmica y eléctrica: Un panel híbrido típico puede tener una potencia pico de ~300–350 W eléctrico a STC, y una potencia térmica del orden de 700–800 W bajo condiciones favorables (ΔT moderado). El rendimiento eléctrico es similar al de un panel FV estándar (15-20%), mientras que el térmico puede situarse en 50-60% dependiendo de la temperatura de trabajo. Lógicamente, cuanto más se extraiga calor (bajando la temperatura del panel), mejor para la producción eléctrica; se busca un compromiso según las necesidades. Algunos fabricantes priorizan la producción térmica (paneles con alta eficiencia térmica y eléctrico algo menor, típicos para climas fríos), mientras otros equilibran ambas. Abora Solar, por ejemplo, con su tecnología aHTech®, reporta que sus híbridos pueden generar 4 veces más energía total que un FV, como se indicó , y alcanzan coeficientes de pérdidas térmicas muy bajos, aptos para climas de verano calurosos.

Integración e instalación: La instalación de un PV-T se parece a la de un panel solar térmico en cuanto a que necesita un circuito hidráulico con bomba, depósito e intercambiador, además de un inversor fotovoltaico para la parte eléctrica. En rehabilitación, esto supone que debe haber tanto conexión al cuadro eléctrico como conducción hidráulica hacia la sala de calderas o el punto donde esté el depósito de ACS. Por tanto, la complejidad de los híbridos es mayor que simplemente añadir FV. Sin embargo, puede ser compensada por la reducción de complejidad en comparación a montar dos sistemas por separado. Un reto es gestionar la producción simultánea: en verano, cuando la radiación es alta, puede haber excedente de calor (justo el problema de la solar térmica mencionada antes) y a la vez excedente de electricidad (si la demanda es baja). Esto exige un buen sistema de control y posible disipación o derivación de alguno de los excesos (por ejemplo, si el depósito de ACS está caliente, quizá convenga parar la extracción de calor y permitir que el panel se caliente aunque baje algo el rendimiento FV; o viceversa, si no hay consumo eléctrico, aprovechar resistencias para convertir en calor útil). Algunos sistemas híbridos avanzados incluyen gestión con soluciones de vertido cero para electricidad y válvulas de tres vías para verter calor sobrante a elementos auxiliares (piscina, suelo radiante nocturno, etc.).

Integración arquitectónica: Los paneles híbridos son físicamente muy similares a los convencionales, quizá un poco más gruesos y pesados (por la parte del intercambiador y líquido). Por tanto, su integración en cubierta es análoga a la de paneles planos. Pueden montarse sobre tejado inclinado, coplanar al mismo, o sobre soportes en azotea plana. También existen híbridos para integración en fachadas o en pérgolas. Dado que su objetivo es maximizar la captación solar total, conviene instalarlos en las posiciones más soleadas y sin sombras de la cubierta, reservando a lo sumo zonas menos óptimas para paneles FV simples (que toleran mejor subóptimos, al no arriesgar un sobrecalentamiento). El aspecto visual de un panel híbrido es prácticamente igual al de un módulo fotovoltaico estándar, por lo que no supone un impacto estético adicional. Algunos fabricantes incluso ofrecen paneles híbridos en color o con apariencia personalizable para proyectos especiales.

Ejemplos y estado de la técnica: En España, el uso de paneles híbridos aún es incipiente pero creciente. Existen instalaciones piloto en hoteles y viviendas unifamiliares donde un único campo de paneles híbridos provee electricidad y ACS con altos porcentajes de autoabastecimiento. El IDAE y algunas comunidades autónomas han

[34] https://www.youtube.com/watch?v=s_Dmrl6AgPo&pp=ygUSI3BsYWNhc3NvbGFyZXMyMDIz

[35] https://abora-solar.com/panel-solar-hibrido/



Campo de captación solar híbrida de Ábora Solar en el CNB (Club de Natación de Barcelona). Fuente: Redacción Cámara de Zaragoza.

subvencionado proyectos demostrativos con esta tecnología dentro de programas de innovación. A nivel comercial, empresas españolas como Abora o Endef han desarrollado productos híbridos punteros. A nivel europeo, también se encuentran proveedores como DualSun (Francia) o Sonnenkraft (Austria) con soluciones híbridas. Las eficiencias récord alcanzadas (cercanas al 80-90% como se mencionó) demuestran el potencial: un estudio reportado por la Agencia Internacional de la Energía (IEA), demostraba que la energía solar total aprovechada por PV-T supera ampliamente la de instalar por separado la misma área en FV + térmica, gracias a sinergias en el intercambio de calor. Por tanto, para rehabilitación de edificios con limitación de espacio pero demanda tanto eléctrica como térmica relevante, los paneles híbridos se perfilan como una solución muy atractiva a medio plazo.

Uso en Edificios Residenciales vs Terciarios/Industriales

La aplicación de sistemas solares en rehabilitación varía sensiblemente según el tipo de edificio y sus patrones de consumo. Las diferencias entre el sector residencial y el terciario/industrial en términos de disponibilidad de superficie, perfil de demanda y viabilidad económica condicionarán el diseño y dimensionamiento de las instalaciones solares:

- **Superficie disponible:** En edificios residenciales, especialmente los bloques de viviendas en altura típicos de Madrid, la superficie de cubierta es relativamente pequeña en proporción a la superficie útil o al número de viviendas. Por ejemplo, un edificio de 5 plantas con 10 viviendas quizás tenga una azotea de 200 m² para dar servicio a 10 familias. Esto limita la potencia solar instalada por vivienda. En cambio, en edificios terciarios extensos (un colegio, un centro comercial de una planta, una nave industrial) la cubierta suele ser muy grande en relación a la ocupación. Naves industriales diáfanas pueden destinar miles de metros cuadrados de cubierta plana a paneles solares, sin conflictos con otros usos. Por ello, en terciario/industrial es más factible cubrir una porción importante del consumo con energía solar simplemente por capacidad de instalación. A nivel nacional, se refleja en las estadísticas de consumo eléctrico: aunque el residencial representa alrededor del 30% del consumo eléctrico total, el sector servicios otro ~34% y la industria ~35%[36], lo hace repartido en muchísimos más puntos de consumo (viviendas) frente a relativamente menos edificios terciarios e industriales de gran consumo. Esto significa que cada edificio terciario consume de media mucho más que una vivienda, pero a su vez suele tener proporcionalmente más superficie para instalar solar. En rehabilitación de vivienda colectiva, esta restricción de espacio obliga a optimizar: emplear paneles de alto rendimiento, priorizar usos (p.ej., quizás solo cubrir demanda de ACS comunal si la eléctrica es inabarcable), o recurrir a fachadas/integración para ampliar el área captadora.

- **Perfil de consumo diario:** Los patrones de uso de la energía difieren entre residencial y terciario, lo cual influye en el aprovechamiento de la generación solar. En viviendas el consumo eléctrico presenta picos matutinos (desayuno, aseo) y nocturnos (iluminación, cocina, entretenimiento), con valles durante las horas centrales del día cuando muchos usuarios están fuera. Este desfase respecto a la producción solar (máxima a mediodía) hace que, sin baterías, una parte notable de la energía FV residencial pueda sobrar al momento de generarse. Por el contrario, en edificios terciarios como oficinas o comercios, el consumo ocurre principalmente en horario diurno laboral (9:00–18:00), coincidente con la generación solar, lo cual permite autoconsumir la mayoría de la producción al instante. Esto otorga a las instalaciones solares en terciario un mayor factor de autoconsumo y por tanto mejor rentabilidad sin necesidad de acumulación. Un ejemplo: un colegio con cocina y climatización diurna puede aprovechar un 80% de la energía FV generada, mientras un bloque de pisos sin baterías quizá solo use directamente el 30-40%. En cuanto al consumo térmico, también varía: las viviendas suelen tener demanda de ACS bastante constante todo el año (alrededor de 30-50 litros/persona-día) y necesidades de calefacción en invierno, mientras un edificio industrial podría usar calor de proceso intensivamente o nada en absoluto, y un terciario como una clínica tiene consumos de ACS considerables. Estas diferencias hacen que la fracción solar térmica de ahorro alcanzable varíe: es más fácil conseguir altas coberturas solares en un hotel (agua caliente todo el día, todo el año) que en viviendas (consumo concentrado en mañanas/noches y algo menor en verano). Por tanto, la viabilidad de solar térmica suele ser mayor en equipamientos con consumo continuo (residencias, hospitales, polideportivos) que en meros bloques residenciales, donde a veces la energía vertida o no aprovechada en verano reduce la eficiencia anual del sistema.

[36] https://www.compromisorse.com/rse/2025/03/10/la-industria-consume-mas-de-un-tercio-de-la-energia-electrica-de-espana/

- **Viabilidad económica:** Tradicionalmente, la rentabilidad de la solar dependía del coste evitado de la energía convencional. Consumidores industriales pagan tarifas eléctricas elevadas (sobre todo en horario punta) y, en el caso de calderas, combustibles como gas o gasóleo cuyo precio ha aumentado, por lo que el ahorro absoluto logrado por kWh solar es mayor. Además, empresas y terciario pueden beneficiarse de amortizaciones fiscales, deducciones por inversión en I+D, desgravaciones de impuesto de sociedades, etc. al acometer instalaciones renovables, ventajas no aplicables a particulares. Por otra parte, las empresas suelen tener mayor capacidad de inversión o acceso a financiación para proyectos energéticos (leasing, PPAs, etc.). Todo ello redunda en que un proyecto fotovoltaico industrial típico alcance paybacks de 4-6 años, mientras uno residencial colectivo puede situarse en 6-9 años, ligeramente mayor (aunque aún atractivo). No obstante, los programas de subvenciones actuales (fondos europeos Next Generation, incentivos autonómicos) han equiparado en parte el panorama: comunidades de propietarios en Madrid disponen de subvenciones a fondo perdido de hasta el 40% para instalaciones solares, y bonificaciones locales (por ejemplo, reducción del IBI hasta un 50% por 3 años en Madrid para quien instale solar). Estas ayudas mejoran la rentabilidad en residencial, llegando en algunos casos a periodos de retorno de ~5 años[37], similares al sector empresarial. En definitiva, la escala es otro factor: una gran instalación (100 kW en una nave) obtiene economías de escala en coste por kW instalado mucho mejores que una pequeña de 5 kW en una vivienda. Sin embargo, las instalaciones residenciales compartidas permiten acercarse a escalas mayores. Es importante que el técnico rehabilitador analice estos factores de viabilidad: consumo, tarifa energética, inversión necesaria y ayudas disponibles, para presentar a la propiedad una evaluación económica realista. En muchos casos, la rehabilitación energética con solar se autofinancia con los ahorros generados, incrementando además el valor patrimonial del inmueble y cumpliendo con las políticas de descarbonización (lo cual puede ser un valor añadido para empresas comprometidas con RSC/ESG, o para viviendas con certificado energético mejorado).

- **Escalabilidad:** Los edificios terciarios/industriales suelen permitir ampliaciones modulares de las instalaciones solares con facilidad. Por ejemplo, una industria que aumenta su consumo puede agregar más paneles en su cubierta sobrante o en marquesinas de aparcamiento. En cambio, en residenciales muchas veces se ocupa toda la superficie útil desde el inicio (el "techo solar" por así decir), y escalar más allá sería complicado sin recurrir a soluciones innovadoras (fachadas solares adicionales, etc.). Por ello, es recomendable en residencial dimensionar pensando a futuro (por ejemplo, dejando preinstalación para baterías aunque no se instalen inicialmente, o previsión de cargadores de vehículo eléctrico que incrementarán autoconsumo diurno de la FV). En edificios corporativos o fábricas, la escalabilidad incluye incluso la posibilidad de microredes o comunidades energéticas industriales en un polígono: varias naves compartiendo una gran instalación en una cubierta mediante autoconsumo colectivo (posibilidad legal desde 2020). En el sector residencial, la comunidad energética local puede ser una vía para escalar más allá del propio edificio, compartiendo generación con edificios vecinos o equipamientos públicos próximos, algo que la regulación permite en un radio de 500 metros o dentro de la misma subestación de baja tensión.

[37] https://www.e4e-soluciones.com/servicios-energeticos/autoconsumo-compartido

Estrategias de Instalación en Comunidades de Propietarios

En la rehabilitación de edificios de viviendas en régimen de comunidad (propiedad horizontal), la implementación de instalaciones solares debe tener en cuenta tanto los aspectos técnicos como los legales y organizativos propios de una comunidad de vecinos. Afortunadamente, las barreras legales para el autoconsumo colectivo se han reducido sustancialmente en los últimos años en España: el RD 244/2019 reconoció explícitamente la figura del autoconsumo compartido, permitiendo que una sola instalación genere energía para múltiples usuarios asociados. Asimismo, la Ley de Propiedad Horizontal fue modificada para facilitar la aprobación e instalación de sistemas comunes. Algunos puntos clave y estrategias de implementación son:

- **Propiedad y acuerdo comunitario:** Tradicionalmente, cualquier obra en elementos comunes requería unanimidad o mayorías cualificadas en la junta de propietarios. Tras la reforma legal, la instalación de energías renovables de uso común (por ejemplo, placas solares en la azotea) se puede aprobar por mayoría simple de propietarios y cuotas de participación[38]. Es decir, basta más del 50% de votos favorables en junta para proceder, considerándose la instalación como mejora no exigible, pero de interés general. Si la instalación es para todos los vecinos, el coste se asume como gasto general según coeficientes de participación. Si, en cambio, la instalación es promovida por solo parte de los vecinos (por ejemplo, un grupo instala paneles para su autoconsumo particular, sin que todos participen), la ley permite hacerlo con solo 1/3 de votos favorables, siempre que quienes no participan no abonen coste alguno y no se vean perjudicados. En tal caso, los beneficios (energía generada) son exclusivos de los vecinos que pagaron, y si otros desean sumarse más adelante, deberán contribuir proporcionalmente a la inversión inicial. Esta flexibilidad legal abre la puerta a que, incluso si no hay consenso total en una comunidad, un grupo de vecinos interesados pueda impulsar el proyecto sin veto de los demás. No obstante, en la práctica es altamente recomendable buscar el máximo consenso posible desde el inicio, ya que las instalaciones compartidas ofrecen mayor rendimiento cuando abarcan el consumo común y del mayor número de viviendas (economías de escala).

- **Tipos de instalación en comunidades:** Pueden plantearse distintos alcances: (a) Instalación solar para cubrir consumos de servicios comunes del edificio

[38] https://www.comunidad.madrid/servicios/consumo/instalacion-placas-solares-comunidades-propietarios

(iluminación de escalera, ascensor, bomba de agua, garaje, etc.). En este caso, la propiedad es de la comunidad en su conjunto, y la energía generada se vierte al cuadro general de servicios comunes. Es quizás la opción más sencilla de implementar, pues afecta a todos por igual indirectamente (reduce gastos comunes) y suele requerir menos trámites (contrato de autoconsumo tipo colectivo interno sin compensación, o con compensación si hay excedentes y la comunidad es sujeto de contrato con comercializadora). (b) Instalación para viviendas y zonas comunes: en este modelo, la instalación abastece tanto a los consumos comunes como a las viviendas particulares. Técnicamente se configura mediante coeficientes de reparto: por ejemplo, un 20% de la generación asignada a servicios comunes, y el resto repartido entre las viviendas participantes en proporción a, digamos, su cuota o según acuerden (no tiene por qué ser todas igual, podría ponderarse por número de personas, consumo histórico, etc., mientras haya acuerdo previo registrado). Este esquema requiere formalizar un acuerdo de reparto fijo ante la compañía distribuidora, que será el que se aplique mensualmente para descontar la parte de energía solar a cada uno en sus facturas. Todos los participantes deben estar acogidos a la modalidad de autoconsumo con excedentes compensados, bajo la misma compañía distribuidora, etc. (c) Instalación solo para algunas viviendas: Es posible que solo unos vecinos quieran poner paneles (por ejemplo, los áticos pueden instalar para sí mismos). En tal caso, se suele tratar como varias instalaciones individuales ubicadas en la misma cubierta, sin reparto entre diferentes usuarios, aunque compartiendo la infraestructura física. Aquí es crucial el acuerdo de la comunidad sobre el derecho de uso privativo de la azotea para ese fin y las condiciones (quién mantiene, qué pasa si hay filtraciones, etc.). Este modelo produce una minicomunidad solar dentro de la comunidad general.

- **Reparto de la energía y coeficientes:** El RD 244/2019 establece que, en autoconsumo colectivo conectado a red, los participantes deben acordar y notificar un coeficiente fijo de reparto de la energía generada para cada uno. Por ejemplo: en una comunidad, se instala 15 kW, y se asigna 10% de lo producido al local comercial en planta baja, 5% a cada uno de 8 vecinos (40%), y el 50% restante a los consumos comunes. Estos porcentajes se aplican horario a horario a la generación. Si a las 12h la planta genera 10 kW, se imputan 1 kW al local, 0,5 kW a cada vecino, etc. Cualquier excedente (energía no autoconsumida instantáneamente por un participante) puede acogerse a compensación simplificada a fin de mes, pero por separado para cada participante. Es decir, cada vecino verá en su factura los kWh de excedente vertidos descontados hasta su consumo de red. Si la instalación es pequeña en relación al consumo global, lo ideal es ajustar los coeficientes a las demandas reales para que prácticamente no haya excedentes vertidos (o se minimicen). Ejemplos de implementación: En España ya existen numerosos casos reales. Por ejemplo, un bloque en Girona con 12 viviendas y 6 kW instalados, donde tras un año se logró un ahorro del 30% en la factura de cada vecino y un 25% en los comunes, con excedentes mínimos. En Madrid, la Empresa Municipal de la Vivienda (EMVS) ha impulsado instalaciones colectivas en rehabilitaciones de vivienda pública, demostrando ahorros superiores al 25-30% en ACS eléctrico y comunidades. También hay casos en régimen de servicios energéticos, donde una empresa instala y opera las placas en la comunidad y los vecinos le pagan una cuota fija menor a lo que antes pagaban de luz (modelo PPA local). Cada comunidad puede elegir el modelo de gestión que mejor se adapte: autogestión (propiedad comunitaria directa) o externalización parcial.

- **Consideraciones técnicas en comunidades:** Instalar en comunidades implica retos como la limitación de espacio ya mencionada, pero también otros: la estructura de la cubierta debe ser comprobada (es un elemento común y la sobrecarga de paneles + lastrados si los hay debe ser autorizada por técnico competente para asegurar que soportará, aunque la sobrecarga suele ser moderada, <20 kg/m²). Además, el trazado de las canalizaciones eléctricas desde la azotea hasta los distintos contadores de cada vivienda (normalmente situados en el cuarto de contadores) requiere estudiar patinillos o fachadas para minimizarlos; una alternativa es realizar la conexión virtual a través de la compañía (lo habitual) de modo que físicamente solo se conecta la planta solar a la red interior común y se compensa vía contador virtual a cada cual, lo que simplifica la obra. En caso de solar térmica comunitaria, las tuberías de distribución de ACS solar deben aislarse muy bien y repartirse a los montantes existentes, vigilando la compatibilidad con la instalación de fontanería original (a veces conviene, aprovechando la obra, renovar montantes o implementar un sistema semi-instantáneo con intercambiadores en cada vivienda para evitar legionela en acumulaciones grandes). Otro punto es la gestión de mantenimiento compartido: la comunidad debe decidir quién se encargará de la operación y mantenimiento (ya sea una comisión interna, la empresa instaladora con un contrato, etc.), y prever un fondo para ello. No es muy oneroso (quizá 100-200 € al año para limpiezas y revisión en una instalación mediana), pero es importante formalizarlo.

- **Beneficios y reparto económico:** Los vecinos querrán saber cómo se traduce la instalación en ahorro para cada uno. Si la instalación cubre servicios comunes, el beneficio se refleja en cuotas comunitarias más bajas (menos gasto de luz en ascensor, bombeo, etc., típicamente un ahorro del 50-70% en esos conceptos). Si cubre viviendas, cada una verá reducida su factura individual en proporción a su cuota de autoconsumo solar. Se han dado casos donde viviendas pequeñas o con bajo consumo terminan con facturas casi nulas varios meses, acumulando solo la parte fija, gracias a la fracción solar recibida. Una recomendación es instalar contadores secundarios para monitorizar cuánta energía solar recibe cada piso y así dar transparencia (no es obligatorio si se usan coeficientes fijos, pero aporta confianza entre vecinos). En cuanto a la inversión, si es comunitaria se reparte por coeficiente de propiedad (salvo que se acuerde otro criterio), y si es un grupo parcial de vecinos, estos corren con el 100% cada uno según lo pactado (ej., a partes iguales o según número de paneles asignados). Existen ya financiaciones específicas para comunidades, incluso bancos que ofrecen préstamos cuasi hipotecarios a comunidades de propietarios

para instalaciones solares, respaldados en los ahorros futuros. De hecho, dado que un sistema solar suele durar >25 años, es factible financiarlo a 8-10 años y que la cuota de préstamo sea inferior al ahorro mensual en electricidad, consiguiendo ahorro neto desde el día uno. Esto es un potente argumento para convencer a asambleas de vecinos, junto con el incremento de valor del inmueble (un edificio con calificación energética mejorada o con autoconsumo compartido es más atractivo en el mercado inmobiliario emergente concienciado con la sostenibilidad). Ejemplos de referencia en España: Como ejemplos inspiradores, cabe citar la primera instalación de autoconsumo compartido en un bloque de viviendas en Madrid (Barrio de la Latina, 2019), donde 5 vecinos instalaron 20 paneles para uso común y privado con ahorros del 40% en sus recibos; o el caso de una comunidad en Rubí (Barcelona) premiada por UNEF, que con 15 kW para 10 viviendas logró reducir 18 toneladas de CO_2 al año. También existen comunidades energéticas locales más amplias, como la promovida en el Barrio del Pilar de Madrid, donde varias comunidades de propietarios se han unido con apoyo municipal para instalar 100 kW en un polideportivo cercano y repartir la energía entre los vecinos adheridos. Este modelo innovador trasciende un solo edificio y muestra hacia dónde evoluciona el autoconsumo: la colaboración entre usuarios para aprovechar espacios disponibles compartidos.

5
ILUMINACIÓN

La iluminación es un factor clave en la rehabilitación energética de edificios, ya que influye tanto en el consumo de energía como en el confort y bienestar de los ocupantes. En este capítulo se abordarán las estrategias de iluminación natural y artificial, enfatizando las medidas para maximizar la luz natural utilizable y la implementación de tecnologías eficientes (como LED y sistemas de control inteligente) en iluminación artificial.

Asimismo, se revisarán las normativas vigentes (entre otras, Código Técnico de Edificación DB-HE3 y regulación europea) y se discutirán consideraciones de salubridad, bienestar y diseño responsable (incluyendo criterios de certificación ambiental como la Guía Verde del GBCe). Complementariamente se aportarán herramientas prácticas (software de simulación lumínica).

5.1. ILUMINACIÓN NATURAL Y ARTIFICIAL

5.1.1. Importancia de la iluminación natural: ahorro energético, deslumbramiento y ganancia térmica

Aprovechar al máximo la iluminación natural permite reducir significativamente la necesidad de luz artificial y, por tanto, el consumo energético del edificio. En ciertos tipos de edificios la iluminación representa una fracción muy importante de la energía eléctrica total: por ejemplo, en oficinas puede suponer alrededor del 50% del consumo eléctrico, mientras que en viviendas suele estar entre un 10% y 15%[1]. Esto indica que las estrategias de iluminación natural tienen un impacto especialmente significativo en edificios terciarios (oficinas, comercios, colegios, etc.) donde la demanda de iluminación es alta durante el día, a diferencia del sector residencial donde el uso de luz artificial se concentra más en horas nocturnas durante toda la semana.

No obstante, un diseño inadecuado de la iluminación natural puede conllevar problemas de deslumbramiento (glare) y ganancias de calor indeseadas en el interior. Una excesiva entrada de sol directo eleva la luminancia de ciertas zonas provocando deslumbramientos y contrastes incómodos, a la vez que incrementa la carga térmica en verano[2]. De hecho, estudios señalan que niveles excesivos de luz natural sin control suelen asociarse a riesgos de deslumbramiento y sobrecalentamiento. Por ello, es fundamental planificar las aberturas (ventanas, lucernarios) considerando la orientación y el clima local, de modo que se maximice la luz natural difusa útil y se limite la radiación solar directa en momentos no deseados. Un error común en el pasado fue sobredimensionar superficies acristaladas buscando luz a toda costa, lo cual derivaba en edificios sobreiluminados y sobrecalentados que requerían constantes cerramientos (cortinas, estores) y uso de climatización, contradiciendo los objetivos de eficiencia. El diseño bioclimático moderno busca un equilibrio: asegurar iluminación natural suficiente pero controlada, evitando tanto la penumbra como el exceso de soleamiento directo.

[1] https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2006/07/Guia-Tecnica-de-Iluminacion-Eficiente-Sector-Residencial-y-Terciario-fenercom-2006.pdf

[2] http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-69962010000300007

5.1.2. Elementos de reflexión y sombreamiento en el diseño arquitectónico

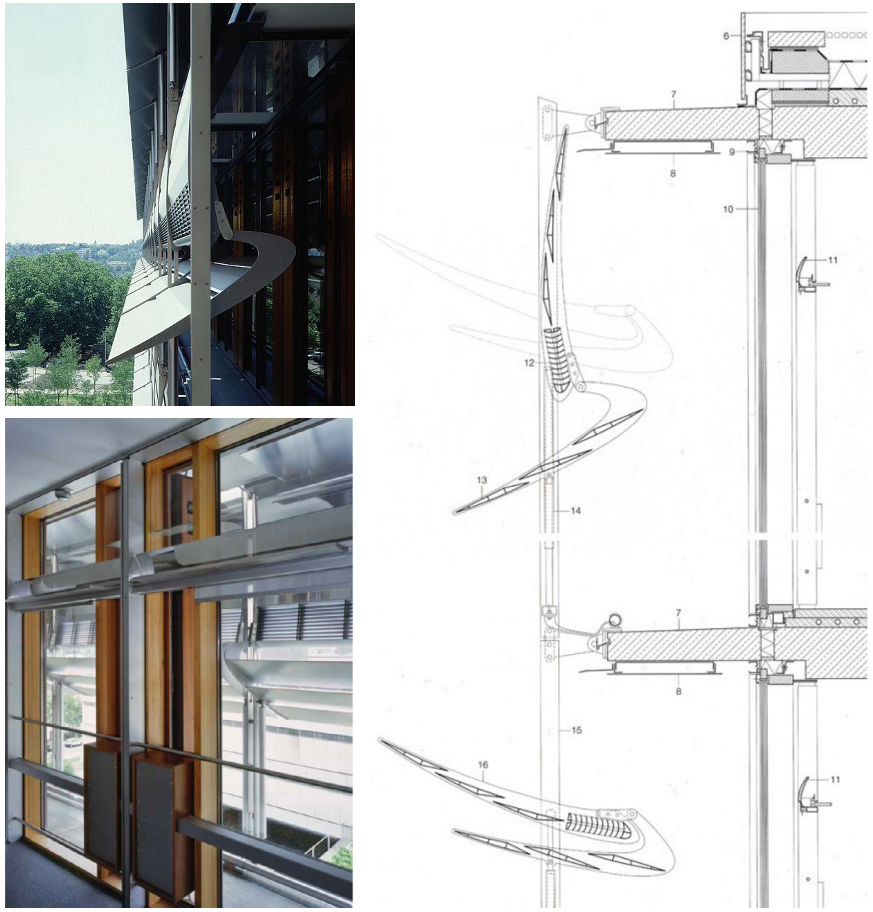
Una estrategia efectiva para optimizar la iluminación natural es incorporar elementos arquitectónicos de reflexión y de sombreamiento desde las primeras fases de diseño. Los elementos reflectantes ayudan a rebotar y difundir la luz natural más profundamente en los espacios, disminuyendo las zonas de sombra y atenuando contrastes. Por ejemplo, interiores acabados en colores claros (techos y paredes de alto coeficiente de reflexión) permiten que la luz que entra por las ventanas llegue más lejos en la estancia y se distribuya de forma más uniforme, reduciendo el deslumbramiento y las sombras pronunciadas[3]. En orden de importancia, las superficies más influyentes para reflejar la luz son: el techo (idealmente con el mayor factor de reflexión posible), la pared opuesta a la ventana, las paredes laterales, el suelo y el mobiliario. Un techo claro y elevado actúa casi como un "espejo difusor" que extiende la claridad natural.

Por otro lado, los dispositivos de sombreamiento solar son indispensables para modular la entrada de radiación directa y evitar ganancias térmicas excesivas. Existen múltiples soluciones: aleros fijos, voladizos, brise-soleil, lamas horizontales o verticales, persianas, toldos, pantallas móviles, etc. Estos elementos, bien diseñados, bloquean el sol alto de verano y permiten en cambio la entrada del sol bajo de invierno, contribuyendo también al confort térmico estacional. Un alero horizontal dimensionado correctamente puede eliminar la incidencia directa del sol veraniego sobre una ventana y, si su cara inferior es reflectante (pintada de blanco), servirá a la vez para rebotar luz difusa hacia el interior.

Otra solución eficaz son los estantes de luz (light shelves), que son repisas reflectantes ubicadas en la parte superior de las ventanas: reflejan la luz solar hacia el techo y la difunden en el fondo de la habitación, a la vez que dan sombra en la zona cercana a la ventana, reduciendo el deslumbramiento. Estas estrategias combinadas (sombra + reflexión) permiten aprovechar la luz natural manteniendo el confort visual y térmico. Cabe mencionar que actualmente se dispone incluso de vidrios especiales (selectivos, tintados) que pueden ayudar a filtrar parte de la radiación solar perjudicial; sin embargo, confiar únicamente en vidrios reflectantes o de control solar sin elementos de sombra puede no ser suficiente para evitar problemas de confort. Por eso, se recomienda integrar sistemas pasivos externos (parasoles, lamas) en la fachada antes que depender exclusivamente de vidrios de control, ya que los primeros bloquean el sol antes de que penetre al edificio. En resumen, un diseño óptimo de iluminación natural combinará ventanas bien ubicadas y proporcionadas, superficies internas reflectantes, y sistemas de sombreamiento móviles o fijos que modulen la luz solar directa. (Sombreamientos orientables y reflectantes en Wiesbaden. Arq. Thomas Herzog)[4].

[3] https://mandua.com.py/estrategias-de-iluminaci-n-luz-natural-n607

[4] https://www.filt3rs.net/case/big-louvers-light-reflector-wiesbaden-thomas-herzog-047



Sombreamientos orientables y reflectantes en Wiesbaden. Arq. Thomas Herzog

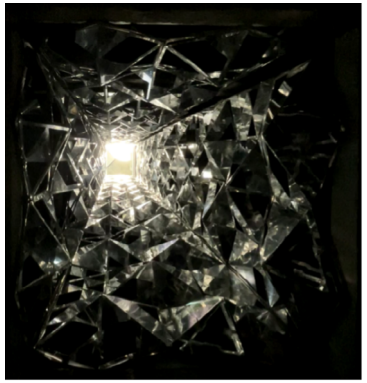
5.1.3. Ahorro por iluminación natural: comparación entre residencial y terciario

El potencial de ahorro energético por aprovechamiento de luz natural varía sustancialmente según el tipo de edificio y su uso. En edificios terciarios (oficinas, educativos, sanitarios, comerciales, etc.), la iluminación artificial suele representar una porción muy elevada del consumo eléctrico, por lo que aumentar la iluminación natural útil tiene un impacto directo notable en reducir dicha demanda. Por ejemplo, en oficinas la iluminación puede llegar a ser el mayor consumo eléctrico individual, en torno al 50% del total. También en sectores como comercio y hostelería, tradicionalmente sobreiluminados, la iluminación alcanza porcentajes altos (15-70%

en comercios, 25-50% en hoteles)[5]. En cambio, en viviendas la iluminación supone un porcentaje menor (típicamente 10-15% del consumo eléctrico doméstico), dado que gran parte del uso residencial de luz artificial ocurre en horas nocturnas o al atardecer cuando la aportación solar ya no está disponible.

Esta diferencia implica que las estrategias de daylighting (diseño para luz diurna) ofrecen mayores ahorros absolutos en entornos terciarios: por ejemplo, en una oficina bien diseñada con abundante luz natural, los sensores crepusculares pueden atenuar o apagar la iluminación artificial durante gran parte de la jornada, ahorrando del orden de un 30-40% de la energía de iluminación sin menoscabo del confort visual. En viviendas, si bien la iluminación natural también es deseable por confort y salud, el impacto en la factura energética es más modesto – aunque no despreciable – ya que suele haber menos horas de luces encendidas en presencia de sol (salvo en espacios como cocinas u otras estancias que puedan requerir apoyo de luz artificial incluso de día). No obstante, en el contexto de rehabilitación energética en edificios residenciales, aprovechar la luz natural sí puede contribuir, por ejemplo, reduciendo la necesidad de encender luces en zonas comunes (escaleras, portales) durante el día mediante la instalación de claraboyas, tragaluces o ventanales adicionales en esas áreas.

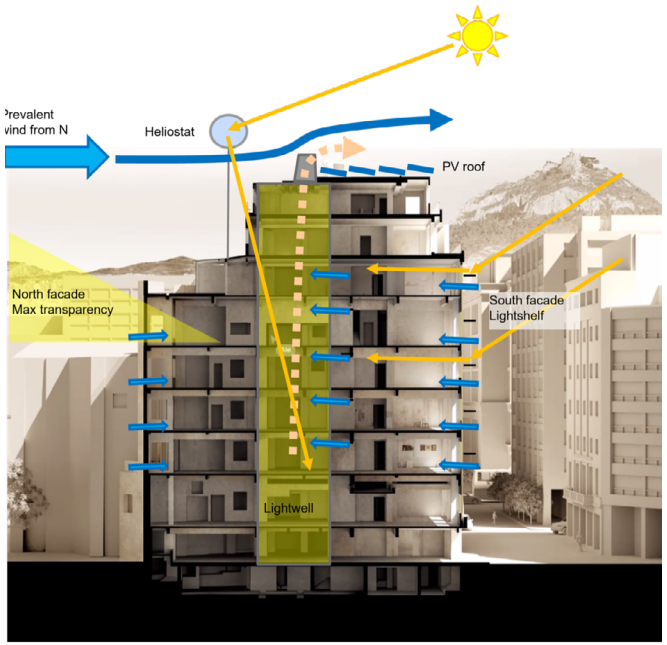
Ejemplo de iluminación natural en edificio de oficinas mediante el uso de un helióstato[6] y reflexión especular en patio interior – Transsolar





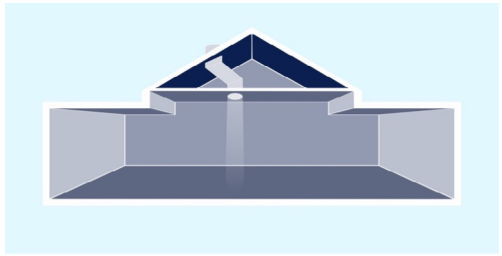
[5] https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2006/07/Guia-Tecnica-de-Iluminacion-Eficiente-Sector-Residencial-y-Terciario-fenercom-2006.pdf

[6] https://dle.rae.es/helióstato



Kaleidoskop-Pragmatismus, Christou Lada 3, Athens – Transsolar[7]

Sistemas comerciales basados en el mismo concepto de Kaleidoskop-Pragmatismus, pero mucho más sencillos, permiten captar la luz natural y reflejarla a través de espejos.[8]





Sistema comercial Solatube[9]

[7] https://transsolar.com/de/news/athen-christou-lada-kaleidoscope-pragmatism

[8] https://www.archdaily.cl/cl/895891/sistemas-para-incorporar-la-iluminacion-cenital-en-tus-proyectos

[9] https://www.solatube.es/tubo-solar-solatube-residencial/

Otra diferencia importante es la potencia instalada de iluminación: tradicionalmente los edificios terciarios tenían potencias instaladas mucho mayores (en W/m²) que una vivienda, para cumplir niveles de iluminación normativos más altos (por ejemplo, 500 lux en puestos de trabajo de oficina, frente a 100-300 lux deseables en salas de estar domésticas). Con la introducción de tecnología LED, esas potencias han bajado drásticamente en ambos casos, pero sigue habiendo una brecha: un edificio de oficinas puede tener del orden de 5–10 W/m² de potencia de iluminación instalada eficiente, mientras una vivienda quizá solo 2–3 W/m² (iluminación general). Esto significa que cada hora de luz natural aprovechada en oficinas desplaza más consumo que en viviendas. En cifras globales, un estudio de la Comunidad de Madrid señalaba que existe un gran potencial de ahorro: hasta la mitad de la energía destinada a iluminación en edificios podría ahorrarse utilizando luz natural, especialmente en tipologías como oficinas, escuelas, bibliotecas y museos. Además, la luz natural no solo ahorra en iluminación, sino que puede disminuir la carga de climatización: en verano, la luz del día produce menos calor que muchas lámparas encendidas (particularmente comparando con antiguas bombillas incandescentes o halógenas, que disipaban la mayor parte de su energía en forma de calor), y en invierno la entrada solar proporciona calentamiento pasivo útil[10]. Estos efectos colaterales refuerzan el beneficio neto en ahorro energético total del edificio.

Tabla 5.1 – Porcentaje aproximado de energía eléctrica dedicada a iluminación por tipo de edificio

Tipo de edificio	% Consumo eléctrico en iluminación
Oficinas	~50%
Hospitales	20–30%
Industria	~15%
Colegios	10–15%
Comercios	15–70%
Hoteles	25–50%
Residencial (hogares)	10–15%

Fuente: Guía Técnica de Iluminación Eficiente Fenercom (Comunidad de Madrid)

5.1.4. Herramientas de simulación para el análisis de iluminación natural

Para diseñar y evaluar correctamente la iluminación natural en un proyecto de rehabilitación, los arquitectos pueden apoyarse en diversos programas informáticos de simulación lumínica. Hoy en día se dispone de software gratuito y accesible que permite modelar un espacio arquitectónico y cuantificar parámetros como el factor de luz diurna (FLD), iluminancias interiores, riesgo de deslumbramiento, etc., bajo distintas condiciones de cielo.

Algunas de las herramientas más utilizadas son:

- **DIALux Evo:** software líder mundial en cálculo de iluminación, que permite planificar la iluminación de interiores y exteriores de forma profesional[11]. Aunque DIALux es conocido por el cálculo de iluminación artificial con catálogos de fabricantes, también incorpora módulos para luz natural, pudiendo evaluar el aporte de iluminación diurna en un modelo 3D. Es gratuito, está disponible en múltiples idiomas, y cuenta con el respaldo de la comunidad y de los principales fabricantes de luminarias que suministran sus datos fotométricos para la herramienta.

- **Relux Desktop:** alternativa similar a DIALux, también gratuita. Es una aplicación potente e intuitiva para la simulación tanto de luz artificial como de luz diurna, permitiendo planificar la iluminación de habitaciones individuales, edificios completos e incluso espacios exteriores[12]. Relux dispone igualmente de bibliotecas de luminarias y materiales, y resulta útil para estudiar cómo la luz natural aporta iluminancia en determinados espacios a lo largo del día.

- **VELUX Daylight Visualizer:** herramienta especializada enfocada 100% al análisis de iluminación natural. Es un software gratuito desarrollado por el fabricante de ventanas VELUX, que ofrece simulación mediante trazado de rayos y genera visualizaciones fotorrealistas y en falso color de los niveles de luz diurna en el interior de un edificio. Permite calcular con precisión distribuciones de iluminancia y factor de luz diurna en el proyecto digital, e incluso evaluar el deslumbramiento mediante imágenes de luminancia . El Daylight Visualizer cumple con la normativa europea EN 17037 de iluminación natural y facilita a los diseñadores la toma de decisiones fundamentadas sobre aperturas, reflectancias y sistemas de sombreado en etapas tempranas del diseño[13].

- **Rhino + ClimateStudio** (u otras herramientas basadas en Radiance): En entornos académicos y profesionales de alto nivel, se utilizan plugins de simulación ambiental para software 3D. Un ejemplo destacado es ClimateStudio (de Solemma) integrado en Rhinoceros/Grasshopper, que realiza simulaciones dinámicas de luz diurna (climate-based metrics) aprovechando el motor Radiance. Con estas herramientas es posible calcular métricas avanzadas como la Autonomía de Luz Diurna (DA), Iluminancia Útil Daylight UDI, índices de deslumbramiento (DGP, UGR) a lo largo del año, optimizando diseños complejos.

[10] https://mandua.com.py/estrategias-de-iluminaci-n-luz-natural-n607

[11] https://www.ledvance.es/profesional/servicios/dialux-y-relux

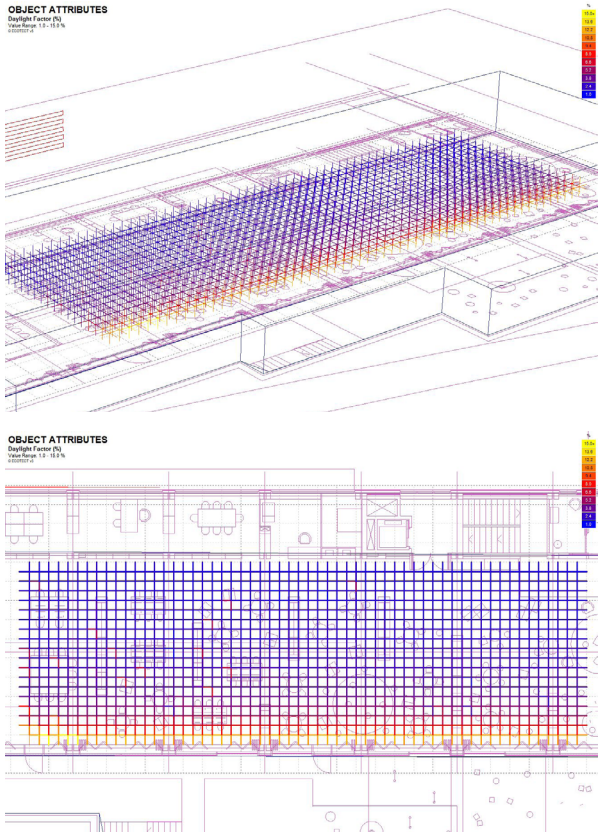
[12] https://relux.com/lighting-planning/reluxdesktop

[13] https://commercial.velux.com/inspiration/daylight-visualizer

Si bien Rhino y ClimateStudio no son gratuitos (son herramientas comerciales), muchos despachos de arquitectura los emplean para estudios detallados de iluminación natural en fases de diseño de rehabilitaciones ambiciosas.

- **Otros:** Por ejemplo, algunas suites BIM (AutoDesk Revit, SketchUp con plugins como LightStanza, etc.) permiten evaluaciones preliminares.

Cabe señalar que gran parte de estos programas permiten cumplir criterios de certificación y normativa: por ejemplo, algunos calculan indicadores requeridos en sellos ambientales (LEED, BREEAM o VERDE) referentes a iluminación natural. En el caso de la certificación española VERDE (GBCe), se contempla un criterio de Iluminación natural (AI03) que puede ser evaluado mediante simulación (ver sección 5.1.6), y herramientas como las mencionadas facilitan obtener los valores necesarios.[14]



Análisis iluminación natural con AutoDesk Ecotect 2011 espacio biblioteca municipal los mil soles – Madrid. A. Bosqued para madc arquitectos.

[14] https://gbce.es/wp-content/uploads/2024/07/guia_verde_edificios_2022-v03.pdf

5.1.5. Exigencias normativas: CTE DB-HE3 e iniciativas europeas en iluminación

En España, la normativa principal que rige la eficiencia de las instalaciones de iluminación interior es el Código Técnico de la Edificación, Documento Básico HE3: Eficiencia Energética de las Instalaciones de Iluminación[15]. El DB-HE3 establece requisitos obligatorios tanto para edificios de nueva planta como para ciertas intervenciones en existentes (rehabilitaciones), excepto edificios de uso residencial privado, con el objetivo de garantizar un nivel adecuado de iluminación para los usuarios minimizando el consumo energético. La versión más reciente de este documento (actualizado en 2019, con correcciones hasta 2021) introdujo medidas más estrictas y explícitas de ahorro.

Entre las exigencias cuantitativas del CTE DB-HE3 destacan:

- **Valor de Eficiencia Energética de la Instalación (VEEI):** Es un indicador que relaciona la potencia instalada en un espacio por unidad de iluminancia (W/m² por 100 lux). El CTE fija un VEEI límite para cada tipo de recinto o uso (por ejemplo, oficinas, aulas, comercios, etc.), de modo que la instalación de iluminación de ese espacio no debe exceder cierto consumo por nivel de iluminación suministrado. En términos simples, obliga a usar luminarias eficientes y bien diseñadas. Estos valores límite de VEEI aparecen en la tabla 3.1-HE3 del documento[16]. Supone un avance respecto a normativas previas que solo limitaban potencias, ya que el VEEI tiene en cuenta también la iluminación obtenida (ej.: luminarias con ópticas eficientes permiten cumplir un VEEI menor con la misma potencia).

- **Potencia máxima instalada por superficie:** Adicionalmente, se impone un techo absoluto a la potencia de iluminación por metro cuadrado para cada espacio según su uso (tabla 3.2-HE3). Por ejemplo, un comercio podrá tener hasta X W/m² y una oficina hasta Y W/m², independientemente de cuánta luz den; esto evita sobredimensionamientos. Las reformas o ampliaciones deben adecuarse a estos límites actuales, que con la adopción masiva de LED se han vuelto bastante exigentes (valores sustancialmente menores a los de hace una década con fluorescentes).

- **Sistemas de control y regulación obligatorios:** El DB-HE3 exige incorporar sistemas de control de encendido y regulación en las instalaciones de iluminación, orientados a ajustar el uso de luz artificial según la ocupación real y el aporte de luz natural. En concreto, para cada zona del edificio se requiere:
  - Un sistema de encendido/apagado manual (interruptores sectorizados, accesibles al usuario, independientes por zonas).

[15] https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html

[16] Ejemplo práctico de uso de la tabla - https://www.certificadosenergeticos.com/iluminacion-eficiencia-energetica-cte-db-he3

- Un sistema de encendido programado por horarios (control centralizado que apague luces automáticamente fuera de horas de uso establecidas).
- Adicionalmente, en zonas de uso esporádico, se puede sustituir lo anterior por detectores de presencia con temporización o interruptores de tipo temporizador.

- **Sistemas de aprovechamiento de luz natural:** Otra novedad importante es la obligación de instalar sistemas de regulación por luz natural (daylight harvesting) en ciertos supuestos. El DB-HE3 indica que cuando una zona dispone de suficiente luz natural (según una fórmula que relaciona el área acristalada con el área del local, T(Aw/A) > 0,11), las luminarias cercanas a ventanas o bajo tragaluces (dentro de los primeros 5 m desde la ventana) deben incorporar control automático que regule su flujo en función de la luz diurna disponible. Además detalla condiciones geométricas (ángulo de visión de cielo > 65°, patios descubiertos amplios, etc.) bajo las cuales esta exigencia aplica . En suma, en espacios bien iluminados naturalmente, las luces artificiales próximas a las aperturas deben regularse (dimmerizarse) automáticamente para mantener un nivel constante combinado y ahorrar energía.

- **Otras disposiciones:** El DB-HE3 también requiere incluir en proyecto un plan de mantenimiento de la instalación (limpieza de luminarias, reposición de lámparas, etc.), y excluye del ámbito algunas situaciones (viviendas particulares – que se regulan menos –, edificios históricos si se altera su estética, alumbrado de emergencia, etc.). No obstante, es importante notar que las zonas comunes de edificios residenciales sí están sujetas al HE3 en rehabilitación (por ejemplo, alumbrado de garajes, escaleras, portales, deberá cumplir eficiencia, detectores, etc., en edificios >1000 m² que renueven >25% de la superficie iluminada).

En paralelo a la normativa nacional, a nivel europeo existen estándares e iniciativas relevantes:

- **La Directiva 2010/31/UE (EPBD)** y sus actualizaciones fomentan la eficiencia energética global de los edificios, lo que incluye la iluminación. Si bien no dicta valores de iluminación puntuales, sí impulsa que los Estados miembros integren medidas como el aprovechamiento de la luz natural y sistemas de control en sus códigos (de ahí derivan las exigencias antes mencionadas en el CTE, adaptando las recomendaciones europeas).

- **La nueva Directiva 2024/1275/UE (EPBD)** refuerza este enfoque al considerar expresamente la iluminación integrada como parte de las "instalaciones técnicas del edificio" y vincular su rendimiento al cálculo de la eficiencia energética global. Además de insistir en el diseño que favorece la luz natural, introduce la obligación de incorporar sistemas automáticos de control de la iluminación en grandes edificios no residenciales (con detección de presencia y gestión por zonas) siempre que sea técnica y económicamente viable. Esto abre la puerta a futuras revisiones del CTE que no solo limiten la potencia instalada y el rendimiento de las luminarias, sino que también generalicen la automatización y la gestión inteligente de la iluminación como requisito normativo.

- **La normativa UNE-EN 12464-1:2011 (actualizada en 2022)** es la norma europea de Iluminación en lugares de trabajo interiores. No es obligatoria por sí misma salvo que se la cite en contratos o regulaciones, pero sirve de referencia técnica. Establece, para cada tipo de tarea o espacio, los niveles de iluminancia media mantenida recomendados (lux), la uniformidad mínima, el índice máximo de deslumbramiento unificado UGR y el índice mínimo de reproducción cromática Ra (CRI) adecuados. Por ejemplo, para una oficina se recomienda 500 lux en mesas, UGR < 19, CRI >= 80[17]. Estas orientaciones complementan al CTE: el DB-HE3 pide eficiencia, pero también debemos asegurar que se alcanzan los niveles lumínicos y confort visual sugeridos por EN 12464. En rehabilitación, el diseñador debe verificar que al mejorar eficiencia no se sacrifica la calidad luminotécnica (p.ej., no bajar tanto la potencia que ya no se logren los lux requeridos). En la práctica, cumplir con EN 12464-1 es sinónimo de buena iluminación interior, por lo que es un marco de referencia indispensable, que son los criterios que contempla VERDE.

- **En cuanto a iluminación natural**, la norma UNE-EN 17037:2018 introduce por primera vez criterios europeístas para la aportación de luz diurna en edificios (establece umbrales de iluminancia de referencia – p. ej. 300 lux en mitad del espacio durante al menos el 50% del tiempo diurno – para calificar un espacio con suficiente luz natural, así como criterios de vista al exterior, control de deslumbramiento y exposición a luz solar directa). Algunos países ya incorporan exigencias de luz natural en sus reglamentos basadas en EN 17037 (por ejemplo, Francia en su normativa RE2020 exige que en viviendas un porcentaje de estancias tenga al menos 300 lux durante la mitad del día[18]). En España, el CTE aún no fija mínimos de iluminación natural en viviendas u otros locales (más allá del requisito cualitativo de que "deben tener iluminación natural suficiente" en espacios habitables, según el DB-HS3), pero es posible que en futuras revisiones se tomen en cuenta estas directrices europeas que el arquitecto deberá considerar.

[17] Caso práctico - https://grlum.dpe.upc.edu/manual/disenoProyecto-requisitosDiseno.php

[18] https://observatorio2030.com/sites/default/files/2024-09/Iluminaci%C3%B3n%20natural%20en%20edificios.pdf

5.1.6. Iluminación natural, salubridad y bienestar: impacto en salud y criterios GBCe VERDE

Más allá del ahorro energético, la iluminación natural tiene una profunda repercusión en la salud, la comodidad y la calidad de vida de las personas. Los seres humanos somos seres diurnos, regulados por ciclos circadianos que dependen en gran medida de la exposición a la luz solar[19]. Numerosos estudios científicos han evidenciado que una exposición adecuada a luz natural está asociada con beneficios fisiológicos y psicológicos, mientras que pasar largos periodos en entornos con iluminación insuficiente o exclusivamente artificial puede provocar efectos negativos.

Algunos hallazgos clave sobre la importancia de la luz natural para la salubridad:

- La luz del día ayuda a sincronizar el reloj biológico. La falta de exposición a luz diurna (por ejemplo, trabajar en espacios sin ventanas) altera los ritmos hormonales, afectando al sueño y al bienestar general. Personas que pasan la mayor parte del día en habitaciones sin luz natural tienden a dormir peor y reportan peor salud física y mental que aquellas que trabajan con ventanas y vistas al exterior. Incluso un estudio clásico mostró que escolares en aulas sin luz diurna tenían patrones hormonales alterados que impactaban negativamente su crecimiento y aumentaban las ausencias por enfermedad[20].

- La iluminación natural adecuada mejora el estado de ánimo y reduce el estrés. La privación de luz diurna se ha relacionado con mayores índices de depresión estacional (especialmente en climas o estaciones con días cortos). Dos de los grandes males modernos – el estrés crónico y la depresión – se ven agravados por entornos pobres en luz natural. Por el contrario, entornos bien iluminados naturalmente tienden a elevar el ánimo. Por ejemplo, trabajadores de oficina sin ventanas se sienten menos felices y más estresados que sus colegas en espacios con abundante luz natural. Asimismo, en hospitales se ha observado que pacientes con habitaciones soleadas (orientadas al sureste, recibiendo luz de mañana) se recuperan más rápido que aquellos en habitaciones orientadas a norte.

- La luz solar contribuye a la producción de vitamina D en el organismo (a través de la piel, con la fracción UVB; si bien los cristales comunes bloquean UVB, la presencia de sol en espacios habitables incentiva a las personas a acercarse al exterior). Una buena vitamina D es esencial para la salud ósea e inmunológica. Además, la luz del sol en interiores puede tener un efecto germicida: un estudio publicado en Microbiome encontró que en habitaciones expuestas a luz solar se redujo aproximadamente a la mitad la cantidad de bacterias vivas en el polvo ambiental, en comparación con habitaciones mantenidas en oscuridad[21].

  En concreto, en las salas con luz de día directa sólo ~6.8% de las bacterias del polvo eran viables, versus ~12% en salas oscuras. Esto sugiere que la radiación solar que entra por las ventanas ayuda a eliminar microorganismos potencialmente patógenos y a mantener un ambiente más saludable (menos humedad, menor proliferación de hongos y bacterias). Si bien la porción de UV en la luz natural es reducida tras atravesar el vidrio, parece suficiente para influir en el microbioma del polvo doméstico, haciéndolo más parecido al del aire libre y reduciendo presencia de bacterias asociadas a enfermedades respiratorias[22]. Este hallazgo reviste especial importancia en lugares como hospitales, guarderías o viviendas, apoyando la noción tradicional de que "donde entra el sol, no entra el doctor".

- Mejora de la función cognitiva y productividad. En oficinas y entornos educativos se ha comprobado que la luz natural favorece la concentración y el rendimiento. Empleados que trabajan cerca de ventanas con luz diurna reportan menor fatiga visual, mayor productividad (se cita incluso mejoras superiores al 60% en algunos estudios) y mayor satisfacción laboral[23]. De igual forma, estudiantes en aulas bien iluminadas naturalmente obtienen mejores resultados académicos y presentan menor incidencia de síntomas de fatiga o somnolencia diurna. La explicación radica tanto en aspectos biológicos (ritmo circadiano, luz azul matutina que activa el estado de alerta) como en factores psicológicos (un ambiente luminoso y con vistas reduce la monotonía y estimula positivamente).

En vista de estos beneficios, las certificaciones ambientales modernas otorgan un peso importante a la calidad de la iluminación natural y artificial en interiores, no sólo por eficiencia energética sino por bienestar de los ocupantes. En la certificación VERDE del Green Building Council España (GBCe), por ejemplo, existe la categoría de Estrategias Sociales que incluye criterios específicos de iluminación: el criterio ES 02.01 Condiciones de iluminación natural y ES 02.03 Niveles, distribución y calidad de la iluminación artificial evalúan el proyecto en función de la disponibilidad de luz diurna adecuada y la calidad de la luz artificial, respectivamente. La Guía de evaluación VERDE[24] define objetivos como "garantizar una buena iluminación tanto natural como artificial" en los espacios interiores, reconociendo su impacto en la salud y confort de los usuarios. Un edificio rehabilitado con altos niveles de luz natural, control de deslumbramiento y vistas al exterior obtendrá puntuaciones elevadas en estos apartados, ya que contribuye a un ambiente interior saludable. Asimismo, otros sellos internacionales (LEED, WELL) otorgan créditos por luz natural, vistas y control circadiano de la iluminación.

[19] https://silestoneinstitute.com/la-luz-una-fuente-de-salud-y-bienestar/

[20] Ibid

[21] https://www.infosalus.com/salud-investigacion/noticia-dejar-entrar-luz-sol-puede-matar-bacterias-vivenpolvo-20181018081131.html

[22] https://www.archdaily.cl/cl/954981/limpiando-los-espacios-con-luz-radiacion-ultravioleta-para-matar-virus-y-bacterias

[23] https://www.inmocolonial.com/blog/asi-influye-la-iluminacion-natural-bienestar-la-productividad-de-personas

[24] https://gbce.es/documentos/verde2030/Guia-VERDE-Edificios-2030-v01.pdf

5.2. TECNOLOGÍA LED Y SISTEMAS DE CONTROL

5.2.1. Ventajas de la tecnología LED en iluminación y sustitución de luminarias obsoletas

La introducción de la tecnología LED (diodos emisores de luz) ha supuesto una auténtica revolución en el campo de la iluminación eficiente. Las lámparas y luminarias LED presentan numerosas ventajas frente a las tecnologías tradicionales (incandescentes, halógenas e incluso fluorescentes), lo que las hace pilares fundamentales en cualquier proyecto de rehabilitación energética:

- **Bajo consumo energético:** Los LED convierten gran parte de la energía eléctrica en luz visible, y muy poca en calor, alcanzando eficacias luminosas típicamente en el rango de 100–150 lúmenes/ vatio (o superiores en modelos punteros). En comparación, una bombilla incandescente clásica apenas daba 10–15 lm/W (el 95% de la energía se perdía en calor)[25]. Esto se traduce en que un LED consume un 80% menos de electricidad que una incandescente para dar el mismo nivel de iluminación[26]. Incluso frente a fluorescentes compactas (CFL), los LED ahorran alrededor de un 20-30%. En términos prácticos, una bombilla LED de ~8 W puede reemplazar a una incandescente de 60 W produciendo flujo luminoso similar, o un tubo LED de 18 W puede dar la misma luz que un tubo fluorescente de 36 W. Este enorme ahorro por unidad hace que cambiar todas las luminarias antiguas por LED reduzca drásticamente el consumo: se estima que simplemente sustituyendo iluminación convencional por LED en un edificio, la factura de iluminación puede bajar del orden de un 50–80% (el rango depende de qué porcentaje ya era fluorescente de bajo consumo vs incandescente). En viviendas, los LED pueden recortar hasta un ~90% el consumo de cada punto de luz respecto a una bombilla vieja[27]. En oficinas y terciario, además del ahorro porcentual, la menor emisión de calor de los LED alivia la carga de aire acondicionado en verano.

- **Larguísima vida útil:** Las lámparas LED tienen vidas útiles muy superiores a las de tecnologías previas. Una bombilla incandescente duraba en promedio solo ~1.000 horas, una fluorescente compacta unas 8.000–10.000 horas; en cambio una LED de buena calidad puede durar 25.000, 50.000 horas o más. En condiciones ideales se citan incluso hasta 100.000 horas para algunos LED, aunque en la práctica comercial ~25.000 horas es común (equivalente a casi 15 años a 4.5 horas diarias). Esto significa menos frecuencia de recambios, menos costo de mantenimiento y menos residuos generados. Para edificios de uso intensivo, alargar el ciclo de reposición de lámparas es muy valioso: por ejemplo, en un parking o un edificio de oficinas 24h, cambiar tubos fluorescentes cada 2 años era costoso, mientras que los LED instalados pueden durar fácilmente 10 años operando continuamente. También mantienen mejor su flujo en el tiempo (sufren degradación gradual pero sin apagón repentino).

- **Robustez y calidad de luz:** Los LED son dispositivos de estado sólido, más resistentes a golpes y encendidos frecuentes que las lámparas de filamento o descarga. No contienen mercurio ni gases tóxicos (a diferencia de los fluorescentes), por lo que son más seguros ambientalmente y al final de su vida (no requieren gestionarlos como residuo peligroso). Además ofrecen flexibilidad de diseño: existen LED de todo tipo de formas, tamaños y temperaturas de color, permitiendo luminarias muy variadas (desde tiras flexibles, paneles planos, focos miniatura, etc., donde antes las "bombillas" tenían formatos limitados)[28]. La luz LED hoy día alcanza altos índices de reproducción cromática (CRI 80-95 sin problema), equiparables o mejores que los fluorescentes típicos, y vienen en gamas de color cálido, neutro o frío según se necesite. Su encendido es instantáneo al 100% de intensidad, sin parpadeos ni tiempos de calentamiento, lo que mejora la experiencia de usuario frente a algunas CFL antiguas. Y muchos modelos son regulables en intensidad (dimmable) y compatibles con sistemas de control modernos, integrándose bien en esquemas de iluminación inteligente.

Dadas estas ventajas, es prioritario en rehabilitación sustituir luminarias antiguas por tecnología LED. Esta suele ser una de las medidas con mejor relación beneficio/costo en ahorro energético: por un coste relativamente bajo por luminaria, se obtiene un gran ahorro anual. Por ejemplo, reemplazar todas las lámparas incandescentes o halógenas de un edificio residencial por LED puede suponer ahorros del orden de cientos de euros al año en la factura eléctrica de la comunidad, con amortizaciones típicas inferiores a 2 años. En edificios terciarios, donde la iluminación opera muchas horas, el cambio a LED se amortiza aún más rápido, a veces <1 año con los ahorros obtenidos. Además, la Unión Europea ha impulsado decididamente la sustitución prohibiendo progresivamente las lámparas ineficientes (ver sección 5.2.2), por lo que en muchos casos ni siquiera es opcional: hay que retirar fluorescentes y halógenos obsoletos por imperativo legal y ecológico.

Al actualizar luminarias conviene también rediseñar la iluminación si es necesario, no limitarse al "uno por uno". Es decir, aprovechar la versatilidad LED para optimizar: tal vez reducir el número de puntos de uz si antes había exceso, o redistribuirlos para lograr mejor uniformidad con menos consumo. Por ejemplo, al cambiar tubos fluorescentes por módulos lineales LED, quizá con dos tercios del número de luminarias se obtiene igual iluminación. También se pueden incorporar ópticas o difusores que antes no eran viables, mejorando el confort visual (menor deslumbramiento). En definitiva, la estrategia ganadora en rehabilitación es "LEDificar" toda la instalación lumínica, consiguiendo inmediatamente ahorros de 50-80% en consumo de luz y preparando el edificio para futuras integraciones de control inteligente.

[25] https://www.poetichouses.com/enfoques/sostenibilidad/

[26] https://energysavingtrust.org.uk/advice/lighting/?utm_source=chatgpt.com

[27] https://www.barmet.es/blog/iluminacion-led/cuanto-se-ahorra-cambiando-iluminacion/

[28] https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/estas-son-las-ventajas-de-las-bombillas-led-o-de-bajo-consumo-para-ahorrar-luz/

5.2.2. Normativa europea y española: prohibición de lámparas ineficientes

La transición hacia tecnología eficiente en iluminación no ha sido solo voluntaria, sino también impulsada por la normativa mediante la prohibición gradual de las lámparas más ineficientes. En la Unión Europea se han dictado regulaciones (en el marco de las directivas de Ecodiseño y RoHS) que retiraron del mercado las bombillas tradicionales:

- **Incandescentes:** Las bombillas de filamento de toda la vida fueron las primeras en ser eliminadas. Desde 2009 la UE, a través del Reglamento EC 244/2009 y subsiguientes, estableció un calendario de retirada por potencias. Para 2012 prácticamente todas las bombillas incandescentes generales de consumo estaban prohibidas en venta. Esto fue un hito que obligó a migrar masivamente a bombillas de bajo consumo (CFL) primero y luego LED. España adoptó estas medidas simultáneamente, retirando incandescentes de 100W, 75W, etc., hasta las de 40W y 25W en etapas finales.

- **Halógenas:** Las lámparas halógenas, que eran una versión "mejorada" de incandescente (ahorran ~30% respecto a incandescente estándar, pero seguían siendo muy poco eficientes comparadas con LED), también fueron objeto de prohibición. Inicialmente la UE fijó 2016 como fecha para eliminar muchas halógenas domésticas, aunque hubo una prórroga hasta 2018 para ciertas bases. Finalmente, desde el 1 de septiembre de 2018 está prohibida la venta de bombillas halógenas no eficientes en la UE[29]. Esto incluyó las típicas halógenas de rosca E27/E14 (sustitutas de incandescente) y algunas lámparas direccionales. Se permitió agotar stocks, pero no fabricar o importar más. Posteriormente, en 2023 se amplió la restricción a los pequeños modelos halógenos especiales: desde el 1 de septiembre de 2023 tampoco se pueden comercializar en la UE las cápsulas halógenas de tipo G9, G4, GY6.35, muy usadas en apliques y lámparas decorativas[30]. Con ello, prácticamente toda tecnología halógena de uso general está eliminada del mercado europeo.

- **Fluorescentes y CFL:** Las lámparas fluorescentes, a pesar de su eficiencia moderada, contienen mercurio y han sido superadas por LED en desempeño, por lo que también enfrentan veto regulatorio. La Directiva RoHS (2011/65/UE) restringe sustancias peligrosas como el mercurio; hasta hace poco las lámparas fluorescentes tenían exenciones. En 2022 la Comisión Europea decidió suprimir esas exenciones, implicando el fin de estas lámparas. El resultado es que a partir de agosto de 2023 quedó prohibida la venta en la UE de tubos fluorescentes lineales T5 y T8, así como desde febrero de 2023 las fluorescentes compactas con pin (CFLni) y circulares. Es decir, en fecha muy reciente se ha dado el adiós definitivo a los clásicos tubos fluorescentes de oficinas y a muchas "bombillas de bajo consumo" CFL. A partir del 25 de agosto de 2023, ningún tubo T8/ T5 puede introducirse en el mercado europeo[31]. Solo se han dejado algunas excepciones temporales para usos muy específicos (iluminación de espectáculos, lámparas UV, etc.). En España esto entra dentro del Real Decreto 219/2013 que implementa RoHS, por lo que también es de obligado cumplimiento. En paralelo, el Reglamento (UE) 2019/2020 de Ecodiseño impide desde septiembre 2021 comercializar fuentes de luz que no alcancen ciertas eficiencias mínimas, lo cual de facto eliminó las lámparas fluorescentes de bajo rendimiento que quedaran.

5.2.3. Criterio para el diseño y selección de luminarias eficientes

Una vez adoptada la tecnología LED, es crucial diseñar correctamente la instalación de iluminación y elegir las luminarias de forma óptima, para maximizar tanto el ahorro energético como el confort visual.

A continuación, se enumeran criterios técnicos de diseño y selección que deben considerarse en rehabilitación lumínica:

- **Eficacia luminosa y eficiencia energética:** Como primer paso, seleccionar equipos con alta eficacia (lm/W). Las luminarias LED modernas suelen ofrecer >120 lm/W fácilmente, pero varía según calidad. Conviene comparar las etiquetas energéticas o fichas técnicas: tras la reclasificación de la UE en 2021, prácticamente sólo las LED muy eficientes logran clase A o B en la nueva escala (la mayoría están en C o D pese a ser eficientes, debido a la escala exigente). En cualquier caso, se deben elegir luminarias con drivers electrónicos de alta eficiencia y minimizar consumos parasitos (evitar balastos poco eficientes en fluorescentes si aún se usaran en casos puntuales, etc.). Un buen diseño también evita sobreiluminar: se dimensionará la iluminación para los niveles recomendados (EN 12464-1) sin excederlos mucho, ya que toda sobreiluminación es despilfarro. Los cálculos con software permiten afinar el número de luminarias necesarias. El CTE DBHE3, como vimos, impone límites de VEEI y W/m² que guían esta selección (asegurar el cumplimiento con suficiente margen si es posible).

- **Curva fotométrica y distribución de la luz:** No basta con que la luminaria sea eficiente en lm/ W, también debe dirigir la luz adecuadamente donde se necesita. Se deben emplear ópticas, difusores o reflectores que proporcionen la distribución deseada (ya sea amplia y uniforme para iluminación general, o concentrada para acento, etc.) con mínima pérdida. Aquí entra el concepto de rendimiento de la luminaria (relación entre lúmenes emitidos por la luminaria y lúmenes de la fuente), que idealmente es alto. Luminarias bien diseñadas pueden tener >90% de rendimiento (poca luz "atrapada" en la carcasa). En

[29] https://commission.europa.eu/news-and-media/news/new-lightbulb-rules-will-enable-household-energy-savings-and-help-reduce-greenhouse-gas-emissions-2018-08-31_en#:~:text=1%20min%20read-,New%20lightbulb%20rules%20will%20enable%20household%20energy%20savings%20and%20help,sold%20across%20the%20European%20Union.

[30] https://www.xal.com/en/services/know-how/ban-on-fluorescent-lamps

[31] https://www.watt24.com/en/guide/fluorescent-tubes-ban-2023-all-you-need-to-know/

rehabilitación, al sustituir luminarias viejas, se puede mejorar este aspecto: por ejemplo, luminarias LED directas/indirectas que iluminan techo y reducen sombras, o paneles LED con difusor microprismático que distribuyen de manera uniforme sin encandilar.

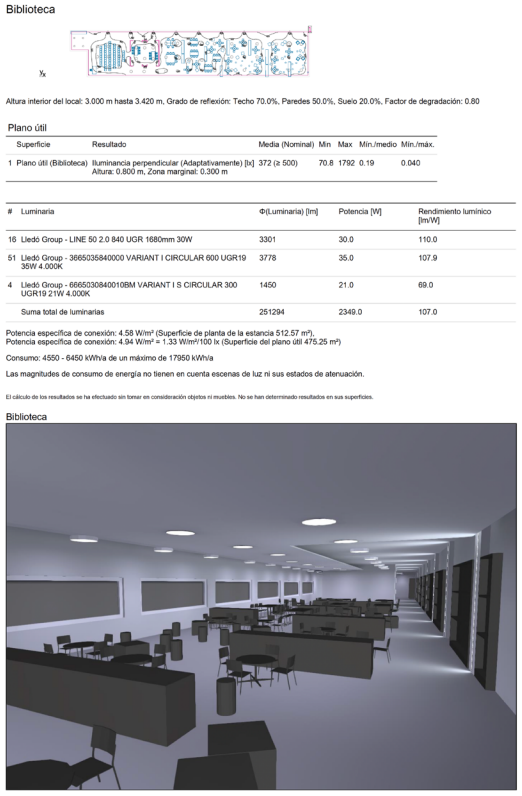
- **Control del deslumbramiento (UGR):** Un criterio vital es escoger luminarias que garanticen un bajo índice de deslumbramiento unificado (UGR) en las condiciones de instalación. El UGR depende tanto de la luminaria como de la geometría del espacio[32], pero los fabricantes suelen proporcionar un UGR<19 o <22 para oficinas, etc., en sus catálogos. Es importante que las luminarias tengan difusores opales, rejas antideslumbrantes, lentes especiales u otros sistemas para evitar puntos de luz muy brillantes a la vista. En espacios de trabajo, se recomienda UGR ≤ 19 para no fatigar la vista. Un error sería poner luminarias LED muy potentes pero con LEDs visibles que creen brillos molestos; sería mejor elegir unidades con ópticas bien diseñadas. Además, la propia configuración del alumbrado influye: conviene ubicar los artefactos fuera del campo visual directo cuando sea posible, o usar iluminación indirecta. El CTE no fija UGR explícito pero sí exige "iluminación adecuada a necesidades de los usuarios" – lo cual implica controlar el deslumbramiento.

- **Temperatura de color y calidad cromática:** En rehabilitación se ha de decidir la temperatura de color correlacionada (CCT) de la iluminación artificial, adaptada al uso y al ambiente buscado. Generalmente, se usan tonos blanco cálido (~2700–3000 K) en entornos residenciales para mayor confort hogareño, y blanco neutro o frío (4000–5000 K) en entornos de trabajo que requieren mayor activación y reproducción cromática fiel (por ejemplo, 4000 K es típico en oficinas). También hay tendencia a evitar blancos demasiado fríos (>5000 K) en interiores por la posible alteración de ritmos circadianos en la tarde/noche (la luz azul suprime melatonina). La reproducción cromática (CRI o Ra) también es importante: se recomienda CRI ≥ 80 para casi todos los usos interiores, y CRI ≥ 90 en zonas de exigencia alta (museos, tiendas de moda, áreas sanitarias de diagnóstico, etc.) . Los LED de hoy día suelen cumplir CRI 80 fácilmente; hay que verificarlo en la especificación. Seleccionar la tonalidad y CRI adecuados mejora tanto el confort visual como la funcionalidad del espacio.

- **Compatibilidad con sistemas de control (dimmable):** Dado que en rehabilitación se suele integrar control de presencia y de luz natural, es necesario que las luminarias/lamparás elegidas sean compatibles con regulación. Muchas lámparas LED retrofit baratas no lo son (no dimmable) y eso limitaría su uso en esquemas de ahorro. Mejor optar por luminarias con driver 1–10V o DALI que permitan atenuación suave. Igualmente, considerar la opción de luminarias con sensores integrados (hay downlights LED con sensor de movimiento incorporado, por ejemplo) para facilitar la instalación.

- **Fiabilidad y garantías**: Asegurar que los equipos sean de fabricantes reconocidos, con garantías amplias (mínimo 2-3 años, ideal 5 años en productos profesionales), pues en eficiencia energética interesa que realmente alcancen su vida útil proyectada. Verificar también factores como el factor de potencia (FP) de los drivers LED – se prefiere FP > 0.90 para no penalizar la instalación eléctrica – y el THD (distorsión armónica) bajo. En general, las luminarias de calidad tendrán estas características controladas.

- **Diseño y estética, integración arquitectónica**: Aunque sea un criterio no directamente energético, en rehabilitación muchas veces es posible mejorar la integración de la iluminación en la arquitectura. Por ejemplo, sustituyendo aparatos voluminosos por líneas LED empotradas discretas, se pueden iluminar espacios de forma más homogénea y con menor impacto visual, lo cual


Biblioteca

Altura interior del local: 3.000 m hasta 3.420 m, Grado de reflexión: Techo 70.0%, Paredes 50.0%, Suelo 20.0%, Factor de degradación: 0.80

Plano útil

	Superficie	Resultado	Media (Nominal)	Min	Max	Mín./medio	Mín./máx.
1	Plano útil (Biblioteca)	Iluminancia perpendicular (Adaptativamente) [lx] Altura: 0.800 m, Zona marginal: 0.300 m	372 (≥ 500)	70.8	1792	0.19	0.040

#	Luminaria	Φ(Luminaria) [lm]	Potencia [W]	Rendimiento lumínico [lm/W]
16	Lledó Group - LINE 50 2.0 840 UGR 1680mm 30W	3301	30.0	110.0
51	Lledó Group - 3665035840000 VARIANT I CIRCULAR 600 UGR19 35W 4.000K	3778	35.0	107.9
4	Lledó Group - 9665030840010BM VARIANT I S CIRCULAR 300 UGR19 21W 4.000K	1450	21.0	69.0
	Suma total de luminarias	251294	2349.0	107.0

Potencia específica de conexión: 4.58 W/m² (Superficie de planta de la estancia 512.57 m²).
Potencia específica de conexión: 4.94 W/m² = 1.33 W/m²/100 lx (Superficie del plano útil 475.25 m²)

Consumo: 4550 - 6450 kWh/a de un máximo de 17950 kWh/a

Las magnitudes de consumo de energía no tienen en cuenta escenas de luz ni sus estados de atenuación.

El cálculo de los resultados se ha efectuado sin tomar en consideración objetos ni muebles. No se han determinado resultados en sus superficies.

Biblioteca

Estudio iluminación artificial con DIALux de la biblioteca municipal los mil soles. Lledó para Úrculo ingenieros y madc arquitectos

[32] https://www.erco.com/es/planificacion-de-iluminacion/conocimientos-luminotecnicos/diseno-de-iluminacion/procedimiento-ugr-7488/

redunda en confort. Asimismo, aprovechar la capacidad de direccionamiento de algunas luminarias LED (spots orientables, etc.) para acentuar zonas sin añadir más potencia global. Un buen diseño lumínico es aquel donde la gente percibe un ambiente agradable y suficiente, sin notar las fuentes de luz ni ser molestada por ellas.

5.2.4. Software y recursos de diseño lumínico profesional

Al igual que en el caso de la iluminación natural (sección 5.1.4), para la iluminación artificial y el diseño integral de la iluminación interior existen potentes herramientas de software que asisten al proyectista. En rehabilitación energética, donde a menudo es necesario recalcular alumbrados para adaptarlos a LED u optimizar su control, es muy útil apoyarse en estos programas.

Los dos más difundidos en el mundo profesional son nuevamente Dialux y Relux (ya mencionados). Con Dialux evo se puede modelar toda la planta del edificio, colocar luminarias (seleccionándolas de catálogos reales de cientos de fabricantes) y obtener simulaciones de iluminancias, uniformidades y UGR en cada zona. Dialux realiza los cálculos conforme a las normativas (incluida EN 12464), generando reportes que sirven para justificar el cumplimiento de requisitos lumínicos y de eficiencia. Por su parte, Relux ofrece funcionalidades similares con una interfaz diferente; algunos profesionales prefieren uno u otro según costumbre. Ambos son gratuitos, lo que facilita su uso masivo.

Además de estos programas generalistas, muchos fabricantes líderes de iluminación aportan recursos específicos para ayudar en el diseño: - Signify (Philips Lighting) dispone de complementos ("plugins") para Dialux, Relux y otras plataformas que incluyen todos sus productos y facilitan encontrar y simular con sus luminarias[33]. Por ejemplo, el Philips Product Selector para Dialux permite cargar las curvas fotométricas y datos de sus lámparas rápidamente[34]. También ofrecen herramientas online para cálculo de iluminación básica, comparadores de productos, calculadoras de ahorro, etc.[35]. – Simon (fabricante español de material eléctrico e iluminación) y empresas como Trilux, Zumtobel, Thorn, ERCO, etc. suelen proporcionar software o plugins similares, así como bibliotecas BIM con sus luminarias para integrarlas en Revit u otros programas. Trilux, por ejemplo, tiene aplicaciones para conversión a LED (Trilux Simple ONE) y una plataforma online llamada Light Planning donde se pueden hacer predimensionados con sus equipos. - Existen herramientas especializadas de nicho: por ejemplo, Lutron Vive design tool para esquemas de control inalámbrico, o calculadores de retorno de inversión que algunos fabricantes/publicaciones brindan (ingresando costo de luminarias, horas de uso, tarifa eléctrica, comparan halógeno vs LED, etc., para mostrar ahorros). También están los configuradores de producto de empresas como Louis Poulsen, Iguzzini, etc., que ayudan a seleccionar ópticas, acabados, etc. aunque no son simuladores en sí mismos. - La plataforma Voltimum y otras webs del sector ofrecen documentación técnica, e incluso guías interactivas. Por ejemplo, Ledvance (Osram) tiene un centro de herramientas con un plugin LEDVANCE para Dialux que mantiene actualizada la base de datos de sus lámparas.

Por ejemplo, con Dialux se puede modelar un piso de oficinas existente con fluorescentes y luego con LED + sensores, para ilustrar que la VEEI mejora en X% y el consumo en kWh/m²año baja significativamente, facilitando también la justificación en certificados energéticos y subvenciones.

Adicionalmente, en la Guía Verde de GBCe o estándares WELL, se valora la realización de estudios lumínicos exhaustivos; el uso de estos programas ayuda a cumplir con esos créditos (demostrar que se tiene ≥300 lux de luz natural en cierto % del espacio, que la iluminancia artificial es ajustable por ocupante, etc.). Por todo ello, se recomienda integrar el diseño lumínico asistido por ordenador en cualquier rehabilitación energética que involucre renovación de iluminación.

5.2.5. Iluminación inteligente: sensores, control horario, detección de presencia y regulación

Una de las formas más efectivas de reducir el consumo de iluminación sin mermar el servicio es mediante la iluminación inteligente, es decir, dotar al sistema de alumbrado de automatismos que enciendan, apaguen o regulen las luces de acuerdo a las necesidades reales en cada momento. En la rehabilitación energética actual, casi se considera un requisito básico implementar algún nivel de control inteligente, dada su eficacia. Veamos las principales modalidades:

- **Sensores de presencia o movimiento:** Son detectores (infrarrojos pasivos, ultrasónicos, duales, etc.) que al captar la presencia de personas en una zona, encienden automáticamente la luz, y la apagan tras un período predefinido de no detectar movimiento. Se instalan comúnmente en pasillos, aseos, escaleras, trasteros y zonas de uso intermitente. Su ventaja es obvia: evitan que las luces queden encendidas en espacios vacíos. Según estudios de Lutron, los sensores de presencia logran ahorros de entre un 17% y 60% de la energía de iluminación, dependiendo del tipo de espacio y cómo se configuren los retardos de apagado. Por ejemplo, en oficinas individuales el ahorro puede ser ~20%, en baños públicos >50%. Adicionalmente, combinados con programación horaria (para evitar encendidos fuera de horas laborales) se puede sumar otro ~15% de ahorro. La desventaja potencial es que un ajuste inadecuado (tiempo de retardo muy corto, sensor de baja calidad o mal ubicado) puede causar apagados indeseados cuando hay personas quietas, generando molestias. Para mitigarlo se suelen usar sensores de techo con cobertura completa y tiempos de 5-15 min, o sensores "de presencia" ultrasónicos más sensibles para interiores con poca actividad. También existen sensores de ausencia (el usuario debe encender manualmente y el sensor apaga automático al salir), recomendados en algunos entornos para evitar encendidos espontáneos innecesarios – pero en rehabilitación residencial/comercial la modalidad automática plena es la más frecuente.

[33] https://www.dialux.com/es-ES/dialux

[34] https://www.lighting.philips.es/soporte/herramientas

[35] https://www.signify.com/en-us/support/tools

- **Control por horarios (temporizadores, relojes astronómicos):** Consiste en programar el encendido/apagado de grupos de luces según franjas horarias preestablecidas. Es muy útil en exteriores (farolas de jardines, rótulos) para que solo funcionen de noche; e interiores de edificios de oficinas para asegurarse de que tras la jornada laboral quede todo apagado. Muchos cuadros de alumbrado incluyen relojes astronómicos que ajustan la hora de encendido al ocaso solar y el apagado al amanecer automáticamente según la época del año. En comunidades de vecinos es típico el temporizador en descansillos (pulsador que apaga tras X minutos). Un control horario central en un edificio grande puede apagar luces decorativas, de pasillos, etc. A horas fijas, con posibilidad de override manual. Su ventaja es la simplicidad y fiabilidad; su inconveniente es la falta de flexibilidad: si alguien necesita trabajar fuera del horario previsto puede quedar a oscuras (por eso se combina con sensores o mandos locales). Aún así, como capa de seguridad para evitar luces olvidadas toda la noche es excelente. Como se indicó, el CTE DB-HE3 exige un sistema de encendido/apagado central por horario en cada cuadro, evidenciando su importancia.

- **Regulación por luz natural (sensores crepusculares y fotocélulas):** En espacios contiguos a ventanas, instalar sensores de iluminación ambiente que midan la luz natural disponible y ajusten la intensidad de las luminarias en consecuencia. Así, en un día soleado a mediodía, las lámparas se atenuarán o incluso apagarán si no hacen falta, mientras que en un día nublado o de noche funcionarán a plena potencia. Este concepto, conocido como daylight harvesting, puede ahorrar gran cantidad de energía en zonas perimetrales. El CTE lo hace obligatorio en ciertos casos (ver 5.1.5). Los sensores típicamente se montan en el techo o integrados en la propia luminaria, "viendo" la luz combinada que llega a la superficie de trabajo. Un buen sistema regula de forma proporcional y suave, de modo que los ocupantes quizá ni perciban los cambios graduales en la intensidad. Los ahorros por esta causa pueden ser del orden de 20-40% adicionales en áreas con ventanas generosas. Como contrapartida, la instalación y calibración son algo más complejas (se debe evitar que la luminaria se retroalimente a sí misma falseando la medida – lo que se llama efecto pozo, calibrando el setpoint adecuadamente). Actualmente, muchos sistemas DALI y KNX tienen integraciones fáciles de sensores crepusculares, y los propios fabricantes de luminarias ofrecen variantes con sensor ya incorporado. En una rehabilitación, se puede optar por luminarias con sensor plug&play para no complicar cableados, logrando una rápida implementación.

- **Sistemas de control centralizado (protocolos DALI, KNX, etc.):** En edificios de cierto tamaño o complejidad, suele implementarse una red de control digital que conecta todas las luminarias y sensores a un sistema central o a controladores por zonas. Protocolos estándares son DALI (Digital Addressable Lighting Interface), especializado en iluminación, o KNX (domótica multifunción) y sistemas propietarios inalámbricos (ZigBee Light Link, Casambi vía Bluetooth, etc.). Estos permiten programar escenas, horarios, recibir estado de cada luz, agrupar luminarias por sectores, etc., dando mucha flexibilidad. Por ejemplo, con DALI en un open-plan office, se puede configurar que las filas junto a fachada regulen con luz natural, las interiores se mantengan a nivel fijo, todas se apaguen si los sensores no detectan a nadie, y todo ello monitoreado vía software. La ventaja es un control granular y monitorización, con potencial de optimizar constantemente y de integrar con la gestión del edificio (BMS).

- Además facilitan cumplir criterios de confort como permitir a usuarios ajustar la luz de su puesto individualmente. Los inconvenientes son el coste inicial y la necesidad de configuración experta. En rehabilitaciones pequeñas, un DALI completo quizá no compense, pero en edificios de oficinas grandes suele incorporarse. Hoy existen soluciones inalámbricas plug-and-play (p. ej., sistema Philips Hue o similar a escala oficina, aunque estos domésticos no son siempre adecuados a gran escala) que hacen más accesible dotar de cierta inteligencia sin recablear.

- **Sistemas smart residenciales**: Cabe mencionar que en viviendas unifamiliares o pisos, se han popularizado lámparas y dispositivos "smart home" (bombillas LED WiFi, enchufes inteligentes, asistentes de voz) que permiten también programar y controlar la iluminación de forma eficiente (ej.: apagar todas las luces al salir con un comando, o graduar intensidad según hora para ahorrar). Aunque en rehabilitación energética a nivel edificatorio no se entre en ese detalle, es una tendencia de fondo relevante.

En la práctica, la combinación óptima suele ser: sensores de presencia en zonas comunes, control horario nocturno en áreas de baja ocupación, y regulación por luz natural en puestos cercanos a ventanas. Con esto, diversas fuentes reportan ahorros totales de más del 60% en consumo de iluminación al implementar soluciones avanzadas de control[36]– sin contar el propio ahorro de cambiar a LED. De hecho, casos reales como el edificio The New York Times lograron un 75% de ahorro en iluminación con sistemas Lutron de dimming por luz día y ocupación. Es decir, los controles pueden duplicar el ahorro conseguido solo con la eficiencia de las lámparas.

Finalmente, es importante velar por la experiencia del usuario: la iluminación inteligente debe ser intuitiva y no causar inconvenientes. Por ejemplo, prever pulsadores manuales de anulación (override) para que alguien pueda encender la luz si el sensor la dejó apagada; o programar una iluminación de emergencia tenue por seguridad aunque no haya detección. Cuando se ajusta bien, la gente ni se da cuenta de que el sistema está ahorrando energía en segundo plano. Esa es la meta: la luz adecuada en el momento adecuado, automáticamente.

[36] https://assets.lutron.com/a/documents/367-1606_sp%20(new).pdf

5.2.6. Contaminación lumínica y diseño responsable de la iluminación exterior

En rehabilitación energética no solo cuenta el interior: si el edificio posee iluminación exterior (fachadas, patios, jardines, alumbrado público en urbanizaciones), conviene aplicar criterios de diseño responsable para minimizar la contaminación lumínica. La contaminación lumínica es el brillo artificial del cielo nocturno causado por luz mal dirigida o excesiva, y tiene consecuencias negativas en el medio ambiente (afecta a la biodiversidad nocturna, desorienta la fauna, interfiere en los ciclos circadianos de animales y personas) además de desperdiciar energía iluminando donde no se necesita[37].

Algunos principios de diseño responsable de iluminación exterior que deben incorporarse en proyectos de rehabilitación son:

- **Evitar la emisión de luz hacia el cielo:** Toda luminaria exterior debería ser de tipo corte total (full cutoff), es decir, con protección o aletas de forma que no emita luz por encima de la horizontal. De este modo, la luz se dirige únicamente al suelo u objeto que se quiere iluminar, y no se dispersa al cielo. Por ejemplo, reemplazar farolas tipo globo (que emiten en todas direcciones) por luminarias con capota superior opaca y vidrio plano debajo. También, instalar focos de fachada siempre apuntando hacia abajo, nunca hacia el cielo. Esta es la medida más importante: una luminaria bien apantallada puede reducir a cero su flujo hemisférico superior (FHS=0%), eliminando su aporte al resplandor del cielo. Muchas normativas locales exigen FHS<1% en ciertas zonas protegidas (por ejemplo, en España el RD 1890/2008 sobre eficiencia de alumbrado exterior ya imponía límites de flujo hacia arriba según zona ambiental).

- **Usar niveles de iluminación moderados y adecuados:** Un error común es sobreiluminar exteriores por seguridad. En realidad, muchas veces se puede bajar la potencia sin perder visibilidad, sobre todo de madrugada cuando hay poca actividad. Diseñar con los niveles justos según normativa (EN 13201 para vías, u orientaciones de Illuminating Engineering Society) y preferir uniformidad sobre intensidad excesiva. Implementar regulación horaria nocturna: por ejemplo, bajar al 50% el nivel de alumbrado en calles residenciales a partir de medianoche cuando apenas hay tránsito. La mayoría de luminarias LED actuales permiten atenuación, e incluso muchos municipios ya apagan cierto alumbrado en altas horas. Como referencia, estudios indican que muchas instalaciones podrían atenuar un 25% su luz sin pérdida apreciable de visibilidad. Menos luz implica menos dispersión y menos intrusión en viviendas colindantes. Por tanto, en rehabilitación, planificar bajadas de nivel automáticas en exteriores durante la noche avanzada.

[37] https://www.archdaily.cl/cl/978495/como-reducir-la-contaminacion-luminica-con-un-alumbrado-urbano-adecuado

- **Escoger tonalidad cálida para la luz nocturna:** La luz blanca con alto contenido azul (temperaturas de color frías, >4000 K) es más perjudicial para los ecosistemas nocturnos y para los ritmos circadianos humanos (inhibe más la melatonina). Se recomienda usar LED de tono cálido ≤3000 K para alumbrado exterior. La luz ámbar o blanco cálido reduce el impacto en el cielo nocturno (el azul se dispersa más en la atmósfera), con lo cual el cielo se ilumina menos. Además crea ambientes más agradables visualmente. Muchas ciudades han optado por 3000 K o incluso 2700 K en sus farolas LED. En rehabilitación de uso privado, por ejemplo, instalar luminarias de jardín de luz cálida en vez de blanca neutra. Hoy día la eficiencia de un LED cálido 3000K es casi igual a uno frío, así que no hay mucha penalización por elegirlo.

- **Orientación y ángulo de instalación adecuados:** Relacionado con el primer punto hay que dirigir la luz exactamente a la zona objetivo, evitar luminarias inclinadas hacia arriba, preferir ópticas asimétricas y si es necesario arrojar luz lateralmente, en lugar de inclinar el aparato. Por ejemplo, para iluminar una fachada desde el suelo, no apuntar el proyector directamente alto sino usar proyectores con corte que enfoquen solo el plano de la fachada minimizando derrames. Muchos fabricantes proporcionan fotometrías "cortadas" para aceras estrechas, etc., que deben aprovecharse.

- **Reducir luces intrusivas y decoración innecesaria:** A veces parte de la contaminación lumínica viene de iluminaciones ornamentales (rótulos muy brillantes, fachadas acristaladas encendidas toda la noche, cañones de luz). En una rehabilitación sostenible, se debe cuestionar la necesidad de esas iluminaciones y, de mantenerlas, controlarlas con horario (por ejemplo, apagar rótulos comerciales tras cierto horario de cierre). Así mismo, evitar apuntar luces hacia las ventanas de viviendas (lo que produce contaminación lumínica interior, afectando el sueño). En esencia, respetar el entorno oscuro circundante.

Implementando estas medidas, se logra un alumbrado eficiente y a la vez amigable con el medio nocturno. No hay que olvidar que la energía más limpia es la no consumida: apagar o atenuar luces cuando no se requieren, además de ahorrar, devuelve el cielo estrellado. Un diseño consciente equilibra seguridad y sostenibilidad. Por ejemplo, se pueden usar balizas de camino de baja intensidad en un jardín en lugar de farolas altas; o iluminar una fachada histórica solo en eventos especiales en vez de todas las noches. Hoy existen incluso normas ISO y certificaciones (como Dark Sky Friendly de IDA, etc.) para instalaciones que protegen el cielo nocturno.

Para finalizar, es útil resumir los pros y contras de los diversos sistemas de control de iluminación comentados, ya que en un proyecto real se suelen combinar varios y es preciso decidir dónde conviene cada uno:

- **Sensores de presencia (detectores de movimiento):**
  - Ventajas: Gran ahorro energético automático (17–60% menos consumo), sencillos de instalar en cada estancia, mejoran comodidad en pasos (luz se

enciende sola). Precio relativamente bajo y se amortizan rápido.
  - Inconvenientes: Pueden fallar en detección si están mal ubicados o calibrados (quedando gente a oscuras momentáneamente), algunos modelos baratos pueden activarse con falsas señales (ej. corrientes de aire, roedores, etc.)[38]. Requieren mantenimiento ocasional (cambiar pilas en inalámbricos o recalibrar tiempos). En espacios donde la gente está quieta (p.ej. lectura tranquila) pueden necesitar sensores más sensibles o combinarlos con manual.

- **Temporizadores y relojes horarios:**
  - Ventajas: Fiables y fáciles de entender. Garantizan apagado seguro a horas fijas (evitando luces encendidas toda la noche). Ideales en exteriores con fotocélula para seguir ciclo día/noche. Sin intervención humana, una vez programados funcionan siempre.
  - Inconvenientes: Rigidez; si se ocupa el espacio fuera del horario previsto, la iluminación no responde a esa necesidad a menos que haya override manual. Programación fija no distingue días festivos o situaciones particulares sin un sistema más avanzado. Pueden requerir reajuste estacional (aunque los astronómicos lo evitan).

- **Regulación por luz natural:**
  - Ventajas: Aprovecha al máximo la gratuidad del sol, manteniendo constante el nivel de iluminación combinado. Ahorros sustanciales en espacios con ventanas (>20% de ahorro añadido típicamente). Contribuye también al confort (evita tener luces innecesariamente brillantes junto a ventanas).
  - Inconvenientes: Instalación y puesta en marcha más complejas; un sensor mal calibrado puede hacer que las luces fluctúen (oscilaciones) o que no se logre el nivel deseado. Necesita luminarias dimmables, lo que encarece un poco. En espacios muy dinámicos (p.ej. con sombras intermitentes) el sistema puede volverse loco si no se configura la histéresis.

- **Control centralizado (DALI/KNX/BMS):**
  - Ventajas: Máxima flexibilidad y sofisticación – se pueden personalizar escenas, integrar con climatización y persianas (ej.: bajar persianas y subir luces o viceversa para optimizar energía). Monitorización remota y mantenimiento predictivo (saber si una lámpara falla). Escalabilidad para edificios grandes. Permite análisis de uso de espacios (ocupación) a través de la iluminación.
  - Inconvenientes: Costo inicial notable (módulos DALI, pasarelas, software, commissioning por técnico especializado). Complejidad que puede ser excesiva para edificios pequeños. Dependencia de que todos los dispositivos "hablen" el protocolo correctamente (interoperabilidad real a veces complicada). Necesidad de formación del personal de mantenimiento. Actualizaciones futuras pueden requerir soporte del proveedor.

[38] https://www.rayzeek.com/es/blog/sensor-de-movimiento-pros-y-contras

- **Sistemas inalámbricos (IoT, Zigbee, Casambi):**
  - Ventajas: No requieren tender buses de control, útil en rehabilitaciones donde el cableado de control es difícil. Configurables mediante apps, bastante plug and play en algunos casos. Pueden ser más económicos en edificios dispersos. Flexibilidad en reconfiguración (basta reprogramar grupos en software).
  - Inconvenientes: Posibles problemas de cobertura RF en ciertos recintos (muros gruesos, interferencias). Seguridad cibernética (es necesario proteger la red para que no sea hackeable, sobre todo en sistemas WiFi). A veces tienen latencias ligeramente mayores que cableado. Vida útil limitada de baterías en sensores autónomos.

- **Control manual tradicional (interruptores, reguladores manuales):**
  - Ventajas: Simplicidad, costo mínimo, usuario tiene control directo. Único medio para respetar preferencias individuales en muchas situaciones (a algunas personas les gusta más luz, a otras menos; un dimmer manual permite ese ajuste fino).
  - Inconvenientes: Depende del factor humano – si los ocupantes no tienen conciencia, pueden dejar todo encendido. En entornos comunitarios nadie se siente responsable de apagar (de ahí los automatismos). No logra ahorros adicionales por sí solo (aunque fomenta cierta cultura de ahorro si se instruye).

En un proyecto, la estrategia suele ser híbrida: por ejemplo, áreas comunes con detectores (sin necesidad de acciones del usuario), áreas de trabajo con detectores + reguladores manuales en puestos (para combinar automatismo con preferencia personal), exteriores con reloj astronómico + sensor crepuscular, etc.

También es importante considerar posibles inconvenientes colaterales: un sistema mal configurado puede terminar generando incomodidad – por ejemplo, si las luces se apagan demasiado pronto y hay que estar haciendo movimientos para reactivarlas, la gente puede intentar anular los sensores. O una regulación diurna que mantenga niveles demasiado bajos para ciertos trabajadores quizá les cause molestias. Por eso se debe afinar la puesta en marcha y, si es posible, involucrar a los usuarios en ajustar parámetros (tiempos de espera, niveles mínimos de dimming). Los mejores sistemas incluso aprenden patrones o permiten analítica (por ejemplo, contar cuántas veces detectó movimiento un sensor para reubicar si conviene).

6 ENERGÍAS RENOVABLES

La rehabilitación energética de edificios en la Comunidad de Madrid pasa necesariamente por integrar fuentes de energía renovable que reduzcan el consumo de fuentes fósiles. Europa ha marcado un rumbo claro: la nueva Directiva 2024/1275 (EPBD) promueve de forma decidida la renovación energética de edificios y el aprovechamiento de energías renovables in-situ, alineándose con el plan REPowerEU para acelerar la transición tras la crisis energética de 2022[1]. Por ejemplo, la EPBD[2] exige optimizar el diseño de edificios nuevos para integrar energía solar y fija calendarios obligatorios: edificios públicos y terciarios de nueva construcción (>250 m²) deberán incorporar tecnología solar antes de 2027, y los residenciales antes de 2030, siempre que sea viable. En España, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC 2021-2030)[3] también refuerza estos objetivos, previendo alcanzar 19 GW de autoconsumo solar en 2030 (instalando del orden de 2 GW anuales de aquí a final de década)[4]. Todo ello se ve respaldado por normativa nacional como el Código Técnico de la Edificación (CTE) y programas del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) que impulsan la incorporación de renovables en edificios existentes. A continuación, se describen los tipos de energías renovables más relevantes en rehabilitación de edificios, sus ventajas e inconvenientes, así como las condiciones de implantación y las restricciones técnicas o normativas en la Comunidad de Madrid.

6.1. TIPOS DE ENERGÍAS RENOVABLES

[5]. De hecho, el CTE reconoce expresamente la aerotermia como energía renovable válida para ACS siempre que la bomba de calor tenga un rendimiento estacional (SCOP) superior a 2,5 (en el caso de compresores eléctricos). Asimismo, el CTE introdujo una sección HE5 que obliga a generar in situ una mínima cantidad de energía eléctrica renovable (normalmente con fotovoltaica) en edificios de nueva planta; si por restricciones arquitectónicas no se pudiera alcanzar la potencia mínima calculada, el proyectista debe justificarlo e instalar la máxima potencia posible[6]. En rehabilitaciones, aunque esta exigencia no siempre es de cumplimiento obligatorio (salvo en reformas integrales equiparables a obra nueva), sí refleja una tendencia normativa: aprovechar las superficies disponibles (cubiertas, fachadas) para generar energía limpia.

A continuación, se describen individualmente los tipos de energías renovables más relevantes:

---

1 https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/epbd2024.html

2 https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en

3 https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.html

4 https://www.energias-renovables.com/panorama/especial-autoconsumo-objetivo-dos-gigas-ao-20241007

5 https://blog.deltoroantunez.com/2020/06/desgranando-el-he-2019-he-4-acs.html

6 https://www.certificadosenergeticos.com/he5-generacion-electrica-renovables

Energía solar fotovoltaica, energía solar térmica y bombas de calor (aerotérmicas y/o geotérmicas) ya han sido analizadas con la suficiente profundidad y detalle en el capítulo 4.

6.1.1. Energía eólica (minieólica)

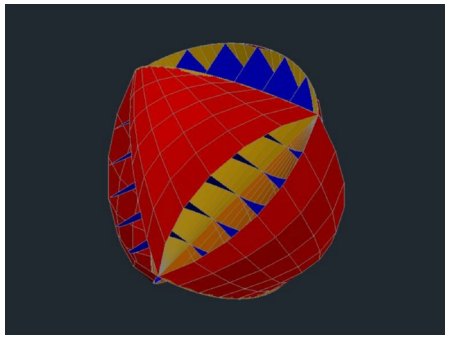
La energía eólica en edificación se refiere normalmente a la minieólica, es decir, pequeños aerogeneradores (turbinas de baja potencia, típicamente ≤100 kW e incluso microeólica <10 kW) instalados en el edificio o su entorno para generar electricidad con el viento. En la Comunidad de Madrid, el potencial eólico es bastante inferior al solar, especialmente en el casco urbano: el viento promedio anual en la ciudad suele estar entre 2 y 4 m/s a 10 m de altura, con mucha turbulencia por la densidad edificatoria. Aun así, en áreas despejadas o elevadas de la región puede haber enclaves ventosos aprovechables. Ventajas de la minieólica: puede generar energía también de noche o con cielo nublado, complementando a la solar fotovoltaica; en ubicaciones favorables con buen recurso eólico, aporta una producción renovable constante o estacional (por ejemplo, en algunas zonas el viento es más fuerte en invierno, coincidiendo con más demanda). Además, la integración de un aerogenerador puede tener un componente pedagógico o de imagen sostenible para el edificio, visibilizando el compromiso ambiental (muchos edificios institucionales han usado turbinas urbanas como elemento emblemático). Tecnológicamente existen aerogeneradores diseñados para entornos urbanos de viento turbulento, por ejemplo máquinas de eje vertical o diseños helicoidales/lenz que funcionan con viento desde cualquier dirección y producen menos ruido. Suelen ser de menor rendimiento que un aerogenerador convencional de tres palas, pero más adaptados a tejados.



Distintos sistemas de energía minieólica - Fenercom[7]

Sin embargo, las limitaciones de la minieólica urbana son importantes. Primero, la baja velocidad media de viento: para que una turbina genere suficiente energía debe haber un recurso eólico significativo. Se considera que un emplazamiento con ~4-5 m/s de velocidad media anual puede ser apto para minieólica, con producciones del orden de 200-300 kWh anuales por cada m² de área barrida por las palas . Por debajo de ~3 m/s de media, la viabilidad es muy baja (el aerogenerador generaría esporádicamente y nunca amortizaría). En zonas urbanas densas, alcanzar 4-5 m/s de media solo es posible en edificios muy altos y expuestos, o en la periferia sin obstáculos alrededor. Otro problema es la turbulencia: el viento en ciudad viene rebotado entre edificios, lo que causa ráfagas cambiantes que reducen la eficiencia y aumentan el desgaste de la máquina. Además está la cuestión estructural y vibraciones: instalar un aerogenerador en la cubierta de un edificio exige un estudio estructural, ya que las cargas de viento sobre el molino pueden ser considerables. Debe anclarse firmemente a elementos resistentes (p. ej., pilares o jácenas) y a veces incluir amortiguadores sísmicos para evitar transmitir vibraciones molestas al edificio. El ruido también es un factor: aunque las turbinas pequeñas son relativamente silenciosas (alrededor de 40-60 dB a corta distancia), en un entorno muy tranquilo podría percibirse, por lo que conviene elegir modelos certificados y con diseños de bajo ruido (algunas de eje vertical o con palas especiales).

Actualmente en Madrid la minieólica es anecdótica, con contadas instalaciones demostrativas. Existe cierto vacío normativo: no hay una normativa específica estatal para minieólica, más allá de los procedimientos generales de conexión a red y seguridad. Algunas ciudades han estudiado redactar ordenanzas municipales para regular la instalación de minieólicos en edificios, estableciendo requisitos mínimos de calidad, seguridad estructural, ruido y vibraciones[8]. De implementarse, estas ordenanzas facilitarían a los promotores conocer los criterios para obtener licencia. Mientras tanto, cualquier proyecto eólico urbano se analiza caso por caso. Un ejemplo de aplicación podrían ser viviendas unifamiliares en zonas rurales de la Sierra de Madrid, donde el viento es mayor: allí una turbina doméstica (por ejemplo 1-5 kW, con mástil de 10-15 m) podría complementar a los paneles solares y cargar baterías por la noche. En la ciudad, algún edificio emblemático de oficinas podría integrar aerogeneradores de diseño (hay casos en otros países, como la torre Bahrain WTC con turbinas entre dos rascacielos, o el casco de la torre Strata en Londres). En España, un caso destacado fue el edificio del Museo del Aire (Cuatro Vientos, Madrid), que instaló en su día varios aerogeneradores verticales como proyecto piloto.



Prototipo de nuevo mini-aerogenerador[9] de O-Innovations O-Wind[10] que no depende de vientos predominantes.

[7] https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2012/09/Guia-sobre-Tecnologia-Minieolica-fenercom-2012.pdf

[8] https://www.appa.es/wp-content/uploads/2018/07/PRESENTACION-MINIEOLICA.pdf

[9] https://www.designboom.com/technology/owind-omnidirectional-bladeless-wind-turbine-12-05-2022/

[10] https://o-innovations.com

6.1.2. Minihidráulica

La minihidráulica aprovecha la energía del agua en pequeños saltos o flujos para generar electricidad mediante turbinas hidráulicas de escala reducida (por convención, minihidráulica suele ser ≤10 MW, y microhidráulica <100 kW). En el contexto de rehabilitación de edificios en Madrid, la aplicabilidad de esta fuente es muy limitada, dado que depende de la presencia de un recurso hídrico continuo (río, canal, arroyo con caudal suficiente y un cierto desnivel). En entornos urbanos esto prácticamente no existe. Sin embargo, podríamos mencionar casos especiales: por ejemplo, rehabilitar antiguas edificaciones que históricamente tenían molinos de agua. Si un edificio (pongamos una finca rural con molino) dispone de un salto de agua aprovechable, se podría instalar una turbina moderna en ese cauce para suministrar electricidad al edificio. También existen proyectos de microturbinas en redes de agua potable o de riego: es decir, instalar pequeñas turbinas en las válvulas reductoras de presión de tuberías urbanas, aprovechando la presión sobrante del agua que circula. Esto podría aplicarse en edificios altos con depósitos en azotea, pero es más teórico; en la práctica, la generación sería muy pequeña y compleja de gestionar por intermitencia de consumo de agua.

Las ventajas de la minihidráulica, cuando se puede usar, son la constancia y gestionabilidad: un flujo de agua estable permite generar energía 24 h al día, aportando una renovable firme que no depende del clima instantáneo. Las turbinas hidráulicas además tienen eficiencias altas (60-90%) y larga vida útil.

Son sistemas bastante automatizados hoy día, requiriendo poco mantenimiento más allá de limpiar rejas de hojas o sedimentos.

Sus inconvenientes principales en edificios son la escasez de recursos y los permisos ambientales. Cualquier aprovechamiento de aguas requiere concesiones administrativas (Confederación Hidrográfica, etc.) y estudios de impacto (hay que garantizar caudales ecológicos, no afectar a la fauna, etc.). Además, la potencia obtenible suele ser baja: por ejemplo, un salto de 2 m con 100 L/s de caudal continuo apenas daría ~1,5 kW eléctricos. Por ello, difícilmente abastecería más que consumos menores o puntuales. En la Comunidad de Madrid existieron pequeñas centrales hidráulicas a principios del siglo XX aprovechando canales de riego o cursos altos de ríos, pero en ámbitos urbanos es anecdótico. Ejemplos: se podría teorizar instalar una micro-turbina en la bajante de un edificio que tiene 15 plantas (aprovechando el agua de lluvia), pero la producción sería insignificante y sólo cuando llueve. Otro ejemplo real: en Barcelona se probaron microturbinas en la red de distribución de agua para recuperar energía de la sobrepresión nocturna, pero a escala edificio no aplica.

En rehabilitación energética, la minihidráulica podrá ser relevante únicamente si el edificio se sitúa junto a un cauce con caída de agua utilizable. En la región de Madrid, quizás algún antiguo molino en la cuenca del río Lozoya o Guadarrama que se rehabilite podría incorporar un generador hidráulico moderno manteniendo la estética original. Para la inmensa mayoría de edificios, no obstante, esta fuente no estará disponible y por tanto no suele contemplarse en las auditorías energéticas.

Normativamente no hay exigencias ni incentivos específicos para microhidro en edificios, más allá de los generales a renovables eléctricas (podrían acogerse a autoconsumo con excedentes igual que una PV).

La minihidráulica es una renovable muy específica que pocas veces formará parte de un proyecto de rehabilitación urbana, pero conviene mencionarla para completar el panorama de opciones renovables distribuidas.



Espacio molinos del río / caballerizas – El Museo Hidráulico Murcia. Aqr. J. Navarro-Baldeweg. Foto: A.Bosqued

6.1.3. Biomasa

La biomasa se refiere en edificación principalmente al uso de combustibles sólidos de origen biológico (leña, pellet, astilla, huesos de aceituna, etc.) para producción de calor en calderas o estufas. También podría incluir biocombustibles líquidos o gaseosos (biogás, bioetanol), pero en rehabilitación de edificios el caso típico es sustituir una caldera de gasóleo o gas por una caldera de biomasa (pellets) para calefacción y ACS. La biomasa se considera una fuente renovable porque el CO_2 emitido en la combustión es equivalente al absorbido por la planta durante su crecimiento, resultando neutral en carbono en teoría. Además, se produce a partir de recursos locales (residuos agrícolas, limpiezas forestales, etc.), reduciendo dependencia de combustibles fósiles importados.

Ventajas de la biomasa: permite generación térmica gestionable (a diferencia de solar o eólica, aquí tenemos calor "bajo demanda" cuando se quema el combustible, similar a las calderas convencionales). Por ello, puede garantizar calefacción 24/7 en invierno independientemente del clima, siendo un sustituto funcional del gas o gasóleo. Es especialmente interesante en entornos rurales o semiurbanos donde haya disponibilidad de biocombustible cercano (por ejemplo, pellets de fabricantes locales, o incluso restos de poda propios en fincas grandes). El coste del combustible biomásico (por kWh útil) suele ser menor y más estable que el del gasóleo o gas natural, generando ahorros económicos a largo plazo, aunque en los últimos años el

pellet también ha sufrido volatilidad de precios. Otro aspecto positivo es que su uso promueve la gestión forestal sostenible al dar salida comercial a restos que de otro modo podrían propiciar incendios en el monte. Tecnológicamente, las calderas modernas de biomasa están bastante automatizadas: encendido electrónico, control de combustión con sondas lambda, alimentación automática mediante sinfín desde un silo, extracción de cenizas a contenedor, etc. Existen equipos de tamaño doméstico incluso calderas estancas en piso o hidroestufas, pero lo más habitual en rehabilitación es a nivel centralizado: una comunidad de vecinos podría poner una sala de calderas de pellet en sustitución de la de gasóleo.



Silos de biomasa en rehabilitación edificio acceso CEDER, Soria. Foto: A. Bosqued

Sin embargo, la biomasa tiene también importantes inconvenientes y restricciones, sobre todo ambientales en entornos urbanos. La combustión de biomasa, aunque neutra en CO_2, emite contaminantes atmosféricos locales: partículas finas ($PM_{2.5}$, PM_{10}), CO, compuestos orgánicos volátiles y algo de NO_X. En zonas de alta densidad, muchas calderas de biomasa podrían agravar la contaminación del aire, particularmente en invierno cuando se dispara el uso de calefacción. Por esta razón, algunas administraciones locales han desincentivado su uso: el Ayuntamiento de Madrid, en su Ordenanza de Calidad del Aire 4/2021, llegó a excluir la biomasa del cómputo de renovables para ACS (no la consideran válida para cumplir porcentajes mínimos), precisamente "con objeto de mejorar la calidad del aire"[11]. Asimismo, en planes de subvenciones municipales se decidió no financiar cambios de calderas de carbón/gasoil hacia biomasa, favoreciendo en su lugar gas natural o electricidad. Esto generó polémica con el sector, ya que fabricantes y asociaciones (AVEBIOM, etc.) alegan que las tecnologías modernas de biomasa reducen drásticamente las emisiones respecto a las antiguas estufas de leña. De hecho, las calderas actuales cumplen regulaciones europeas de ecodiseño que limitan sus emisiones (por ej., máx. 20 mg/Nm³ de partículas para equipos clase 5 según EN 303-5). Aún siendo mucho más limpias que chimeneas tradicionales, nunca serán totalmente cero emisiones locales. Por eso en plena ciudad la biomasa genera reparos: en episodios de contaminación, París o Londres han restringido chimeneas de leña, y Madrid podría seguir caminos similares si aumentase significativamente este parque.

[11] https://www.energias-renovables.com/bioenergia/ayuntamiento-de-madrid-gas-si-para-nuevas-20210716

Otra limitación práctica es el espacio y logística: una instalación de biomasa requiere un silo o almacén para el combustible (en pellet, aproximadamente 0,3-0,4 m³ por cada 1.000 kWh mensuales que se consuman; una comunidad de 20 pisos puede necesitar un silo de 8-10 m³ para pasar el invierno). Este silo debe estar accesible para camiones que reposten el pellet (mangueras neumáticas de carga) y preferiblemente ubicado cerca de la caldera. En rehabilitación, encontrar ese espacio en sótanos o patios puede ser difícil. También se necesita una chimenea adecuada, porque las calderas de biomasa deben evacuar humos a cubierta (no se puede utilizar un shunt compartido con gas, por ejemplo; toca adaptar o instalar un nuevo conducto con aislamiento térmico, a veces exterior si no hay shunt disponible). Y se generarán cenizas (0,5-1% del volumen del combustible), que aunque pocas, implican retirar cada cierto tiempo un cubo de cenizas y disponerlas convenientemente (pueden usarse como abono en jardines, etc.).

Pese a todo lo anterior, la biomasa sí es muy válida en ciertos contextos: en municipios rurales de Madrid (la Sierra Norte, pueblos de la Sierra de Guadarrama, etc.), donde la calidad del aire es buena y la densidad baja, instalar calderas de biomasa en viviendas unifamiliares o equipamientos públicos tiene sentido y está siendo apoyado. El IDAE publicó la Guía de instalaciones de biomasa térmica en edificios[12] para difundir buenas prácticas. Muchas viviendas antiguas con calefacción de gasóleo están cambiando a pellet por ahorro económico y seguridad (el pellet elimina riesgo de escape de gas o fuel). En comunidades de propietarios con caldera central, sobre todo fuera del centro de Madrid, también hay casos de sustitución por biomasa, siempre analizando el tema emisiones. Las instalaciones más grandes (ej. district heating o redes de calor centralizado) están utilizando biomasa en algunos proyectos, porque permiten colocar equipos de filtrado avanzados (electrofiltros, multiciclones) para minimizar emisiones. Por ejemplo, existen redes de calor con biomasa en ciudades españolas de tamaño medio (en Navarra, Cuenca, etc.) que abastecen varios edificios; en Madrid capital no hay aún por las restricciones mencionadas, pero en campus universitarios o polígonos podría darse.

6.1.4. Otras energías emergentes

Además de las fuentes tradicionales mencionadas, existen tecnologías emergentes o híbridas que empiezan a aparecer en el ámbito de la rehabilitación energética y merecen una mención:

Hidrógeno verde: El hidrógeno obtenido por electrólisis del agua usando energías renovables se postula como un vector energético del futuro. Si bien su uso principal se prevé en industria y transporte pesado, también puede tener un papel en edificios como almacenamiento estacional de energía o combustible limpio para calefacción y electricidad mediante pila de combustible. En la práctica actual, el hidrógeno en edificación está en fase experimental o de demostradores. Algunos posibles esquemas: integrar un electrolizador + tanque de H_2 + pila de combustible en un

[12] https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/Eficiencia/RITE/documentosreconocidosrite/Gu%C3%ADas%20t%C3%A9cnicas/Guia_Instalaciones_Biomasa.pdf

edificio aislado con gran excedente solar en verano, de modo que el H_2 almacenado sirva para generar electricidad/calor en invierno (conceptualmente interesante para lograr autonomía, pero hoy por hoy con rendimientos globales bajos y costes altísimos). Otro enfoque es usar calderas de hidrógeno: varios fabricantes europeos (Baxi, Viessmann, etc.) han desarrollado prototipos de calderas que queman hidrógeno al 100% o mezclas H_2/gas. De momento, en la UE se habla de introducir gradualmente hidrógeno en la red de gas natural (por ejemplo, mezclar un 5-20% de H_2 en las tuberías existentes). De hecho, las calderas de condensación modernas muchas ya vienen "H_2-ready", preparadas para funcionar con hasta un 20% de hidrógeno mezclado[13]. No obstante, para tener un impacto real, se requeriría infraestructura: producción masiva de hidrógeno verde y distribución. España aprobó en 2020 la Hoja de Ruta del Hidrógeno, fijando objetivos para 2030 como 4 GW de electrolizadores instalados y ciertos proyectos piloto de inyección en red y edificios públicos[14], pero a día de hoy es incipiente.



Caldera Baxi 100% de Hidrógeno. Fuente: EnergyNews[15]

En rehabilitación energética, el hidrógeno podría plantearse en escenarios especiales: por ejemplo, reconvertir un edificio con caldera de propano a usar hidrógeno si se tuviera suministro (no existe comercialmente aún). O instalar una microcogeneración por pila de combustible alimentada con hidrógeno o con reformado de biogás, para simultáneamente generar electricidad y calor. Las pilas de combustible domésticas (como las usadas en Japón en el programa ENE-FARM, con decenas de miles de unidades a gas) podrían en un futuro funcionar con hidrógeno puro, dando electricidad y ACS en edificios multifamiliares.

Por ahora, la eficiencia del ciclo del hidrógeno es una preocupación: obtener 1 kWh de calor vía hidrógeno puede requerir ~3 kWh de electricidad renovable previa en el electrolizador, lo que es mucho menos eficiente que usar directamente esa electricidad en una bomba de calor. Por eso, los científicos desaconsejan su uso masivo para calefacción residencial, salvo casos donde otras opciones no encajan[16]. Sin embargo, la UE apuesta por desarrollar el hidrógeno en sectores difíciles de electrificar, y mantenerlo como opción para el parque existente de calderas (evitando así tener que desmantelar todas las redes de gas). Es posible que a medio plazo veamos redes de calor locales con hidrógeno o mezcla en nuevos desarrollos eco-barrios, o edificios de logística con sus propias celdas de combustible (aprovechando flotas de carretillas a hidrógeno, etc.).

En cualquier caso, hoy en 2025 el hidrógeno no es aún una pieza práctica de la rehabilitación energética de edificios en Madrid. Se sigue con interés, se preparan las calderas para un futuro con H_2, y quizás en 5-10 años surjan las primeras implementaciones significativas. Por ahora, su mención sirve para completar el panorama de renovables emergentes y tener visión de futuro.

Otras tecnologías que podríamos mencionar incluyen la aerotermia solar (sistemas termodinámicos que combinan paneles refrigerantes exteriores con bomba de calor para ACS, muy similares a aerotermia pero con paneles en fachada en vez de unidad con ventilador) o la geotermia solar (almacenar calor solar estival en el suelo para recuperarlo en invierno, mediante perforaciones estacionales). Son todavía poco comunes comercialmente, pero reflejan la innovación continua en el sector de la energía renovable integrada en edificios.

Todas estas tecnologías deben evaluarse con una visión integradora: un edificio de consumo casi nulo (EECN) o futuro edificio cero emisiones combinará necesariamente varias fuentes renovables. La normativa europea de edificios tiende a requerir un mix: por ejemplo, paneles solares obligatorios más sistemas eficientes de climatización sin fósiles, etc. De hecho, la nueva EPBD contempla mínimos de rendimiento energético y prohibiciones graduales de equipos fósiles (como se mencionó anteriormente, a partir de 2026 no se permitirán calderas de combustibles fósiles en obra nueva/ renovaciones importantes). El arquitecto debe por tanto pensar en diseños híbridos donde quizá convivan paneles fotovoltaicos, apoyo solar térmico o PVT, bomba de calor como base, y otro sistema auxiliar según necesidades específicas.

[13] https://www.saunierduval.es/para-el-usuario/productos/tecnologias/calderas-h2/

[14] https://www.aeh2.org/wp-content/uploads/2023/07/AeH2_Informe-Censo-de-Proyectos.pdf

[15] https://www.energynews.es/la-primera-caldera-domestica-que-funciona-con-hidrogeno/

[16] https://www.energias-renovables.com/hidrogeno/los-cientificos-desaconsejan-el-uso-del-hidrogeno-20231214

6.2. INTEGRACIÓN, FUNCIÓN Y EFICIENCIA SEGÚN TIPOLOGÍA

No todos los tipos de edificio pueden incorporar de igual manera las energías renovables descritas. Las posibilidades técnicas, la rentabilidad y las restricciones varían si se trata de una vivienda unifamiliar aislada, de un bloque de viviendas colectivas, o de un edificio terciario (oficinas, comercial, industrial). A continuación, se examina cómo se integran estas fuentes renovables en función del tipo de edificación, considerando la viabilidad, la eficiencia lograda, el espacio requerido, posibles restricciones normativas, y costes aproximados. Se incluyen cuadros al final del capítulo.

(Nota: Los aspectos de ayudas económicas y financiación se abordan en el capítulo 9, por lo que aquí se centran en la viabilidad técnica y funcional).

6.2.1. Edificios residenciales unifamiliares

Cuentan con cubiertas y/o terreno propio, lo que facilita cierto grado de autonomía energética. Tienen, eso sí, un consumo agregado menor que un bloque de viviendas, pero proporcionalmente más superficie disponible por vivienda para la integración de renovables.

Integración de renovables:

- *Solar fotovoltaica:* Es probablemente la opción nº1 en unifamiliares. La mayoría de chalets pueden acomodar 8-12 paneles en cubierta (unos 3-5 kW pico) sin problema, suficiente para cubrir una buena parte de la demanda eléctrica anual de la casa. La orientación suele poder optimizarse (muchos tejados a dos aguas permiten paneles orientados a sur). La instalación es relativamente sencilla y no invasiva. En Madrid, ya miles de viviendas unifamiliares han instalado autoconsumo solar tras el cambio normativo de 2019.
  Restricciones: en urbanizaciones con entornos protegidos o patrimonio (ej. colonias históricas de Madrid) podría requerir visto bueno estético, pero en general no hay prohibiciones (la Ley de Propiedad Horizontal no aplica al ser vivienda única).
  Ayudas: hay deducciones fiscales del IBI en algunos municipios para quien instala fotovoltaica en su vivienda, además de subvenciones estatales.
  Eficiencia: la energía solar cubre bien el perfil diurno; con vertido a red de excedentes y compensación, incluso sin baterías resulta rentable. Si se añaden baterías, se puede alcanzar >80% de autoconsumo, pero encarece el sistema; muchos optan por dimensionar para ~50-60% de cobertura.
  Espacio: unos 6-8 m² por cada kW. Un tejado de 50 m² útil podría albergar ~7 kW (suficiente para casi anular la factura si hay coche eléctrico por ejemplo)

- *Solar térmica*: En viviendas unifamiliares es tradicional su uso para ACS e incluso apoyo a calefacción.
  Un kit típico: 2-3 paneles planos + depósito de 200-300 l. Ocupa ~5 m² de tejado. Muchas viviendas ya lo tenían por CTE pre-2019. Si no lo tienen, puede ser interesante incorporar al rehabilitar, sobre todo si la calefacción sigue con gas o gasóleo (ahorras en ACS anual). Si en cambio se va a poner aerotermia, quizá no convenga duplicar sistemas. Ventaja en unifamiliar: fácil mantenimiento por el propio dueño, y control total (uno mismo puede purgar, revisar).
  Restricciones: pocas; cuidar que el acumulador quepa (cuartos pequeños a veces complican, pero hay depósitos compactos).
  Coste: ~3.000-4.000 € la instalación completa; amortizable en <10 años con ahorro de gas butano/gasóleo.

- *Aerotermia (bomba de calor aire-agua)*: Cada vez más popular al reformar unifamiliares, especialmente para sustituir calderas antiguas. Se integra instalando la unidad exterior en la fachada o jardín (a ser posible alejada de dormitorios para evitar molestias sonoras). La unidad interior va donde la caldera (a veces tamaño un poco mayor, tipo frigorífico si lleva depósito integrado).
  Viabilidad: muy alta, pues al ser vivienda individual no hay problemas de consensos vecinales. Hay que dimensionar correctamente según los m² y aislamiento de la casa; en rehabilitación conviene mejorar la envolvente para reducir la carga térmica, así la aerotermia trabajará más eficientemente.
  Espacio: similar a A/A, un módulo de 1 m³ exterior; y ~0.5 m² interior.
  Eficiencia: en Madrid COP medio ~3; si la vivienda tiene suelo radiante o radiadores sobredimensionados mejor, ya que con calefacción a 45 °C la bomba de calor rinde más (COP 4) que si tiene que dar agua a 60 °C para radiadores viejos (COP baja). En verano provee refrigeración (valor añadido respecto a caldera).
  Coste: para 150 m² ~8.000-12.000 € instalada (varía), pero con ayudas puede bajar un 30%.
  Restricciones: cumplir distancias a linderos por ruido si hay vecinos colindantes; en general niveles de <50 dB a 1 m cumplen normativas municipales de ruido nocturno si está al aire libre (en Madrid, 45 dB límite nocturno en exterior residencial). Se puede mitigar con setos, pantallas.

- *Geotermia*: Perfectamente posible si la parcela lo permite. Algunos chalets en Madrid ya tienen geotermia para climatización (sobre todo viviendas de gran superficie y precio).
  Condiciones: se necesita bien un jardín para captador horizontal (requiere extensión, ej. 300 m² de terreno para una casa de 150 m²), o perforar 1-2 pozos en el jardín o garaje (tener en cuenta limitaciones geotécnicas). Se suele hacer durante una reforma integral (entra maquinaria de perforación antes de terminar jardinería).
  Ventajas: el sistema es invisible, silencioso y más eficiente que la aerotermia, con ahorro en electricidad estable.
  Limitaciones: inversión alta, fácilmente 15.000-20.000 € o más que la aerotermia, difícil de justificar salvo en casas con consumo elevado o interés ecológico fuerte.
  Normativa: En suelo urbano no suele haber problema con pozos cerrados; si la zona es protegida hidrogeológicamente, habría que ver.
  Eficiencia: COP medio ~4-5, con lo que cubre calefacción a coste muy bajo.
  Combinación: Es ideal acoplarla con suelo radiante o fan-coils.

- *Biomasa*: Una casa aislada puede tener desde una estufa de pellet (local, calentando sala principal) hasta caldera conectada a radiadores. En entorno rural es bastante común por la disponibilidad de leña o pellet más barato que propano.
  Ventaja: independencia de compañías energéticas, se puede almacenar combustible para todo el invierno.
  Espacio: para pellets, silo de unos 2-3 m³ (sacos) o un cuarto para leña.
  Limitación: si la casa está en casco urbano denso (p. ej. un pueblo) hay que vigilar no molestar con el humo a vecinos; en general con pellet de calidad y caldera moderna el humo es casi invisible excepto al encender.
  Regulación: en Madrid ciudad no se permiten nuevas chimeneas de leña abiertas[17], pero estufas cerradas sí (aunque se recomienda evitar por contaminación). En unifamiliar fuera del núcleo, sin problema.
  Mantenimiento: usuario debe vaciar cenizas semanal o mensualmente, y hacer limpieza anual.
  Coste: caldera + instalación ~8.000 €, estufas desde 1.500 €.
  Caso particular: muchas viviendas combinan una termoestufa de leña/pellet con solar térmica, así cubren ACS y parte calefacción solar, y usan la estufa en días muy fríos o nublados.

- *Minieólica*: En parcelas grandes y expuestas (por ejemplo, una vivienda en lo alto de un cerro o en un valle con brisa constante) podría instalarse un pequeño aerogenerador.
  Típico: un molino de 1 a 3 kW en un mástil de ~12 m.
  Integración: requiere cimentación y un sitio separado de la casa (por seguridad, ruido).
  Viabilidad en Madrid: solo zonas muy concretas de la sierra con buenos vientos (>5 m/s). En urbanizaciones arboladas o enclavadas, no vale la pena.
  Regulación: habría que pedir licencia, justificando estructuralmente y medidas de seguridad (distancia a linderos al menos la altura del mástil).
  Coste: ~5.000-10.000 € con baterías.
  Producción: variable; puede generar 100-500 kWh/mes si hay buen viento, pero cero en días calmos.

- *Minihidraúlica*: Solo concebible si la finca atraviesa un arroyo con caída. Pocas fincas en Madrid así (quizá fincas rústicas en la Sierra). Podría restaurarse un antiguo molino para generar 2-5 kW si hay caudal. Son casos tan específicos que no los desarrollamos.

- *PVT híbridos*: Un chalet con poca cubierta pero se desea maximizarla; podría usar paneles PVT para tener electricidad y ACS a la vez.
  Caso práctico: vivienda con piscina climatizada: los PVT calientan el agua de la piscina y dan electricidad para la depuradora y otros usos. Al ser relativamente nueva la oferta, un instalador especializado sería necesario.
  Consideración: se debe dimensionar un buen volumen de acumulación para aprovechar todo el calor capturado.

- *Hidrógeno*: Todavía ciencia ficción en escala doméstica. Un propietario muy pionero podría, en teoría, instalar un electrolizador doméstico con excedentes solares de verano, almacenar hidrógeno en depósitos especiales y en invierno usar una celda de combustible. Pero a nivel comercial casi no hay equipos integrados así (sí prototipos en Europa). Quizá en una década, de momento ningún impacto real.

Comparativa eficiencia/costes: En una vivienda unifamiliar bien rehabilitada (aislada) de, aproximadamente, 150 m², el consumo anual podría ser ~10.000 kWh térmicos (calefacción+ACS) y 5.000 kWh eléctricos. Con FV 5 kW se generan ~7.500 kWh eléctricos año (buena parte autoconsumidos). Con aerotermia COP 3, esos 10.000 kWh térmicos requieren ~3.300 kWh eléctricos, que podrían venir en gran medida de los paneles solares, haciendo la casa casi autosuficiente gran parte del año. Con geotermia COP 5, solo ~2.000 kWh eléctricos harían falta para climatización, garantizando prácticamente cero emisiones si se alimenta con solar (y excedentes solar a un coche eléctrico, por ejemplo). Con biomasa, se comprarían unos 2.000 kg de pellet al año para cubrir calefacción – neutro en CO_2 pero con pequeñas emisiones locales. En fin, la unifamiliar ofrece la máxima libertad para implementar renovables y alcanzar incluso estándar Passivhaus Plus o EnerPHit (edificio de energía casi nula con PV).

Restricciones normativas: Aparte de las ya comentadas (ruido de bombas de calor, humos de biomasa, licencias de obra para sondeos, etc.), recordar que las instalaciones deben ser realizadas conforme al RITE y la ITC-BT-40 (para la parte eléctrica de renovables). También, si es vivienda protegida o catalogada, habrá que coordinar con Patrimonio cualquier cambio en envolventes.

6.2.2. Edificios residenciales plurifamiliares

Tienen elementos comunes (cubierta, fachadas, instalaciones centralizadas o individuales según el caso). Representan un porcentaje alto del parque edificatorio urbano en Madrid.

Integración de renovables:

- *Solar fotovoltaica:* La principal barrera aquí es la superficie de cubierta disponible por vivienda. En un bloque de, por ejemplo, 10 pisos y 4 viviendas por planta (40 viviendas), la azotea quizás tiene 400 m², de los cuales útiles para paneles tal vez 200 m² (resto ocupado por casetón, equipos, retranqueos). 200 m² dan para ~30 kW FV. Repartido entre 40 viviendas, si fuera a compensar consumo individual, tocarían a 0.75 kW cada una (muy poco, apenas un par

[17] https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/El-Ayuntamiento/Publicaciones/Listado-de-Publicaciones/Ordenanza-de-Calidad-del-aire-y-Sostenibilidad/?vgnextfmt=default&vgnextoid=7be9e2e7a00e5710VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnextchannel=f1aebadb6b997010VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD

de paneles por piso). Sin embargo, hay fórmulas para maximizar el beneficio: instalar la FV para autoconsumo compartido cubriendo las necesidades de las zonas comunes (iluminación, ascensor, bombas) y parte de cada vecino. El RD 244/2019 permite hacerlo con un coeficiente de reparto acordado. Muchas comunidades optan por un sistema intermedio: X kW dedicados 100% a offset de consumo comunal (lo cual suele tener rápida amortización, pues la comunidad paga tarifa cara en pasillos, etc.), y el resto repartido entre vecinos voluntarios que invierten.

Otra consideración: la orientación y sombras. En ciudad, edificios contiguos pueden sombrear la azotea de otros, sobre todo en bloques bajos. Se suelen montar estructuras elevadas o usar las inclinaciones óptimas y quizás ocupar también faldones de cubierta inclinada si existen.

Tramitación: se necesita acuerdo de la comunidad de propietarios (por mayoría simple, al ser mejora de eficiencia según Ley de Propiedad Horizontal reformada en 2021). Muchas comunidades en Madrid han comenzado a instalar paneles con apoyo de ayudas (Programa de Autoconsumo IDAE).

Eficiencia/coste: similar a en unifamiliar por kW instalado (~1.000 €/kW), pero al ser más grande puede salir algo más barato por economía de escala. Retorno: 5-8 años para lo invertido en zonas comunes, y 7-10 para lo de particulares (depende cuánto consuman en horario solar).

- *Solar térmica (ACS central):* Desde 2006, el CTE obligó a edificios nuevos a tener solar térmica, por lo que muchos bloques construidos entre 2006-2019 en Madrid ya la tienen (con resultados dispares de mantenimiento). En rehabilitación de un edificio existente, se podría añadir un sistema solar para ACS centralizada, pero muchos edificios antiguos no tienen ACS central, sino calentadores individuales en cada piso. Convencer a todos los vecinos de migrar a un sistema colectivo de ACS solar puede ser difícil, a menos que se aproveche otra obra (por ejemplo, se quita gas individual y se pone aerotermia central con apoyo solar; es un cambio complejo pero posible en rehabilitaciones integrales). Más habitual es que si el edificio ya tiene una caldera comunitaria de ACS, entonces sí se plantea añadir paneles solares para apoyar.

  Espacio: para un bloque de 40 viviendas, hacer cubrir el 60% de ACS requiere unos ~40-50 m² de paneles y un depósito de varios miles de litros. En la azotea eso puede caber; el depósito puede ubicarse en sala de calderas en planta baja, pero entonces hacen falta tuberías solares de ida/vuelta (lo que implica recorrido largo). A veces se opta por poner el depósito en la propia cubierta para minimizar longitudes (pero requiere reforzar forjado de cubierta por peso).

  Ventajas: alto aporte renovable obligatorio cumplido, ahorro de gas significativo.

  Inconvenientes: mantenimiento más exigente (instalación grande necesita servicio profesional periódico), riesgo de desequilibrio si unas viviendas consumen mucho ACS y otras poco (los "derrochadores" se llevan más beneficio de la solar común).

  Normativa: si se rehabilita integralmente el edificio, el CTE HE4 obligará a ese 60-70% de renovable en ACS, y la solar térmica es la vía clásica. Alternativas modernas (aerotermia) compiten.

- *Aerotermia:* Aquí hay dos enfoques: centralizada o individual por vivienda. Centralizada significa quitar, por ejemplo, la vieja sala de calderas de gas y poner en su lugar una o varias bombas de calor aire-agua de gran tamaño que den calefacción/ACS a todos mediante el circuito existente. Esto conlleva: ubicación de unidades exteriores (probablemente en la azotea, se pueden colocar modulares en batería), adaptación de emisores si antes se trabajaba a 80 °C (quizá implementar baja temperatura con aerotermia y subir caudal, o cambiar radiadores a otros mayores). Varios edificios en rehabilitación han optado por esta vía, sobre todo si aspiraban a eliminar combustibles fósiles completamente.

  Ventaja: los vecinos no tienen que hacer casi nada dentro de casa, se sigue con el sistema central, pero ahora más eficiente y ecológico. Financiación: pueden acogerse a ayudas (PREE, etc.) por cambio a renovable.

  Limitaciones: la potencia necesaria puede ser muy alta (ej. un bloque 40 viviendas bien podría necesitar 200 kW térmicos pico en pleno invierno). Instalar bombas de calor de 200 kW implica quizás 4 máquinas de 50 kW, con un área ocupada notable y requerimiento de electricidad (quizá haya que ampliar la acometida eléctrica del edificio, contratar más potencia, etc.). Además, en caso de olas de frío extremas, la aerotermia central podría requerir resistencias de apoyo o un sistema híbrido con caldera auxiliar para evitar quedarse corta. Otro enfoque es individualizar, es decir, que cada vivienda disponga de una instalación propia de aerotermia (por ejemplo, compactos tipo monobloc en la fachada, o biblock con unidad exterior en fachada/azotea comunitaria). Esto es frecuente en rehabilitaciones donde la comunidad no se pone de acuerdo: algunos vecinos por su cuenta quitan su caldera de gas y ponen un equipo aerotérmico (probablemente con un depósito compacto de 150 l y fan-coils o suelo radiante).

  Problema: en una fachada de edificio, si muchos empiezan a colgar unidades, puede ser antiestético y ruidoso. Aquí la comunidad debe regularlo: se puede reservar un espacio en cubierta para ubicar las unidades de aerotermia de quien quiera (agrupándolas), o en la fachada interior.

  Normativa local: en Madrid, las unidades exteriores suelen ir ubicadas en el elemento común de fachada, por lo que requiere permiso de la comunidad. La normativa urbanística de Madrid, prohíbe la ubicación en fachada en la zona centro. En general, la tendencia en edificios residenciales es que, para alcanzar Edificio de Energía Casi Nula, se acabe pasando a sistemas centralizados renovables (aerotermia central más solar). De hecho, muchos edificios nuevos están optando por aerotermia centralizada con contadores de energía por vivienda, eliminando las instalaciones de gas. En rehabilitación, se puede replicar.

  Eficiencia: la aerotermia central se beneficia de escala, pero también sufre las mismas bajadas de COP en picos de frío; es crucial diseñar con buen margen.

  Espacio: se necesita un sala técnica para los depósitos de inercia/ACS, bombas, etc., y espacio exterior para las unidades.

  Coste: alto, pero por vivienda puede no ser tanto si se reparte (p.ej. una inversión de 100.000 € entre 40 viviendas son 2.500 € cada una, más instalación interior si hace falta modificar).

- *Geotermia:* Menos común pero muy interesante en edificios multifamiliares. Se han realizado proyectos en que comunidades instalan pozos geotérmicos en el patio o bajo la acera (con permiso) para climatización central.
  Caso: un bloque en Madrid de los años 60 con calefacción central por gasoil podría optar por perforar 10-15 sondas geotérmicas en su jardín comunitario y conectar una bomba de calor central a la red de radiadores (posiblemente transformada a baja temperatura con fan-coils). Esto eliminaría el combustible fósil y estabilizaría costos.
  Ventaja: en bloque grande se aprovecha economía de escala; el coste de perforación por vivienda baja comparado con una sola casa.
  Dificultad: lo de siempre, organizar la obra y la inversión inicial conjunta.
  Permisos: si se hacen en terreno privado comunitario, es viable; si no hay, quizá se puede, en colaboración con el Ayuntamiento, perforar bajo aceras adyacentes siempre que luego se reponga, aunque no es trivial.
  Eficiencia: altísima, y especialmente en bloques mejora en confort (podría incluso refrigerar el edificio en verano pasivamente).
  Ejemplo real: en Bilbao, comunidad de 96 viviendas integró geotermia y solar en rehabilitación (Proyecto Opengela); en Madrid hay ejemplo en Vallecas con 150 m de sondeos.
  Normativa: exige proyecto técnico.

- *Biomasa:* Algunos edificios residenciales grandes, sobre todo fuera de Madrid capital, han cambiado sus calderas comunitarias a pellet.En la ciudad de Madrid, la ordenanza de Calidad del Aire y Sostenibilidad (OCAS), excluye la condición de renovable de la biomasa para para la producción de ACS. El inconveniente mayor es dónde poner el silo de pellets. En edificios con garaje amplio se puede destinar un box; en otros, instalar un contenedor-silo en un patio.
  Emisiones: se debería poner al menos multiciclón para partículas.
  Ruido: las calderas de pellet llevan ventiladores, pero no son muy ruidosas, y estarían en sala aislada. Un punto a favor: si el edificio está en una zona con mala calidad de aire, los propios vecinos quizás no quieran biomasa, prefieren bomba de calor; pero en pueblos con leña abundante, puede ser al revés (prefieren aprovechar la biomasa local).
  Coste: similar a cambiar a gas en cuanto a caldera (~30.000 € en edificio mediano), más 10.000 € del silo y chimenea.
  Mantenimiento: se debe contratar una empresa para limpieza semestral y retirada de cenizas.

- *Minieólica:* En edificios residenciales urbanos, es muy poco habitual. La azotea de un bloque podría albergar 1-2 aerogeneradores pequeños (<=5 kW) si no hay oposición vecinal.
  Problemas: vibraciones transmitidas al forjado de cubierta (pueden causar ruidos o microsismos perceptibles en plantas superiores), riesgo en tormentas fuertes (hay que diseñar anclajes robustos).
  Caso: un edificio en Albacete instaló en 2009 un aerogenerador de 1,75 kW en su azotea como piloto. En Madrid no se conocen muchos casos.
  Viabilidad: solo si edificio es muy alto y aislado como para tener viento laminar, si no, la producción no justificaría su instalación.
  Combinación: podría complementarse con fotovoltaica en la misma cubierta.
  Regulación: la comunidad debe aprobarlo, y el ayuntamiento evaluaría seguridad (probablemente requiera informe técnico visado).

- *PVT*: En un bloque de viviendas, el PVT podría ser útil si el techo es muy pequeño pero se quiere a la vez electricidad y solar térmica. Por ejemplo, un edificio de 4 plantas con solo 100 m² de azotea: se podría poner PVT para cubrir parte de ACS y algo de luz de escalera.
  Retos: la gestión compartida, pues generará dos tipos de energía para consumos distintos; lo más lógico sería que ambas fueran comunitarias (ACS central y electricidad comunitaria). Dado que muchos edificios antiguos no tienen ACS central, el PVT no suele ser lo primero a instalar; se preferirá PV solo para electricidad comunitaria. Quizá en edificios terciarios (ver siguiente sección) tenga más sentido.

- *Hidrógeno:* En la actualidad, no aplicable en residenciales. A futuro, si la red de gas inyecta un porcentaje de H_2, las calderas individuales o comunitarias lo usarán sin que el edificio deba hacer nada (más que asegurarse de tener equipos adaptados). Por ejemplo, Nedgia (Gas Natural) ha anunciado pruebas con mezcla 20% H_2 en gas en algunos barrios[18]. Si prospera, las comunidades con caldera de gas tal vez consuman parte renovable sin enterarse. Pero hidrógeno puro en edificios residenciales requeriría tuberías dedicadas y medidas de seguridad (detectores de fugas, etc.), por su alta volatilidad, por lo que no parece viable en un futuro a medio plazo.

Comparativa en edificios residenciales plurifamiliares:

Tecnología	Viabilidad Técnica	Beneficio potencial	Limitaciones clave
Solar Fotovoltaica	Alta (en casi todos los tejados se puede poner algo)	Reduce consumo común y de viviendas (ahorro 20-40% luz). Retorno medio 5-8 años con ayudas.	Espacio limitado por vivienda; reparto de energía entre vecinos; sombras en ciudad.
Solar Térmica	Media (si hay ACS central o se implementa)	Aporta 50-70% del ACS anual, obligatorio en rehabilitación integral.	Requiere centralizar ACS; mantenimiento; depósito voluminoso; sobrecalentamiento verano.
Aerotermia Central	Media-Alta (viable sustituyendo caldera comunitaria)	Calefacción y ACS renovable, COP ~3; sin emisiones locales; reduce 60-75% consumo gas.	Inversión elevada; requiere espacio para unidades exteriores; depende red eléctrica; rendimiento menor en picos fríos.

[18] https://www.viessmann.es/es/consejos/tecnologia-y-sistemas/calefaccion-con-hidrogeno.html

Tecnología	Viabilidad Técnica	Beneficio potencial	Limitaciones clave
Aerotermia individual	Alta (cada piso puede instalar si comunidad lo aprueba)	Elimina gas en esa vivienda, aporta AC además de calor. Independencia por piso.	Impacto estético en fachada; posible ruido; dificultad técnica si muchos la instalan a la vez (carga eléctrica del edificio).
Geotermia	Media (posible en bloques con patio/ perforación)	Climatización muy eficiente (COP 4-5) incluso en invierno extremo . Sin ruido exterior. Mejora valor edificio (sello verde).	obra compleja (perforaciones en terreno construido); requiere acuerdo de comunidad y personal especializado para operación.
Biomasa (pellets)	Media-Baja en ciudad (Alta en pueblos)	Fuente renovable gestionable; combustible económico; aprovecha caldera existente cambiando quemador a pellet en algunos casos.	Emisiones partículas NO_x (no apto en centro urbano por restricciones [21]); silo ocupa espacio; requiere logística de suministro periódico; mantenimiento y cenizas.
Minieólica	Baja (casos puntuales)	Complementa solar nocturno; visibilidad "eco" en edificio.	Viento insuficiente en ciudad; vibraciones y ruido posibles; producción incierta; difícil amortización.
PVT híbrido	Media (poco implementado aún)	Máximo aprovechamiento de cubierta: dual energía. Ideal para edificios con ACS central y demanda eléctrica simultánea.	Tecnología cara; complejidad técnica (doble circuito); pocos instaladores con experiencia; mejor con gestión energética avanzada.
Hidrógeno	Nula hoy (futura)	Podría descarbonizar redes de gas existentes sin cambiar radiadores; uso en pilas de combustible daría cogeneración in-situ.	Sin infraestructura actual; eficiencia global baja; preocupaciones de seguridad (gas muy inflamable); horizonte post-2030.

Tabla 6.1: Viabilidad comparativa de fuentes renovables en edificios residenciales plurifamiliares. Elaboración propia.

Restricciones de normativas específicas de Madrid para bloques:

Ya se mencionó la Ordenanza de Calidad del Aire y Sostenibilidad que penaliza la biomasa.

En cuanto a la solar, Madrid tuvo una Ordenanza Solar Térmica desde el 2003[19] (aunque quedó en segundo plano tras cambio CTE). Urbanismo suele pedir que los paneles sobresalgan ≤1 m y retraídos de borde de fachada 1 m, para no ser vistos desde la calle.

[19] La ordenanza fue anulada por sentencia del TSJ en junio 2007

Los edificios en el Centro Histórico necesitan autorización de Patrimonio para los paneles, pero por lo general se conceden si no dañan vistas. Las bombas de calor exteriores deben cumplir la Ordenanza de Protección Contra la Contaminación Acústica y Térmica (O.P.C.A.T), al igual que los aerogeneradores si los hubiera.

Muy importantes son los acuerdos de la comunidad de propietarios: La Ley de Propiedad Horizontal (LPH) facilita que con 1/3 de los propietarios a favor se puedan instalar energías renovables comunes. Para instalaciones privativas en zonas comunes (ej: paneles para uso de algunos vecinos), también la LPH permite con la aprobación de 1/3 de los comuneros, instalar autoconsumo compartido en la azotea, debiendo permitir el acceso. Esto es un avance legal que los arquitectos deben conocer para asesorar a comunidades.

6.2.3. Edificios terciarios e industriales

Edificios de oficinas, edificios administrativos, centros comerciales, hospitales, colegios, naves industriales, etc. Tienen mayores consumos energéticos totales que los residenciales, a menudo concentrados en horario laboral diurno (en oficinas y fábricas, por ejemplo) o con demandas muy continuas (hospitales 24/7). Tienen también generalmente mayor superficie disponible (cubiertas más grandes proporcionadas al consumo, parcelas extensas en el caso de industrias) y menos limitaciones vecinales (un edificio comercial puede aprovechar toda su cubierta sin reparto, ya que pertenece a un solo propietario, y normalmente no tiene viviendas adosadas a quienes molesten ruidos o humos). Por tanto, estos edificios presentan gran potencial para renovables.

Integración de renovables:

- *Solar fotovoltaica:* Es casi obligada en terciario e industria actualmente. Muchas naves industriales en polígonos de Madrid están poniendo paneles en sus tejados (que suelen ser chapa planos o inclinados y amplios), instalando potencias de decenas o cientos de kW para autoconsumo. La razón: consumen bastante de día (maquinaria, iluminación, climatización) y la PV reduce inmediatamente su factura, con amortizaciones 3-6 años en sector industrial gracias a que consumen todo lo generado (evitando pagar precios elevados de red). En oficinas, ocurre algo similar: la demanda principal es aire acondicionado, iluminación y equipos en horario 9-18h, calzando bien con la producción solar. Además, desde 2022 con REPowerEU y la normativa nacional, se incentiva y hasta obliga a edificios terciarios a incorporar PV. La propuesta EPBD recast dice que todos los edificios no residenciales nuevos o que se renueven integralmente deben integrar tecnologías solares (fotovoltaica o térmica) si es viable. España ya antes había sacado en CTE HE5 la exigencia de PV para edificios terciarios grandes (por ejemplo, edificios >3000 m² o potencias instaladas importantes). Por tanto, en rehabilitación de edificios terciarios de cierto tamaño, es de esperar que se incorpore fotovoltaica.
  Viabilidad técnica: muy alta, ya que suelen tener azoteas amplias. A veces compiten con otros usos de cubierta (HVAC, helipuertos en hospitales, etc.), pero salvo casos puntuales, siempre hay hueco para muchas filas de paneles.

Restricciones: en edificios de oficinas representativos puede primar la estética (no quieren paneles visibles desde calle; solución: integrarlos en la cubierta técnica plana detrás de petos, o en fachadas acristaladas con módulos semitransparentes BIPV).
Caso: el Edificio Castellana 81, tras rehabilitarse, integró PV en su nueva envolvente de muro cortina para generar parte de su consumo, de forma estética[20]. Para naves industriales o centros comerciales, la estética suele importar menos y se cubre todo el techo de paneles incluso visibles.
Trámites: en industria es sencillo por autoconsumo, y pueden verter excedentes legalmente (muchas instalan sin vertido con antivertido porque consumen todo).
Eficiencia/coste: este sector logra mejores economías de escala, precios instalados de 600-800 €/kW en grandes plantas, muy rentables.

- *Solar térmica:* En terciario tiene nichos concretos: edificios con gran consumo de ACS o calor de proceso a baja temperatura.
  Ejemplos: hospitales (agua caliente sanitaria para pacientes, lavandería), hoteles (agua de habitaciones, piscinas, spas), polideportivos y gimnasios (duchas, piscinas climatizadas), lavanderías industriales, cocinas centrales, etc. En esos casos, la solar térmica puede cubrir una fracción importante, y de hecho muchas instalaciones de ese tipo en Madrid ya tienen grandes campos de captadores. Por ejemplo, el Hospital de Fuenlabrada incorporó 400 m² de paneles solares térmicos en su azotea desde la construcción, cubriendo parte del ACS hospitalario. En rehabilitación, un hotel de 20 años podría añadir solar para cumplir normativa y ahorrar fuel.
  Viabilidad: se necesita espacio en cubierta o terrazas. A veces compite con fotovoltaica, por lo que se evalúa qué es más rentable para el uso dado (últimamente, la PV con aerotermia está desplazando a la solar térmica en muchos casos).
  Beneficio: reduce consumo de gas o diesel en calderas, con amortizaciones en 5-8 años si la instalación se usa intensivamente todo el año (un error común en hoteles es sobredimensionar solar térmica y luego en verano no saber qué hacer con tanto calor: debe dimensionarse a la base).
  Restricciones: CTE HE4 exige renovables en ACS también en terciario (hospitales >100 l/d, hoteles, residencias), pudiendo ser solar o alternativa.
  Integración: en edificios con fachada adecuada, se pueden poner captadores integrados verticales (menos producción pero a veces la única opción si la cubierta está llena de equipos).
- *Aerotermia / Bombas de calor*: En terciario e industrial esto en realidad abarca muchas variantes: rooftops de climatización, VRV (volumen refrigerante variable) en oficinas, enfriadoras con bomba de calor, etc. Desde hace años la climatización comercial se ha electrificado con bomba de calor por el tema del aire acondicionado; es decir, la mayoría de oficinas ya usan bombas de calor (para frío seguro, y a menudo reversibles para calor). Por tanto, la novedad es extenderlo también a la producción de calor para calefacción y ACS que antes hacían calderas convencionales. Por ejemplo, en edificios de oficinas con suelo radiante, antes alimentado por caldera de gas, se ha sustituido la caldera por una bomba de calor aire-agua. O en centros comerciales que tenían climatizadoras con baterías de agua caliente de caldera de combustible, que ahora emplean bombas de calor integrales.
  Ventaja: unifica el sistema en electricidad, evitando gas. Muchas sedes corporativas buscan eliminar el gas por temas de huella de carbono corporativa.
  Eficiencia: las bombas de calor grandes (tipo scroll o screw) pueden tener COP muy buenos en clima templado. En Madrid, oficinas suelen requerir más frío que calor (edificios acristalados, muchos equipos), por lo que la bomba de calor trabaja más bien como enfriadora la mayor parte del tiempo, y ese es su fuerte. En invierno puede invertir a calefacción y aún así rendir decente.
  Integración: la mayoría de edificios terciarios tienen ya espacio para equipos en cubierta o salas de máquinas. Cambiar una enfriadora + caldera por una bomba de calor a veces es tan sencillo como instalar un módulo extra en la enfriadora existente para que invierta ciclo.
  Industria: aquí hay dos escenarios, climatización de nave (que puede ser con aerotermos, etc., donde la aerotermia es posible pero a veces se tira de gas o biomasa) y calor de proceso. Para calor de proceso de baja/media temperatura (<100 °C), empiezan a usarse bombas de calor de alta temperatura. Por ejemplo, una industria alimentaria que precise agua a 80 °C podría usar una bomba de calor especial en lugar de una caldera de gas, siempre que disponga de suficiente energía eléctrica (o solar). No es común aún, pero se investiga. En rehabilitación industrial, hay proyectos de sustituir calderas de vapor por sistemas híbridos solar térmica + bomba de calor + almacenamiento térmico para ciertos procesos.

- *Geotermia:* Muy atractiva en edificios terciarios de gran tamaño (torres de oficinas, campus corporativos, etc.). Varios edificios emblemáticos han apostado por geotermia para lograr certificaciones LEED o BREEAM y reducir costes operativos.
  Ejemplo: La Torre Borealis en BBVA Ciudad (Las Tablas) usa geotermia de 100 m de profundidad; también el Museo de Arte Contemporáneo en Madrid implementó sondeos geotérmicos.
  Viabilidad: en obra nueva es más fácil, pero en rehabilitación se puede hacer si hay terreno alrededor o sótano con posibilidad de perforar. Por ejemplo, torres en AZCA (Madrid) con plaza exterior podrían perforar bajo ella.
  Eficiencia: altísima en régimen de oficina, donde se puede aprovechar intercambio estacional: en verano se inyecta calor en el suelo (climatizando el edificio), "recargando" el terreno, y en invierno se extrae. Este balance mantiene el subsuelo en temperatura óptima. Así se logran COP globales >5.
  Coste: se justifica en edificios de alto consumo, porque aunque son cientos de miles de euros, luego ahorras decenas de miles anuales en energía. Además, muchas veces se combina con sistemas de bomba de calor agua-agua reversibles que dan frío y calor simultáneamente a distintas zonas del edificio con eficiencias muy altas (reaprovechando calor sobrante de unas zonas para darlo a otras, etc.). La geotermia actúa de "pulmón térmico" para equilibrar.

[20] https://grupogmp.com/castellana-81-primera-torre-de-oficinas-de-espana-con-sellos-smartscore-y-wiredscore-platino/

Restricciones: las mismas de perforación: permisos, no interferir con servicios subterráneos (metro, instalaciones urbanas). Un estudio geológico es obligatorio.

- *Biomasa:* En edificios terciarios en entorno urbano, la biomasa ha tenido algunos usos pero cada vez menos por las emisiones.
  Donde se ve: calderas de biomasa en colegios, polideportivos o edificios municipales en pueblos (hay varios en la sierra de Madrid con calderas de pélets para calefacción). En la ciudad, algún centro deportivo con piscina ha usado biomasa, pero en Madrid capital lo han ido frenando.
  Industriales: Si la industria genera residuos biomásicos (ej. carpinterías con serrín, agroindustrias) es perfecto usarlos en su caldera, reduciendo residuos y energía. Varias empresas madereras, por ej., queman sus restos para secar madera. En rehabilitación industrial, si antes tiraban esos residuos, se valora montar una caldera de biomasa para calor de proceso.
  Limitación: controles ambientales (las industrias deben cumplir límites de emisión, se pide cyclones o filtros). En oficinas privadas, raramente se optará por biomasa, excepto quizá para district heating aislados.
  Normativa: en Madrid capital, la nueva Ordenanza no la favorece. A nivel estatal, las instalaciones de biomasa >1 MW tienen que cumplir la Directiva de Emisiones Industriales (DEI) para medianas instalaciones de combustión, con límites severos de $NO_{X,}$, PM, etc., lo cual exige equipos avanzados.

- *Eólica (minieólica/urbana):* Algunos edificios terciarios singulares han integrado aerogeneradores como parte de su diseño sustentable.
  Ejemplos internacionales: Torre PwC en Bahrein (3 turbinas entre torres), Torre Strata en Londres (3 turbinas integradas en coronación), edificio Infinity en Madrid (sede Acciona) integró una pequeña turbina en fachada experimentalmente. En general, los resultados no han sido muy buenos en producción, pero sí en marketing verde. En polígonos industriales: alguna nave con terreno instala un aerogenerador mediano (50-100 kW) si está en las afueras con buen viento. En la Comunidad de Madrid hay parques eólicos medianos en pueblos como Alalpardo (Fuentesañada – 8 MW, aunque no es minieólica sino eólica convencional). Minieólica propiamente: pocos casos.
  Viabilidad: Edificios terciarios altos podrían tener viento en altura, pero la turbulencia entre rascacielos también es alta, así que muchas veces se opta por no arriesgar.
  Restricción: calculo estructural crítico; en rascacielos, añadir masas en altura es delicado.
  Regulación: sin marco específico; dependerá de licencia particular. En polígonos, un aerogenerador <100 kW puede tramitarse como generación distribuida normal.
- *PVT / otras híbridas:* Un edificio que necesite a la vez electricidad y calor a techo limitado (ej. Un restaurante grande con demanda de electricidad y ACS para cocina) podría poner PVT. También en procesos industriales que requieran calor <70 °C y electricidad, un campo PVT puede tener más rendimiento total (aunque muchas industrias preferirán PV + caldera o PV + bomba de calor por flexibilidad). La emergente cogeneración solar (células PV que almacenan calor – proyectos de I+D) podría en futuro dar dual output. Por ahora, PVT se ve más en hoteles y similares.

- *Hidrógeno / Cogeneración*: Edificios terciarios a veces disponían de motores de cogeneración a gas (CHP) para electricidad + calor. En un plan de descarbonización, estos motores se podrían convertir a biogás o hidrógeno en un futuro. Ya existen pilas de combustible para edificios, en Japón es común en el uso residencial, en Europa la empresa CFCL probó unidades de 1 kW en hogares. En terciario, se venden sistemas de pila de 5-10 kW para edificios de oficinas pequeños, capaces de dar electricidad (de respaldo o continua) y para producción de ACS. El hidrógeno verde podría alimentar estos equipos si se dispone, por ejemplo, de pilas de combustible de emergencia. En data centers, se están planteando reemplazar generadores diésel por pilas H_2 para backup. Un edificio de oficinas con centro de datos podría instalar uno para emergencias en casos de rehabilitación. De momento es un nicho experimental.

Nota sobre District Heating: En terciario urbano (e incluso residencial) pueden existir redes de calor y/o frío urbanas. En Madrid Río hay una central de district heating de biomasa que da servicio a edificios. También el Distrito Castellana Norte planea una central de frío. Estas infraestructuras permiten integrar renovables a gran escala (biomasa, bombas de calor sobre aguas residuales, etc.) y luego suministrar a edificios. En rehabilitación de un edificio, si pasa a estar cerca de una red así, puede conectarse. En la actualidad Madrid no tiene una red de calor extensiva como otras ciudades europeas, pero se está estudiando implementar algunas en barrios (p.ej. proyecto de geo-district en Alcalá). Mencionamos esto porque puede ser relevante si en vez de instalar su propia sala renovable, el edificio se enchufa a una central renovable de distrito.

Comparativa en edificios terciarios e/o industriales

Fuente Renovable	Aplicación en Terciario/Industria	Viabilidad / Retorno	Notas
Solar PV	Cubiertas de oficinas, naves, parkings cubiertos (fotovoltaica sobre marquesinas).	Muy alta viabilidad. Retornos 3-7 años típicamente (consumo diurno elevado). Obligatorio en muchos casos nuevos.	Factor limitante: estructura de cubierta (hay que revisar carga de paneles en naves ligeras), evitar sombras de lucernarios o máquinas HVAC (diseño cuidado). Opción de *parking solar*.
Solar Térmica	ACS en hoteles, hospitales, gimnasios; calor de proceso <80 °C en industrias agroalimentarias.	Viabilidad media (donde hay demanda constante). Retorno 5-10 años según precio gas ahorrado.	Integrar con calderas existentes con intercambiador. Control importante para no interferir producción de frío (ej. no sobrecalentar en verano edificios refrigerados).
Aerotermia / Bombas de calor	Climatización edificios terciarios (oficinas, comercios). Reemplazo de calderas en calefacción central.	Viabilidad alta en clima de Madrid (balance frío/calor favorable). COP 3-4. Económicamente competitiva vs gas con precios actuales; elimina emisiones directas.	Requiere garantizar potencia eléctrica suficiente. En industria, bombas de calor de proceso emergen para hasta 100 °C (retornos mayores, tecnología en desarrollo).
Geotermia	Edificios representativos (oficinas HQ), centros educativos, hospitales (demanda 24h).	Viabilidad técnica media (espacio para sondeos). Económica buena a largo plazo (amort. ~10-15 años con ayudas), mejora eficiencia global del 20-40% vs aerotermia.	Suele usarse en combinación con sistemas híbridos (free-cooling, etc.). Permite *certificaciones verdes* (LEED, etc.) fácilmente por alta eficiencia. Inversión inicial elevada y compleja ejecución urbana.
Biomasa	Calefacción en edificios públicos fuera de ciudad; procesos industriales con residuo biomásico.	Viabilidad baja en ciudad (tema emisiones); alta en entornos rurales con recurso local. Retornos ~5 años si reemplaza gasóleo (pellet más barato).	Necesario espacio silo y buen mantenimiento para fiabilidad (importante en edificios de servicio continuo como hospitales: deben tener respaldo por si falla alimentador de pellet).
Minieólica	Edificios altos aislados; polígonos ventosos (molinos medianos en parcela).	Viabilidad muy baja urbano. En industria, algún retorno decente si >5 m/s medios (poco común en Madrid).	Se suele optar por eólica convencional fuera del sitio (parque eólico virtual vía PPA) en vez de miniturbina in-situ, por eficiencia.
PVT (híbrido)	Hoteles (electricidad + ACS), hospitales, lugares con tejados saturados pero doble demanda.	Viabilidad caso a caso; retorno similar a solar térmica ~7 años si aprovechado todo el año.	Reduce superficie requerida. Pocos instaladores con experiencia; se espera crecimiento en sector hotelero para lograr NZEB con tejados pequeños.
Hidrógeno / Pilas	Centros de datos (como UPS verdes), edificios con necesidad de backup sin fósil, industrias con excedentes renovables que almacenar.	Actualmente no rentable salvo proyectos demostrativos. A futuro, podría cerrar brecha estacional (almacenar verano solar para invierno).	Podría combinarse con O_2 de co-generación (ej. hospitales usando el oxígeno generado en electrólisis). Normativa emergente, todavía compleja (almacenamiento H_2 sujeto a reglamentos de gases a presión).

Tabla 6.2: Integración de renovables en edificios terciarios/industriales – viabilidad y observaciones. Fuente: Elaboración propia

Comparativa de terciario vs residencial:

- *Demanda eléctrica diurna:* favorece PV (más autoconsumo inmediato). El Residencial tiene pico nocturno que PV no cubre sin baterías; la oficina en cambio consume cuando PV produce.
- *Perfil térmico:* las oficinas tienen carga de refrigeración grande -> bombas de calor excelentes; residenciales más calefacción -> aerotermia/geotermia ok pero dimensionadas a calor.
- *Espacio:* El terciario suele tener cubierta suficiente para cubrir buena parte de consumo con PV. El uso industrial, a veces incluso exporta excedente (pueden poner hasta 1 MW en techo pero solo usar 500 kW, vendiendo la producción restante).
- *Economía:* las empresas/instituciones pueden hacer inversiones mayores con ROI a más largo plazo que un particular medio, lo que hace más factible geotermia, etc.
- *Regulación:* EPBD y CTE son más estrictos con terciario grande (piden PV obligatoria, piden mejor eficiencia en iluminación, etc.). También la descarbonización de administraciones públicas va más rápido: los edificios públicos deben ser ejemplares

en renovables. En la Comunidad de Madrid hay programas para que colegios, ayuntamientos, etc., instalen renovables (varias bibliotecas y centros de salud ya tienen paneles).

- *Ayudas:* Además de las generales, en sector industrial existe deducción fiscal por autoconsumo, y en terciario pueden optar a contratos PPA, etc.

Mención a ayudas y financiaciones: Si bien el detalle es materia del capítulo 9, no se puede dejar de señalar que la viabilidad económica de muchas de estas intervenciones mejora sustancialmente con subvenciones, deducciones fiscales o compra colectiva de energía. En el sector terciario/industrial existen líneas específicas (por ejemplo, programas IDAE de eficiencia industrial, ayudas de Fondos Europeos para autoconsumo en empresas, contratos bilaterales PPA para solar, CAEs, etc.). Para comunidades de propietarios, programas como PREE o los gestionados por la Comunidad de Madrid (PRAAST), el Ayuntamiento de Madrid (Plan Rehabilita), etc. cubren porcentajes de la inversión en renovables. Un buen plan de rehabilitación energética debe considerar estas opciones desde el inicio, priorizando actuaciones que logren maximizar la energía renovable in situ con el menor coste neto para el propietario.

Ejemplos de integración de energías renovables en edificios terciarios y residenciales:

Edificio PSA – CIEMAT – Tabernas, Almería – Arq.: Juan José Rodríguez García



Integración de captación solar fotovoltaica, solar térmica y radiación nocturna en elementos de sombreamiento. Foto: A. Bosqued.

Edificio 70 – CIEMAT – Madrid – Arq.: Juan Carlos Gutiérrez



Integración de captación solar fotovoltaica, solar térmica en elementos de sombreamiento. Foto: A. Bosqued.

Edificio acceso CEDER, Soria – Alía Arquitectura, Energía y Medioambiente



Integración de captación solar fotovoltaica, solar térmica y radiación nocturna en elementos de sombreamiento Foto: A. Bosqued.

Vivienda unifamiliar en Madrid. Allende arquitectos. Reforma More & Co. Arquitectura y diseño.



Integración de captación solar fotovoltaica en cubierta. Foto: A. Bosqued.

7 VENTILACIÓN Y CALIDAD DEL AIRE INTERIOR

La calidad del aire interior (CAI) es un pilar fundamental de la rehabilitación energética y el bienestar en edificios. Un ambiente interior saludable reduce riesgos de enfermedades, tal como reconoce el Plan Estratégico de Salud y Medio Ambiente (PESMA) 2022-2026 de España[1], que incluye mejorar la calidad del aire interior para proteger la salud de los ocupantes[2]. En este capítulo se abordan los sistemas de ventilación y estrategias para garantizar una adecuada renovación del aire, manteniendo el confort higrotérmico y cumpliendo con la normativa vigente en la Comunidad de Madrid. Se expondrán las diferencias entre ventilación natural y mecánica, las limitaciones de la ventilación tradicional, la necesidad de controlar contaminantes (COV, patógenos, CO_2, humedad) y las soluciones actuales de ventilación mecánica de alta eficiencia energética ligadas a la ocupación real. Asimismo, se tratará el control de la humedad y la filtración del aire, con recomendaciones de diseño, mantenimiento y selección de materiales de baja emisión de contaminantes, en línea con criterios de salubridad (Ambiente Interior de certificaciones ambientales). El objetivo es ofrecer a arquitectos una visión técnica profunda, con referencias normativas (CTE DB HS3, RITE, normativa europea) y ejemplos prácticos (sistemas propuestos por fabricantes líderes como Zehnder, S&P, Siber, Duco, etc.), para integrar la ventilación eficiente en proyectos de rehabilitación energética.

7.1. SISTEMAS DE VENTILACIÓN MECÁNICA

Ventilación natural vs. ventilación mecánica. Tradicionalmente, la ventilación de las estancias se ha realizado de forma natural, mediante la apertura de ventanas y la infiltración/exfiltración a través de huecos en la envolvente. La ventilación natural depende de fuerzas motrices como la diferencia de temperatura (efecto chimenea) y el viento, por lo que es difícil de controlar: los caudales de aire pueden ser inferiores o superiores a los necesarios, variando con las condiciones exteriores. Esto acarrea problemas tanto por defecto (aire viciado, alta concentración de CO_2 y contaminantes) como por exceso (pérdida energética en climatización). Además, en entornos urbanos la ventilación natural presenta limitaciones importantes: la contaminación atmosférica exterior (partículas, humos) puede entrar sin filtros, el ruido y la seguridad dificultan dejar aberturas abiertas, y sin automatización es inviable garantizar una renovación constante. Por ello, el CTE reconoce que en muchos casos la ventilación debe ser híbrida o mecánica para asegurar caudales mínimos de aire exterior. La ventilación mecánica emplea ventiladores y conductos para forzar la extracción y/o impulsión de aire, permitiendo un control preciso de los caudales independientemente de las condiciones exteriores[3]. Esto asegura la renovación continua en los espacios habitados y, bien diseñada, optimiza el intercambio sin penalizaciones energéticas extremas.

---

[1] https://www.sanidad.gob.es/areas/sanidadAmbiental/pesma/home.htm

[2] https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/ventilacion-y-calidad-aire-interior/calidad-aire-interior-rite-cte-db-hs3.html

[3] https://www.solerpalau.com/es-es/blog/ventilacion-eficiencia-energetica/

Importancia histórica de la ventilación y salubridad. La necesidad de renovar el aire interior no es un tema reciente; desde el movimiento higienista del siglo XIX se entendió la ventilación como factor clave de la salud pública. Las ciudades modernas de aquella época fueron planificadas considerando la ventilación de las viviendas como medida sanitaria fundamental[4]. Arquitectos e ingenieros incorporaron patios, ventanas enfrentadas (ventilación cruzada) y mayores alturas para facilitar la circulación de aire fresco, combatiendo las enfermedades asociadas a espacios mal ventilados. Esta conciencia histórica sigue vigente: hoy sabemos que una ventilación adecuada reduce la concentración de compuestos orgánicos volátiles (COV) emitidos por muebles y materiales, disminuye el riesgo de patógenos en el aire (moho, bacterias, virus) y elimina el exceso de dióxido de carbono producido por la respiración humana. Un aire interior limpio y rico en oxígeno mejora la salud y el rendimiento cognitivo de los ocupantes. Tras la reciente pandemia de COVID-19, se ha reforzado la idea de que la ventilación es esencial para reducir contagios en espacios cerrados, recomendándose valores de renovación de aire elevados (por ejemplo, 12,5 L/s por ocupante, correspondiente a aire de calidad IDA 2 según RITE[5]) y funcionamiento prolongado de los sistemas incluso fuera de horarios de ocupación. En suma, la ventilación eficaz ha pasado de ser un concepto higienista a un requerimiento normativo y de diseño de primera línea.

Ventilación nocturna pasiva para refrigeración. Además de su papel higiénico, la ventilación natural puede contribuir al refrescamiento pasivo en climas cálidos continentales como el de Madrid. La estrategia de ventilación nocturna consiste en abrir huecos durante la noche para introducir aire exterior fresco, enfriando la masa térmica del edificio (paredes, forjados) que ha acumulado calor durante el día. Esa masa enfriada absorbe el calor al día siguiente, reduciendo la temperatura interior y la necesidad de aire acondicionado. En climas secos con gran oscilación térmica día-noche (≥ 10–12°C), la purga nocturna puede mantener condiciones diurnas confortables sin consumo energético[6]. Esta técnica, combinada con masa térmica suficiente y protecciones solares, mejora la resiliencia del edificio frente a olas de calor[7]. Sin embargo, la ventilación nocturna natural requiere garantías de seguridad (rejas, sistemas domóticos de apertura/cierre) y una calidad de aire exterior aceptable por las noches. En entornos urbanos, si el aire nocturno está menos contaminado y más fresco, es recomendable aprovechar esta refrigeración gratuita siempre que sea compatible con la seguridad y el control (por ejemplo, usando aperturas limitadas en planta baja, o patios interiores seguros). En rehabilitación, se puede fomentar la ventilación nocturna mediante la instalación de elementos como aireadores en fachada automatizados o la programación de aperturas motorizadas en ventanas altas o lucernarios. No obstante, conviene recordar que esta estrategia no reemplaza la necesidad de ventilación durante el día para dilución de contaminantes; se trata de una medida complementaria enfocada al confort térmico de verano.

Ventilación mecánica controlada: salubridad garantizada por normativa. Dada la imprevisibilidad de la ventilación natural, la normativa española exige dotar a las edificaciones de sistemas de ventilación que aseguren unos caudales mínimos de renovación de aire en cada local, de forma continua. En viviendas, el Documento Básico HS3 (Calidad del Aire Interior) del CTE especifica un sistema general de ventilación por caudal constante, cuyo valor depende del tipo de vivienda y número de estancias húmedas/secas, según tablas normativas. Se permite que este sistema sea híbrido (funcionando de modo natural cuando las condiciones lo permiten, y mecánico en caso contrario) o totalmente mecánico. En la práctica, muchas viviendas plurifamiliares en España utilizan ventilación híbrida: rejillas o aireadores en dormitorios y salas (aportación de aire exterior) y extracción mecánica en baños y cocinas mediante shunts o extractores en cubierta. Esto crea un flujo de aire desde estancias secas a húmedas, expulsando los contaminantes allí donde se generan (humedad, olores, COV de cocción). El caudal mínimo se fija para garantizar la dilución del CO_2 (producto de la respiración) y la humedad relativa producida por la actividad humana, así como para evacuar otros contaminantes interiores (COV de materiales, radón del subsuelo –este último abordado en HS6–). La ventilación mecánica, por tanto, es garantía de salubridad: previene concentraciones de contaminantes que causarían molestias o enfermedades en los ocupantes. En edificios de uso terciario (oficinas, docentes, sanitarios, comerciales…), el RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios) categoriza la calidad de aire interior en cuatro niveles (IDA 1 óptima, IDA 2 buena, IDA 3 media, IDA 4 baja) dependiendo del uso, y exige dotar sistemas de ventilación acorde a dichas categorías. Por ejemplo, oficinas y aulas (IDA 2) requieren 12,5 L/s·persona de aire exterior mínimo, mientras que hospitales (IDA 1) exigen ~20 L/s·persona . Alcanzar estos caudales en la práctica solo es posible mediante ventilación mecánica, dada la ocupación y cargas internas. Por ello desde 2020 la ventilación mecánica de doble flujo es prácticamente estándar en edificios de nueva construcción de alto desempeño, como los de energía casi nula (nZEB) y los proyectos Passivhaus, por su contribución simultánea a la eficiencia energética, la salud y el confort. De hecho, uno de los requisitos del estándar Passivhaus es contar con un sistema de ventilación mecánica controlada de caudal equilibrado (doble flujo) para garantizar la calidad de aire interior e higiene, dado lo herméticas que son estas construcciones[8].

Ventilación según demanda (DCV) basada en CO_2 y otros sensores. La aproximación tradicional de ventilar por caudal fijo (diseñado para ocupación máxima) puede resultar ineficiente, ya que muchas veces los espacios están parcialmente ocupados o los contaminantes generados son menores a los supuestos. Para mejorar la eficiencia sin sacrificar la calidad del aire, surgen los sistemas de Ventilación Controlada por Demanda (DCV, Demand Controlled Ventilation), que ajustan de forma automática el caudal de aire renovado en función

[4] https://es.wikipedia.org/wiki/Higienismo

[5] https://www.miteco.gob.es/en/ministerio/medidas-covid19/sistemas-climatizacion-ventilacion.html

[6] https://2030palette.org/night-vent-cooling/?lang=es

[7] https://www.cicconstruccion.com/texto-diario/mostrar/4940134/estrategia-refrigeracion-pasiva-aporta-resistencia-edificios

[8] https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/ventilacion-y-calidad-aire-interior/calidad-aire-interior-rite-cte-db-hs3.html

de las necesidades reales en cada momento[9]. Estos sistemas incorporan sensores en los locales (detectores de CO_2, sensores de compuestos orgánicos volátiles -TVOC-, humedad relativa, e incluso detectores de presencia) que monitorizan la calidad de aire o la ocupación, y regulan la velocidad de los ventiladores o la apertura de compuertas modulantes. Por ejemplo, en una sala de reuniones con poca gente, el sistema reduce el caudal de ventilación (ahorrando energía); si los niveles de CO_2 suben por encima del umbral de confort (ej. 1000 ppm), automáticamente aumenta la extracción/impulsión de aire hasta restablecer niveles óptimos. De esta manera se garantiza siempre un mínimo de aire exterior según normativa, evitando a la vez sobreventilar en vacío. Las ventajas directas de la ventilación por demanda incluyen ahorros energéticos significativos, al reducir no solo el consumo de los ventiladores sino también las cargas térmicas de climatización asociadas a calentar o enfriar ese aire. Adicionalmente, al modular caudales se puede mantener mejor la humedad interior en rangos confortables y se prolonga la vida útil de filtros (al pasar menos volumen de aire cuando no es necesario). En España, el RITE contempla métodos de dimensionado que relacionan directamente la ventilación con niveles de CO_2: por ejemplo, para categoría IDA 2 se establece un máximo de 500 ppm de CO_2 por encima del exterior, lo que sirve de base para que los sensores modulen caudales y cumplan ese criterio. Los sistemas DCV pueden ser centralizados (un climatizador ajusta caudal general según sensor promedio) o por zonas independientes. Algunos fabricantes, como Duco, han desarrollado soluciones de ventilación híbrida donde sensores inalámbricos de CO_2/humedad en cada estancia controlan tanto la apertura de aireadores en ventanas como la velocidad de un extractor central, logrando una ventilación natural/ mecánica combinada "a demanda" muy eficiente[10]. Del mismo modo, en garajes o edificios polivalentes, es común usar sensores de presencia y de contaminantes para activar la ventilación solo cuando se ocupan los espacios. Cabe mencionar que durante la pandemia de COVID-19 se recomendó en ciertos casos desactivar los controles de demanda por CO_2 (para forzar ventilación máxima constante por seguridad sanitaria), pero en condiciones normales la DCV es una estrategia óptima para equilibrar salubridad y eficiencia energética. Su correcta implementación requiere una cuidadosa calibración de sensores y un mantenimiento que asegure su fiabilidad.

Recuperación de calor y energía en ventilación mecánica. Una de las soluciones más efectivas para asegurar la calidad del aire interior sin penalizar el consumo energético es la ventilación mecánica con recuperador de calor. En estos sistemas de doble flujo, el aire exterior que se introduce se hace pasar por un intercambiador térmico donde capta la mayor parte del calor (en invierno) o del frescor (en verano) del aire que simultáneamente se extrae del edificio, antes de expulsarlo al exterior. De este modo, se pueden alcanzar eficiencias de recuperación muy altas (75–95%), reduciendo drásticamente las pérdidas de calor por ventilación[11]. Existen varios tipos de intercambiadores: los de flujo cruzado (corrientes perpendiculares, eficiencia 50–75%), los de contraflujo (corrientes paralelas en contracorriente, que logran más superficie de contacto y alcanzan hasta 95% de eficacia) y los rotativos (un rotor gira transfiriendo calor entre corrientes, con eficiencias típicas de ~85%). Los equipos modernos tienden a usar intercambiadores de contraflujo por su rendimiento superior. Con un buen diseño, un recuperador entálpico de calidad Passive House puede recuperar alrededor del 90% del calor del aire extraído, reduciendo en igual proporción la necesidad de calefacción para templar el aire entrante. Esto se traduce en ahorros energéticos considerables: estudios muestran que la instalación de estos sistemas puede recortar 30–50% de la demanda de calefacción en climas fríos[12], mejorando además la calificación energética del edificio. Por ejemplo, ciertos modelos compactos residenciales como Zehnder ComfoAir 350 ofrecen rendimientos de recuperación superiores al 90% y muy bajo consumo eléctrico gracias a ventiladores EC de alta eficiencia[13]. Asimismo, los fabricantes españoles como Soler & Palau (S&P) han desarrollado equipos descentralizados (p.ej. serie Respiro) especialmente pensados para rehabilitación, que se instalan en la pared exterior de estancias individuales y recuperan hasta ~93% del calor, evitando tener que montar una red de conductos extensa.



Figura 7.1: Unidad de ventilación de doble flujo para uso residencial.

Con el intercambiador entálpico de alta eficiencia (rendimiento >90% en recuperación de calor). Este tipo de equipos garantiza la renovación de aire con mínimas pérdidas térmicas, contribuyendo a la máxima calificación energética de la vivienda.

Además del obvio beneficio energético, la ventilación con recuperador aporta confort: se evitan corrientes de aire frío directas en invierno, manteniendo temperaturas interiores más estables. También mejora la calidad del aire, pues típicamente incorporan filtros en la admisión que eliminan partículas, polen y polvo del aire exterior antes de introducirlo. Esto es importante en entornos urbanos con polución: un recuperador con filtros F7 puede entregar aire más limpio que el exterior, protegiendo especialmente a personas con alergias o problemas respiratorios. Por último, estos sistemas suelen incluir un modo de bypass nocturno automático (derivación), que en verano permite introducir aire nocturno fresco directamente cuando conviene enfriar la casa, saltándose el intercambiador para no recuperar calor.

[9] https://www.solerpalau.com/es-es/blog/demanda-controlada-ventilacion/

[10] https://e-ficiencia.com/daikin-distribuira-unidades-ventilacion-residencial-duco/

[11] https://www.solerpalau.com/es-es/blog/ventilacion-recuperador-calor/

[12] https://www.solerpalau.com/es-es/blog/como-obtener-certificados-ahorro-energetico-cae-recuperadores-de-calor-sp/

[13] https://www.zehnder.es/es/ventilacion-saludable-de-alta-eficiencia/unidades-de-ventilacion-para-uso-domestico/zehnder-comfoair-350

Recuperadores entálpicos (recuperación de humedad). Un caso especial de recuperador de calor es el recuperador entálpico, capaz de transferir también la humedad del aire entre las corrientes de extracción e impulsión. En climas extremos (muy fríos o muy húmedos), esto supone una gran ventaja.

Por ejemplo, en invierno en Madrid el aire exterior frío suele ser muy seco; al pasar por un intercambiador entálpico, puede captar parte de la humedad que contiene el aire interior que se extrae (que tiende a ser más húmedo por la actividad humana), evitando resecar tanto el ambiente interior. A la inversa, en verano, si el aire exterior es muy húmedo, un recuperador entálpico transferirá parte de esa humedad al aire que se expulsa, reduciendo la carga de humedad que entra en casa. En definitiva, el intercambiador entálpico recupera energía latente además de la sensible, logrando un balance de entalpía entre corrientes[14]. Esto se logra con materiales especiales (membranas de resina, papel tratado o rotor higroscópico) que permiten el paso controlado de vapor de agua, pero no de contaminantes ni partículas. El resultado es una mejora del confort higrométrico interior y una pequeña ganancia adicional de eficiencia (los entálpicos suelen tener rendimientos totales algo superiores a los sensibles puros). Cabe destacar que no significa que el aire de extracción se mezcle con el de impulsión (en recuperadores de placas la separación es total; en rotativos hay una mínima mezcla por la inercia del rotor, que se considera en aplicaciones sensibles). Muchos fabricantes ofrecen versiones entálpicas de sus equipos permitiendo intercambiadores entálpicos opcionales para climas secos. En España, donde algunas regiones tienen inviernos secos y veranos húmedos, los recuperadores entálpicos ayudan a mantener la humedad relativa interior en la horquilla confortable (40–60% HR) con menor apoyo de humidificadores o deshumidificadores. No obstante, en climas muy húmedos (ej. costa norte) si la prioridad es deshumidificar fuertemente el aire exterior, podría optarse por un recuperador sensible normal combinado con sistemas activos de deshumidificación, ya que el entálpico cede parte de la humedad exterior al aire extraído para proteger la interior. En general, para viviendas, un recuperador entálpico mejora la percepción térmica (un aire algo más húmedo en invierno se siente más cálido, y uno algo más seco en verano más fresco)[15]. La elección entre entálpico vs. sensible dependerá de las condiciones climáticas y los objetivos de confort, pero en rehabilitaciones se tiende a escoger entálpicos para optimizar el ambiente interior.

Requisitos de estanqueidad de la envolvente. Para que un sistema de ventilación mecánica controlada cumpla su cometido eficientemente, es imprescindible que el edificio tenga un buen nivel de hermeticidad al aire (baja infiltración). Si la envolvente presenta infiltraciones excesivas (juntas de fachada mal selladas, carpinterías poco estancas), se producirán flujos incontrolados de aire que escapan al recuperador, mermando tanto la calidad de aire (por entradas de aire sin filtrar) como las ventajas energéticas. En un edificio con alta estanqueidad, prácticamente toda la renovación de aire se realiza a través del sistema controlado, lo que maximiza la recuperación de calor y el control de dónde entra el aire (por filtros) y a qué caudal. La literatura técnica indica que en edificios de estándar Passivhaus (n50 ≤ 0,6 ach) con ventilación mecánica, se alcanza hasta un 90% de eficiencia en climatización gracias a la combinación de hermeticidad + recuperador. En cambio, en una vivienda con infiltraciones elevadas (por ejemplo, n50 > 5 ach en edificios antiguos), aunque se instale un recuperador excelente, gran parte del aire caliente interior puede escaparse por las fugas sin ceder su calor, y aire frío entrar por rendijas sin pasar por el intercambiador. Por ello, las mejoras pasivas en rehabilitación (sellado de ventanas, burletes, sellado de encuentros de fachada, mejora de impermeabilidad en cajas de persiana, etc.) son paso previo necesario para la efectividad de la ventilación mecánica. A nivel normativo, el CTE DB-HE (Ahorro de Energía) ya establece límites de permeabilidad al aire en huecos, y programas de certificación energética (HULC, CE3X) permiten contabilizar el efecto de recuperadores solo si la infiltración se limita a ciertos valores. En obra, se recomienda realizar tests de infiltración (Blower Door) tras las actuaciones de sellado, para comprobar la hermeticidad y localizar posibles fugas que subsanar. De este modo, se asegura que el aire entra y sale donde debe, es decir, por los bocas de ventilación previstas y atravesando el recuperador de calor.

Aplicaciones y ejemplos prácticos de sistemas de ventilación. La selección del sistema de ventilación óptimo en rehabilitación dependerá del tipo de edificio, su uso, las posibilidades de instalación y el nivel de prestaciones deseado. A continuación, se presenta una tabla comparativa de soluciones habituales según el ámbito de aplicación: residencial unifamiliar, residencial plurifamiliar y terciario, destacando ventajas y consideraciones en cada caso:

[14] https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/ventilacion-y-calidad-aire-interior/recuperador-entalpico-que-es.html

[15] https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/beneficios-recuperador-entalpico/

Tipo de edificio	Sistemas de ventilación habituales	Notas y consideraciones
Vivienda unifamiliar (casa)	– **Ventilación natural** (si el diseño y entorno lo permiten, con ventilación cruzada y apertura controlada de ventanas). – **Ventilación híbrida o mecánica de simple flujo**: extracción mecánica en baños/cocina y aireadores en fachada en dormitorios/salón (sistema típico CTE HS3 en muchas viviendas). –**Ventilación mecánica de doble flujo con recuperador**: recomendada en rehabilitación energética avanzada o viviendas de alta eficiencia (Passivhaus, nZEB).	Las casas unifamiliares permiten cierta estrategia pasiva: aprovechar ventilación cruzada y *refrescamiento nocturno* en verano cuando sea seguro y el aire exterior sea limpio. Sin embargo, confiar solo en ventilación natural es arriesgado para la calidad del aire en invierno o en ubicaciones urbanas. Hoy día, las viviendas de nueva planta de alto rendimiento incorporan VMC de doble flujo por confort y energía. En rehabilitación, instalar un recuperador es muy beneficioso: por ejemplo, casas Passivhaus logran hasta 90% de ahorro en climatización gracias a hermeticidad + VMC. Se debe prever espacio para conductos (falsos techos, armarios) o considerar unidades descentralizadas por estancias si la instalación de conductos es complicada.

Tipo de edificio	Sistemas de ventilación habituales	Notas y consideraciones
Vivienda plurifamiliar (piso)	– **Ventilación híbrida o mecánica simple flujo**: sistemas colectivos de extracción (shunts o extractores en cubierta) en cocinas y baños, con entradas de aire en dormitorios y salas (rejillas en ventanas o muros). Es la solución mínima exigida por CTE HS3 para viviendas en bloque. – **Ventilación mecánica doble flujo individual por vivienda**: mediante equipos compactos con recuperador instalados en cada piso (en tendedero, falso techo de pasillo, etc.), distribuyendo aire a las habitaciones y extrayendo de húmedos. – **Sistemas descentralizados por estancia**: equipos individuales con recuperador en muros (ej.: S&P *Respiro*) para mejorar ventilación en rehabilitaciones donde no es viable una red de conductos central.	En edificios de pisos, la **ventilación natural pura** es menos efectiva (dificultad para ventilación cruzada en apartamentos interiores, contaminación urbana, etc.). Por eso, la mayoría de edificios residenciales modernos cuentan con al menos extracción mecánica centralizada. Las instalaciones típicas incluyen conductos shunt en patinillos, que pueden ser ruidosos o ineficientes si no se mantienen. Para rehabilitación energética, una mejora es añadir un recuperador por vivienda: varias marcas ofrecen unidades compactas de doble flujo y bajo perfil, aptas para falsos techos (ej.: equipo *Domeo* de S&P o gama **EVO** de Siber de perfil extra-plano). Estos equipos reducen la demanda energética de las viviendas y mejoran la CAI significativamente. Cuando no se pueden ejecutar conductos por la configuración del edificio (p. ej., reformas en edificios históricos donde no se quiere alterar la estética), los **sistemas descentralizados** son una opción: consisten en pequeños recuperadores murales autónomos en las habitaciones principales, que trabajan en pares alternando flujo (extracción/impulsión) y recuperan calor con eficiencias ~90%. Permiten ventilación continua habitáculo por habitáculo. Su instalación es más sencilla (solo requiere hacer un paso en muro exterior y conexión eléctrica) y algunos modelos alcanzan hasta 93% de rendimiento. La contrapartida es que se necesitan varios equipos por vivienda y el flujo por equipo es limitado (válido para estancias individuales).

Es fundamental, no obstante, adaptar la solución al caso concreto: analizar la volumetría del edificio, la estanqueidad lograda tras la intervención, las limitaciones de espacio para equipos y conductos, el nivel de automatización deseado y, por supuesto, el presupuesto. Siempre se deberá cumplir con los mínimos normativos (CTE DB HS3 para viviendas, RITE para terciarios) pero aspirando a valores objetivo más exigentes si se persigue una certificación ambiental como WELL o VERDE GBCe. Por ejemplo, la certificación VERDE (GBCe) en su apartado de Ambiente Interior tiene como criterio AI-01 limitar las emisiones de COV de materiales y asegurar una ventilación adecuada, requiriendo incluso pruebas de concentración de COV post-obra para verificar la salubridad lograda. Del mismo modo, WELL Building Standard en su capítulo Air obliga a cumplir con estándares internacionales de ventilación (p.ej. ASHRAE 62.1) además de medir in situ contaminantes para obtener la certificación, garantizando así que el sistema instalado funciona en la práctica.

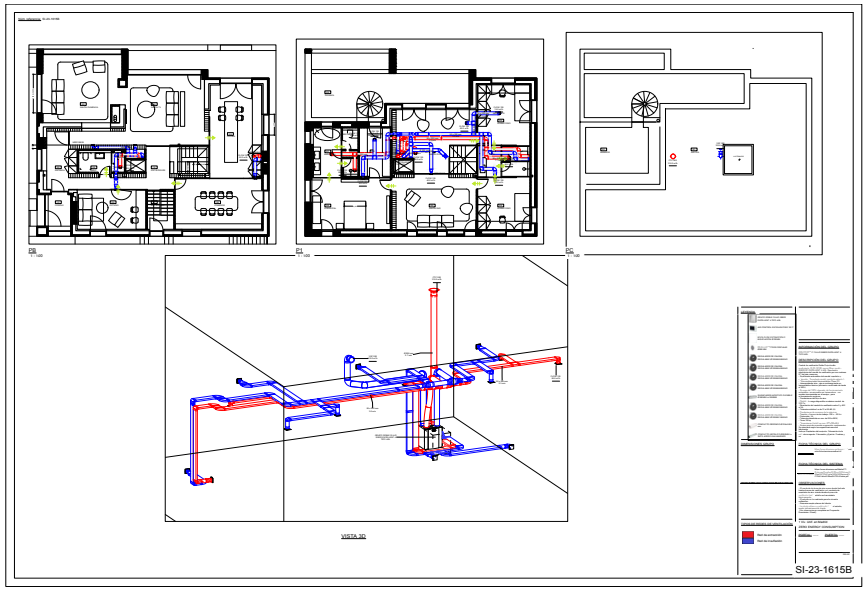


Figura 7.2: Ejemplo de unidad descentralizada de ventilación con recuperador de calor S&P Respiro.

Este equipo, instalado en la pared, corresponde al modelo S&P Respiro en un caso de éxito real. Permite dotar de ventilación mecánica con recuperación de calor a estancias individuales sin necesidad de conductos, con rendimientos de hasta ~93% en recuperación térmica.

Aunque la ventilación con recuperación de calor no constituye por sí misma una estrategia pasiva, su influencia sobre la demanda energética del edificio es determinante en términos de eficiencia energética. La normativa vigente establece unas tasas mínimas de renovación de aire para garantizar la salubridad interior, lo que implica introducir continuamente aire del exterior y expulsar el aire previamente climatizado del interior. Este intercambio supone habitualmente una pérdida energética significativa al eliminar aire interior ya acondicionado, aumentando así la demanda energética para calefacción y refrigeración.

Sin embargo, al emplear un sistema de ventilación mecánica con recuperador de calor, esta pérdida energética se reduce considerablemente gracias al intercambio térmico entre el aire expulsado y el aire nuevo entrante, recuperándose hasta un 90% de la energía. En términos prácticos, y especialmente en la Comunidad de Madrid, las simulaciones energéticas realizadas mediante software de certificación reflejan que



Instalación de ventilación mecánica Siber VMC DF con recuperador de calor en vivienda unifamiliar Madrid. Zero Energy Consumption – 0ec – A. Bosqued.

un edificio dotado de un sistema de recuperación de calor presenta una demanda energética aproximadamente un 20% inferior respecto a otro que solo emplea ventilación natural o ventilación mecánica sin recuperación de calor. Este efecto se traduce directamente en una mejora sustancial de la calificación energética final y en una reducción significativa de los costes operativos asociados a la climatización del edificio.

7.2. CONTROL DE LA HUMEDAD Y FILTRACIÓN

Un factor inseparable de la calidad del aire es la humedad relativa en los espacios interiores. Los niveles de humedad influyen tanto en la salud de las personas como en la integridad de los materiales. Se considera que el rango óptimo de humedad relativa interior para confort y salud se sitúa entre ~40% y 60%[16]. Por encima del 70% HR, proliferan los ácaros, mohos y bacterias; por debajo del 30% HR, las mucosas se resecan, aumentando la susceptibilidad a infecciones respiratorias y ocasionando disconfort (ojos secos, piel irritada). El Reglamento de Instalaciones Térmicas (RITE) en España aconseja mantener la humedad relativa entre 40–60% por razones sanitarias, ya que en ese intervalo la supervivencia de microorganismos patógenos es mínima. Diversos estudios han confirmado que exposiciones prolongadas a humedad elevada en viviendas se correlacionan con problemas respiratorios (asma, alergias), infecciones fúngicas y agravamiento de reumatismos, así como con daños en la edificación (podredumbre de maderas, corrosión de metales, degradación de aislamientos). En consecuencia, controlar la humedad es un objetivo primordial del diseño de la ventilación y climatización.

La ventilación desempeña un papel crucial en el balance higrométrico: en invierno, ventilar reduce la humedad generada internamente (cocinas, duchas, respiración) que de otro modo podría condensar en superficies frías; en verano, si el aire exterior es más seco que el interior, ventilar ayuda a deshumidificar. Sin embargo, en climas húmedos o episodios de alta humedad exterior, la ventilación por sí sola puede introducir más vapor del que elimina. Por ello, los sistemas avanzados combinan estrategias: ventilación adaptativa por humedad (sensores de HR que intensifican la extracción en baños al exceso de vapor, por ejemplo después de duchas) y en casos extremos el apoyo de deshumidificadores o baterías de frío en los equipos de climatización para condensar el exceso de humedad del aire entrante. Un enfoque pasivo muy usado en Francia y ya introducido en España es la ventilación higroregulable: rejillas de extracción cuya apertura varía automáticamente con la humedad relativa del ambiente. En baños y cocinas, cuando la humedad sube, la rejilla se abre más, aumentando el caudal extraído (lo cual a su vez succiona más aire nuevo por las entradas en salas/secas). Cuando la humedad baja (espacio desocupado), la rejilla se cierra parcialmente, reduciendo caudal y evitando secar en exceso. Esto permite un control local sencillo de la humedad sin necesidad de electrónica, manteniendo rangos saludables y ahorrando energía (es una forma de ventilación según demanda). Muchos sistemas híbridos en rehabilitación están optando por estas bocas higroregulables, combinadas con extractores centralizados.

[16] https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedad-ideal-confort-termico/

Ahora bien, el control de la humedad no solo se logra eliminando la producida en interiores, sino también evitando fuentes de humedad no deseadas. Es vital reparar filtraciones de agua, evitar condensaciones por puentes térmicos (mejorando el aislamiento) y utilizar sistemas de impermeabilización en zonas susceptibles. En cuanto a la humedad interior de confort, en invierno una casa muy estanca con ventilación mecánica podría caer a 30–35% HR (aire exterior frío al calentarse se seca). Para mitigarlo, se pueden usar recuperadores entálpicos (que retienen parte de humedad como se describió anteriormente) o complementariamente humidificadores portátiles o integrados en el sistema de climatización, si se detecta sequedad excesiva. La premisa es conseguir un equilibrio: ni demasiado húmedo (riesgo de moho) ni demasiado seco (inconfortable y perjudicial). Un indicador de problema de humedad es la condensación en ventanas o paramentos: si ocurre habitualmente en invierno, sugiere que la ventilación es insuficiente o que los cerramientos tienen superficies internas muy frías (requiriendo aislamiento). La rehabilitación energética ataca ambos frentes: mejora aislamiento (subiendo temperatura superficial y evitando condensaciones) y mejora ventilación (sacando el vapor producido).

Filtración del aire: tipos de filtros y mantenimiento. La filtración consiste en depurar el aire de partículas y otros contaminantes antes de que entre al espacio interior (filtros en admisión) o antes de que pase por equipos que puedan ensuciarse (filtros de retorno). En viviendas tradicionales sin ventilación mecánica, no hay filtración alguna del aire exterior salvo la que ofrecen las propias telas mosquiteras o similares; en cambio, los sistemas mecánicos brindan la oportunidad de incorporar filtros técnicos que mejoran notablemente la calidad del aire interior, reteniendo polvo, pólenes, esporas de moho e incluso agentes patógenos hasta cierto tamaño. La normativa RITE clasifica la calidad del aire exterior en tres niveles (ODA 1 aire limpio rural, ODA 2 aire con contaminación moderada, ODA 3 aire muy contaminado típico de centro urbano), y exige una determinada clase de filtración en función de la combinación de calidad exterior e interior deseada. Por ejemplo, para conseguir aire interior de calidad IDA 2 (buena) en una ciudad con aire ODA 2, se requiere una filtración de dos etapas con filtros equivalentes a F6 + F8. Para IDA 1 en aire ODA 3 (caso más exigente, hospitales en ciudad muy contaminada) se llega a pedir pre-filtro + filtro fino + filtro de carbón activo (GF) para gases.

Los filtros se clasificaban clásicamente según la norma EN 779 (G4, F7, F9, etc.) y actualmente según ISO 16890 (ePM10, ePM2.5, ePM1 con porcentajes). Un filtro tipo F7 (aprox. ePM1 50%) es capaz de retener la mayoría de polen, polvo doméstico y partículas finas PM2.5 en buen grado, por lo que suele instalarse en viviendas de alta calidad. Filtros superiores F8-F9 (ePM1 80–90%) capturan aún más partículas, incluyendo muchas bacterias y algunos virus en aerosoles grandes, y se emplean en edificios terciarios y lugares donde se quiere un aire muy limpio (oficinas premium, museos, colegios). Los filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air, clases H13-H14) retienen >99.95% de las partículas de 0.3 micras, abarcando prácticamente todos los microorganismos; sin embargo, su uso en ventilación general de edificios no era común antes de COVID-19 debido a su alta pérdida de carga (resistencia al aire) que implica ventiladores más potentes. Tras la pandemia, se han instalado filtros HEPA sobre todo en unidades portátiles de purificación de aire o en recirculación de aire interior en sistemas existentes, para agregar un grado extra de filtración sin redimensionar todo el sistema. En entornos hospitalarios o laboratorios sí se usan en las unidades de tratamiento de aire, combinados con sistemas UV de desinfección en conductos.

Un aspecto crítico de los filtros es su mantenimiento. Con el tiempo, los filtros acumulan la suciedad filtrada y pueden colmatarse (obstruirse), provocando caída de presión en el sistema. Esto reduce el caudal de aire aportado (empeorando la ventilación) y fuerza al ventilador a consumir más energía. Además, un filtro muy sucio puede convertirse en un foco de proliferación de bacterias si permanece húmedo u ofrecer menor eficacia (partículas muy finas podrían empezar a atravesar una malla saturada). Por tanto, es imprescindible cambiar o limpiar (según el tipo) los filtros con la periodicidad que indique el fabricante o la normativa. Muchos sistemas actuales incluyen indicadores de colmatación de filtro (por horas de uso o por medición de presión diferencial. En viviendas, suele recomendarse al menos una sustitución anual de filtros (mejor cada 6 meses si el aire exterior es muy sucio, como en entornos urbanos con tráfico). En edificios terciarios, el mantenimiento suele programarse 2–3 veces al año. La Guía de Mantenimiento del RITE exige revisar filtros y limpiar intercambiadores en sistemas de climatización para garantizar que la calidad de aire no decaiga. Un filtro olvidado más allá de su vida útil puede incluso colapsar y ser atravesado por el aire, dejando de filtrar totalmente. De igual modo, es importante comprobar la estanqueidad en el alojamiento del filtro: de nada sirve un buen filtro si el aire se cuela por rendijas alrededor de su marco (bypass). Un correcto mantenimiento mantendrá la ventilación funcionando en condiciones de diseño. Como recomendación práctica, se puede llevar un registro de cambios de filtro y emplear filtros originales o equivalentes certificados, ya que a veces filtros baratos no cumplen realmente la clase anunciada.

Materiales de baja emisión de COV. Un complemento necesario a la ventilación para asegurar buena calidad ambiental es reducir la fuente de contaminantes interiores. Muchos materiales de construcción y decoración emiten compuestos orgánicos volátiles (COV) durante meses e incluso años: pinturas convencionales, barnices, adhesivos, moquetas, tableros aglomerados, ciertos muebles, etc., liberan formaldehído, benceno, tolueno y otros compuestos que en concentraciones acumuladas pueden ser irritantes o tóxicos. La ventilación ayuda a diluir estos COV, pero resulta más eficaz atacar el problema de origen: seleccionar materiales de baja o nula emisión. Existen en el mercado pinturas y barnices ecológicos con etiquetado A+ (el nivel más alto según la clasificación francesa de emisiones al aire interior, que certifica que prácticamente no emiten COV al ambiente[17]). Asimismo, adhesivos sin disolventes orgánicos, mobiliario con madera certificada E1 (baja emisión de formaldehído) o incluso materiales naturales (arcillas, cales, maderas macizas sin tratamiento químico) pueden emplearse para minimizar la carga contaminante en interiores. El Green Building Council España, en su certificación VERDE, incluye créditos específicos por limitar las emisiones de COV en el edificio (criterio ES-01)[18].,

[17] https://www.indexfix.com/calidad-certificada/emisiones

[18] https://gbce.es/documentos/verde2030/Guia-VERDE-Edificios-2030-v01.pdf

Esto suele implicar exigir fichas técnicas de los productos empleados que demuestren contenido bajo en COV o resultados de ensayos de emisión conforme ISO 16000 indicando concentraciones muy por debajo de los límites. Por ejemplo, se busca que las pinturas y barnices tengan <1 g/L de COV, que los adhesivos cumplan con EC1+ (la categoría más estricta de la etiqueta EMICODE), etc. Durante la obra, es preferible planificar una ventilación intensiva de purga tras la aplicación de estos productos antes de la ocupación, para evacuar los compuestos volátiles iniciales (muchos materiales liberan la mayor parte de COV en las primeras semanas).

Otro aspecto de la calidad del aire del ambiente interior es el control de olores. Los materiales con certificación ambiental suelen también tener baja emisión de olores molestos. Algunas pinturas, por ejemplo, son sin olor (base agua, sin formaldehído añadido). En muebles, se recomienda evitar espumas y plásticos que puedan emitir compuestos químicos, optando cuando sea posible por alternativas naturales (rellenos de fibra vegetal, etc.).

Relación entre ventilación, filtración y salubridad tras COVID-19. La pandemia del coronavirus SARSCoV-2 puso de manifiesto la importancia vital de la ventilación en entornos interiores. Se confirmó que la transmisión aérea por aerosoles en espacios cerrados mal ventilados era un vector principal de contagio. En respuesta, las autoridades sanitarias y organismos técnicos emitieron guías enfatizando maximizar la ventilación de los espacios ocupados. En España, una guía del Ministerio de Sanidad/ MITECO de 2020 recomendó en edificios públicos aumentar la ventilación a los niveles de aire de calidad IDA 2 (12,5 l/s·persona) o superiores durante la jornada, extendiéndola antes y después de la ocupación[19]. Incluso se sugirió mantener los sistemas en funcionamiento 24/7 a caudal reducido en ausencia de personas, para asegurar una renovación constante del aire y evitar estratificaciones donde puedan permanecer virus en el ambiente. Otra indicación fue eliminar recirculación en equipos climatizadores (pasar a 100% aire exterior si el sistema lo permitía), de forma que no se redistribuyeran posibles virus de unas salas a otras. Esto tuvo un impacto energético notable (al desechar el aire recirculado se perdía energía), pero se asumió por prioridad sanitaria.

La pandemia también impulsó el uso de filtros absolutos y purificadores. Muchas oficinas y colegios instalaron unidades HEPA portátiles en aulas y salas de reuniones, como medida complementaria cuando la ventilación natural/mecánica era insuficiente para bajar el CO2 (usado como indicador indirecto de ventilación). Asimismo, cobró relevancia la monitorización: hoy es común ver medidores de CO2 en interiores como proxy de calidad de aire; valores por debajo de ~800-1000 ppm indican buena ventilación, mientras que valores superiores alertan de necesidad de ventilar más. Estos monitores se han convertido en aliados de arquitectos e ingenieros para diagnosticar y ajustar los sistemas de ventilación en uso real. Por ejemplo, BREEAM en su esquema En Uso ahora premia la instalación de sensores de CO2 fijos con lectura visible y alarmas cuando se exceden umbrales, una práctica directamente derivada de las lecciones del COVID-19[20].

[19] https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/servicios/medidas-covid19/sistemas-climatizacion-ventilacion.html

[20] https://www.inbiot.es/es/wikinbiot/certificacion-breeam-calidad-del-aire-para-construccion-sostenible

8 PATRIMONIO PROTEGIDO

Los edificios históricos protegidos presentan desafíos únicos en materia de rehabilitación energética.

Son construcciones con alto valor arquitectónico y cultural, sujetas a estrictas normativas de conservación que limitan las intervenciones posibles en su envolvente e instalaciones. Se analizan las particularidades, limitaciones y posibilidades al abordar la mejora de la eficiencia energética en este tipo de inmuebles, manteniendo su integridad patrimonial.

8.1. PARTICULARIDADES, LIMITACIONES Y POSIBILIDADES

Limitaciones normativas y técnicas en edificios históricos protegidos.

Las normas de conservación del patrimonio imponen restricciones severas sobre qué elementos de un edificio histórico pueden modificarse. Es habitual la imposibilidad de actuar sobre fachadas o cubiertas protegidas, tanto en su cara exterior como interior, ya que alterarlas supondría una pérdida inadmisible de la autenticidad estética. De hecho, muchos planes de protección catalogan fachadas y volúmenes completos (protección "Nivel 1") que deben conservar materiales, formas y ornamentos originales. En estos casos no es viable instalar aislamiento térmico por el exterior (SATE) ni reemplazar carpinterías históricas sin autorización específica. Incluso por el interior puede haber limitaciones si existen artesonados, frescos u otros valores a preservar. Además, cualquier obra debe contar con proyecto de arquitectura y la supervisión de la autoridad patrimonial competente, prolongando trámites y encareciendo la intervención. Un ejemplo ilustrativo es la climatización de la iglesia gótica de San Miguel en Saldaña: no se pudo sustituir su sistema de calefacción obsoleto hasta acometer una reforma integral en 2016, dado que cualquier actuación sobre un edificio protegido requería un proceso complejo supervisado por Patrimonio. Solo al emprender una restauración global del templo (resolviendo humedades, solados, etc.) se autorizó incorporar un sistema más eficiente.

Exenciones normativas para edificios catalogados (CTE y legislación española). Consciente de estas dificultades, la normativa española prevé ciertas exenciones o flexibilizaciones en materia de eficiencia energética para los edificios con protección patrimonial. El Código Técnico de la Edificación (CTE) excluye del cumplimiento estricto de sus exigencias de ahorro de energía a los inmuebles oficialmente protegidos "en la medida en que cumplir dichas exigencias pudiese alterar de manera inaceptable su carácter o aspecto", debiendo la autoridad patrimonial definir los elementos inalterables[1]. En la práctica, esto significa que si aislar una fachada, cambiar ventanas o añadir instalaciones renovables compromete valores históricos, no es obligatorio alcanzar las mismas metas energéticas que un edificio convencional. Del mismo modo, las directivas y leyes de eficiencia energética (por ejemplo, la transposición de la EPBD europea) excluyen explícitamente a los edificios

[1] https://re-magazine.saunierduval.es/proyectos/aerotermia-y-suelo-radiante-para-una-iglesia-del-siglo-xiv-en-saldana

históricos de ciertas obligaciones[2]. Por ejemplo, el RDL 14/2022, que impone medidas de ahorro en edificios públicos, afecta tangencialmente a monumentos abiertos al público pero no exige reformas energéticas en ellos. Este marco legal reconoce que la conservación del patrimonio prevalece sobre la mejora térmica cuando ambas entran en conflicto. No obstante, se anima a aplicar voluntariamente buenas prácticas en eficiencia siempre que sea posible. En 2018 se publicó incluso una norma UNE específica (UNE-EN 16883) que guía la mejora sostenible de la eficiencia energética en edificios históricos, proponiendo un procedimiento metodológico para seleccionar medidas compatibles tras un análisis riguroso del edificio y de su interés patrimonial. Esta norma enfatiza que "cada edificio histórico debe considerarse un caso particular" y que las mejoras deben planificarse con un enfoque multidisciplinar, evaluando el impacto de cada medida sobre los elementos característicos a conservar.

Un caso similar al de la iglesia de San Miguel de Saldaña y que quizá no sea la solución ideal para una iglesia o una catedral, fue el estudio que se nos solicitó hacer en dos ocasiones distintas, por un lado de la Catedral de Burgos a través de una universidad y por otro de las iglesias del románico palentino a través de la Fundación Santa María La Mayor. Probablemente por el auge y publicidad de la aerotermia, los clientes se cuestionaron en ambos casos, la posibilidad de instalar un sistema de alta eficiencia de aerotermia por suelo radiante. Intervenir de esta manera sobre un edificio como la Catedral de Burgos, es una empresa que no es posible llevar a cabo, no por limitaciones técnicas, sino por el propio uso y dimensiones, así como volumen a acondicionar de esta manera. Algo similar es lo que pasaba con las pequeñas iglesias del románico palentino, que en este caso, por el poco uso que tienen y no tanto por dimensiones, no tenía ningún sentido instalar un sistema de radiación e inercia, que requiere un funcionamiento prolongado para alcanzar el confort y era mucho más racional, optar por sistemas de igual eficiencia energética pero de convección, que no tienen prácticamente inercia y permiten acondicionar un espacio de manera casi instantánea.

Protección de la envolvente: restricciones habituales.

Una de las mayores limitaciones técnicas se da en la envolvente arquitectónica. Las fachadas con valor patrimonial suelen estar protegidas tanto en su acabado exterior (materiales, artesonados, colores) como en elementos constructivos (cornisas, carpinterías, cerrajerías originales). Esto implica la limitación de una solución de aislamiento por el exterior, ni aplacados que alteren su imagen. Incluso la limpieza o restauración de fachadas requiere técnicas no invasivas.

En cubiertas ocurre algo similar: si la techumbre histórica (teja, pizarra, estructura de madera vista, etc.) está protegida, no es posible cambiarla por sistemas sándwich modernos ni elevar su sección para incluir aislante, salvo quizás en zonas no visibles. Tampoco se permiten lucernarios, paneles solares u otros añadidos en tejados visibles desde el entorno protegido[3]. Por el interior, si la cubierta tiene artesonado o estructura vista de valor, colocar aislamiento en la parte inferior, ocultándola, tampoco es factible.

Estas restricciones conducen a que muchos edificios históricos rehabilitados mantengan envolventes con prestaciones térmicas modestas comparadas con construcciones actuales, salvo en casos muy concretos en la que los espesores de la envolvente sean importantes y consecuentemente gran masa, en cuyo caso, el desfase de la onda térmica, favorece un buen comportamiento térmico invierno-verano.

Por ello, las intervenciones deben centrarse en soluciones invisibles o reversibles.

Por ejemplo, es frecuente mejorar la eficiencia de los huecos: instalar doble acristalamiento en carpinterías existentes (siempre que se conserven las hojas originales, añadiendo un vidrio secundario) o añadir contraventanas interiores discretas. También se utilizan burletes y sellantes en puertas y ventanas antiguas para reducir infiltraciones de aire sin alterarlas visualmente.

En muros exteriores, cuando el valor patrimonial reside solo en la fachada exterior, se puede a veces colocar aislamiento térmico por el interior de los muros (trasdosados), siempre que el acabado interior no esté protegido. Sin embargo, esto reduce espacios habitables y puede conllevar riesgos de condensaciones si no se hace con materiales adecuados y transpirables. Una solución innovadora en estos casos son los aislantes de espesor mínimo y alta eficiencia, como paneles de aerogel o aislantes al vacío, que se pueden ocultar tras revestimientos interiores existentes. Estos "paneles aislantes invisibles" permiten mejorar la transmitancia de muros sin comprometer la apariencia exterior[4]. Su coste es elevado, por lo que se reservan para áreas críticas.

Importancia de una rehabilitación integral (conservación vs. eficiencia).

Dado que la mejora energética no puede considerarse aisladamente en el patrimonio, suele plantearse dentro de proyectos de rehabilitación integral.

La prioridad número uno en un BIC (Bien de Interés Cultural) es garantizar su estabilidad estructural, subsanar patologías (humedades, grietas) y restaurar sus elementos artísticos. La eficiencia energética queda en segundo plano, subordinada a no poner en riesgo el valor arquitectónico. Aun así, es altamente recomendable aprovechar las intervenciones integrales para introducir mejoras energéticas complementarias. Muchas actuaciones energéticas en patrimonio se acometen "por oportunidad", cuando el edificio va a ser intervenido de todos modos. Por ejemplo, si se levantan solados por problemas estructurales, se puede incorporar un aislamiento de solera o forjado; si se restauran yesos interiores, adicionar aislante en muros; si se sustituyen cubiertas por filtraciones, integrar láminas térmicas bajo la nueva teja, etc. De este modo, la eficiencia se aumenta sin realizar obras ad

[2] https://www.dexma.com/es/blog-es/patrimonio-historico-y-eficiencia-energetica-caso-de-exito-sant-pau/

[3] https://icomos.es/wp-content/uploads/2022/10/GUIA-BP-RENOVABLES-Y-PATRIMONIO-CULTURAL-ICOMOS-ESPANA.pdf

[4] https://www.proiescon.es/eficiencia-energetica-en-la-rehabilitacion-de-patrimonio-historico/

hoc exclusivamente energéticas (que difícilmente justificarían su intrusión). Es un equilibrio delicado pero posible: no hay que elegir entre patrimonio o eficiencia energética, sino buscar sinergias. Siempre con mayor cuidado que en obra nueva, contando con historiadores, arquitectos de patrimonio y técnicos de instalaciones que trabajen juntos desde el diseño. Este trabajo en equipo permite lograr mejoras de consumo sin menoscabar la autenticidad.

Masa térmica e incorporación de aislamiento en edificios históricos.

Muchas construcciones históricas poseen una elevada masa térmica: muros portantes de gran espesor (mampostería, ladrillo macizo), forjados pesados, bóvedas de piedra, etc. Esta inercia térmica es parte del comportamiento pasivo original del edificio. La masa actúa como regulador natural, amortiguando las fluctuaciones de temperatura.

Por ejemplo, en climas continentales como Madrid, un muro de 60 cm de granito se calienta lentamente durante el día y libera calor por la noche, manteniendo interiores más frescos en las horas pico de verano y más cálidos durante la noche invernal. Los palacios y edificios preindustriales fueron a menudo diseñados con patios, muros anchos, contraventanas y otras estrategias pasivas que hoy reconoce el estándar Passivhaus. Esto es una ventaja inherente: incluso sin aislamiento moderno, "muchos edificios antiguos ya incluyen elementos para ser más eficientes desde el diseño". No obstante, la masa térmica puede volverse un arma de doble filo según el uso actual del edificio. Si el inmueble permanece desocupado por largos periodos o se caldea solo ocasionalmente (caso típico de iglesias), esa gran inercia implica que se requiere mucha energía para calentarlo puntualmente, y la respuesta es lenta. En cambio, en usos continuos (museos, viviendas, oficinas) la inercia bien aprovechada mejora el confort al suavizar los picos de demanda. ¿Cuándo conviene incorporar aislamiento adicional? La decisión debe tomarse caso a caso, tras estudiar el comportamiento higrotérmico. En edificios con altos valores históricos en su interior y exterior, la opción preferente es confiar en la inercia existente y optimizar otros aspectos (estanqueidad, sistemas eficientes) antes que añadir aislamiento. Sin embargo, cuando los interiores no están protegidos y las condiciones de uso demandan mayor confort, sí puede ser recomendable aislar selectivamente.

Tecnologías avanzadas permiten hacerlo con bajo impacto: por ejemplo, paneles de aerogel de apenas 10-20 mm de espesor colocados en trasdosados interiores, revocos termoaislantes transpirables aplicados sobre muros interiores (mezclas de cal con aerogel, perlita u otros agregados), o aislamiento por el exterior en zonas ocultas (medianerías, cubiertas planas no visibles). Estas soluciones incrementan el rendimiento térmico manteniendo la "autenticidad, integridad e interés patrimonial" evaluados previamente. En cualquier caso, es crucial que cualquier aislamiento añadido sea compatible con los materiales históricos (permeable al vapor para no atrapar humedad en muros antiguos) y reversible en lo posible, es decir, que pueda retirarse en el futuro sin dañar el elemento original. Un buen diseño aprovechará primero la inercia de la propia estructura (p. ej. Usando estrategias de climatización pasiva como ventilación nocturna en verano, o cierres térmicos nocturnos en invierno) y solo incorporará aislamiento suplementario cuando el balance entre beneficio energético y riesgo patrimonial sea claramente positivo.

Diferencias según la tipología de edificio protegido.

Las estrategias de rehabilitación energética pueden variar significativamente en función del tipo de edificio histórico y su uso actual:

- **Iglesias y templos**:
  Son espacios de gran volumen de aire, generalmente con uso intermitente (misas, eventos puntuales). Históricamente no tenían climatización activa. Mejorar su eficiencia supone un reto, ya que resulta inviable calefactarlos por completo de forma continua – el coste sería enorme y podría dañar retablos u obras de arte con aire caliente seco. Se opta por soluciones puntuales: calefacción de bancos o áreas ocupadas (emisores radiantes bajo los asientos, alfombras calefactadas) y mantener el resto a temperatura baja. Si se realiza una restauración integral, puede ser oportuno introducir suelo radiante al rehacer el pavimento, como se hizo en San Miguel de Saldaña durante la restauración, instalando circuitos de calefacción invisible en las naves de la iglesia, pero siempre dependerá de la continuidad en el uso del edificio. La generación de calor en estos casos suele reconvertirse a sistemas más eficientes y limpios: por ejemplo, bombas de calor aerotérmicas en vez de calderas de fuel (en Saldaña se ocultaron varias unidades de bomba de calor bajo la techumbre). La ventilación natural suele ser suficiente en templos, aunque en algunos casos se añade deshumidificación controlada para proteger bienes muebles. La iluminación sí se mejora casi siempre: sustitución de halógenos por iluminación LED de espectro adecuado, reduciendo consumo y emisión de calor hacia pinturas y esculturas (el Museo del Prado, salvando distancias, demostró que la tecnología LED logra ahorros del ~75% manteniendo la calidad lumínica para obras de arte). En iglesias monumentales, las intervenciones deben ser discretas: canalizaciones ocultas tras molduras, equipos colocados en salas anexas o triforios, etc., siempre consensuadas con autoridades eclesiásticas y patrimoniales.

- **Museos, bibliotecas y edificios culturales**:
  Suelen ubicarse en edificios históricos (palacios, conventos) que han sido adaptados con sistemas modernos para conservación de colecciones. Aquí la climatización (HVAC) es crucial, manteniendo temperatura y humedad estables. Esto a menudo requiere instalaciones intrusivas (conductos, difusores) que hay que integrar cuidadosamente en la arquitectura (por ejemplo, utilizando antiguos conductos de chimeneas para pasar nuevas canalizaciones, o instalando unidades de climatización en sótanos y azoteas no visibles). Los museos invierten en sistemas eficientes como enfriadoras y calderas de condensación de última generación, o geotermia si es viable (muchos museos europeos en edificios históricos han incorporado pozos geotérmicos bajo patios). La iluminación museística ha migrado masivamente a LED, con el doble objetivo de proteger las obras (menos radiación UV e IR) y reducir el consumo eléctrico en un 70-80%. Otro aspecto importante es la gestión automatizada: sistemas BMS que ajustan la climatización sala por

sala según ocupación y horarios, evitando derroches en edificios de gran tamaño. En bibliotecas históricas, además de clima controlado, se cuida la estanqueidad: sellado de ventanas para evitar polvo y polución que dañen libros. Un reto particular es que muchas veces la normativa exige planes contra incendios (rociadores, sensores) que deben instalarse sin dañar elementos decorativos – estas instalaciones de seguridad también deben armonizarse con la eficiencia energética (por ejemplo, usar compuertas cortafuego en conductos de ventilación sin arruinar la estética).

- **Viviendas históricas y palacios residenciales:**
  Este grupo engloba desde palacetes señoriales catalogados hasta bloques de viviendas en centros históricos. En viviendas, el confort térmico de los ocupantes adquiere más peso, por lo que suele buscarse un compromiso razonable entre eficiencia y preservación.



Rehabilitación edificio de viviendas 1935 protegido grado C con SATE. Ramón María Lili 8-9 Donosti. Fuente: Kursaal Rehabilitaciones integrales.

En muchos casos la protección se limita a la fachada, permitiendo actuaciones en el interior: así, es relativamente común añadir aislamiento interior en medianeras y techos, cambiar instalaciones de climatización e incluso renovar ventanas por reproducciones de estética idéntica, pero con vidrios dobles y rotura de puente térmico. La normativa (CTE) permite exceptuar ciertos niveles de aislamiento si se demuestra imposibilidad, pero aun así las rehabilitaciones residenciales en entornos BIC tienden a mejorar bastante la envolvente.

Un ejemplo en la Comunidad de Madrid son las rehabilitaciones de viviendas en el Barrio de las Letras, donde se han restaurado fachadas protegidas manteniendo molduras, pero por dentro se han instalado trasdosados aislantes y sistemas de climatización eficiente, incrementando la calificación energética sin alterar la estética exterior (muchos han accedido a ayudas públicas de rehabilitación energética).

En palacios o edificios singulares convertidos a viviendas de lujo, se suelen implementar soluciones de alta tecnología ocultas: climatización por suelo radiante/refrescante bajo tarimas recuperadas, bombas de calor geotérmicas con pozos en patios interiores, paneles solares camuflados en azoteas planas detrás de pretiles, etc. Siempre con el visto bueno de Patrimonio, que puede exigir que dichas instalaciones sean 100% reversibles (por ejemplo, paneles solares montados sobre estructuras apoyadas que no afecten a la cubierta histórica).

Las viviendas históricas también pueden aprovechar elementos pasivos tradicionales: contraventanas, galerías acristaladas, patios, que bien rehabilitados mejoran la eficiencia sin necesidad de añadir dispositivos modernos.

- **Edificios dotacionales y administrativos:**
  Aquí entrarían ayuntamientos, sedes institucionales, colegios, hospitales, etc. Muchos operan en edificios antiguos (por ejemplo, el Palacio de Cibeles – Ayuntamiento de Madrid – o numerosos edificios universitarios históricos).

  Estos casos combinan alta ocupación y uso intensivo con la obligación de preservar la imagen representativa. Las actuaciones suelen centrarse en sistemas centralizados eficientes: sustitución de calderas antiguas por sistemas de condensación o bombas de calor centralizadas, modernización de redes de calefacción (aislamiento de tuberías, equilibrado de circuitos), incorporación de unidades de tratamiento de aire con recuperación de calor para ventilación en oficinas, etc.

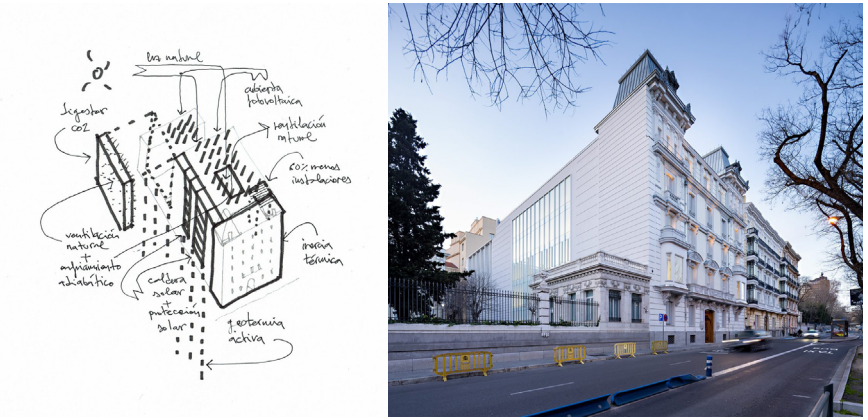
  Un aspecto esencial es la estanqueidad y aislamiento de ventanas, porque muchos edificios públicos tienen grandes salones con ventanas monumentales poco eficientes. Se acostumbra a instalar dobles ventanas (conservando la carpintería exterior original y añadiendo una segunda hoja de ventana interna de aluminio o madera) que reducen pérdidas energéticas manteniendo la fachada intacta.

  También es prioritaria la iluminación eficiente dado el elevado número de horas de uso: se reemplazan lámparas incandescentes o fluorescentes por LED en faroles y apliques históricos (respetando su estética), logrando ahorros significativos de electricidad.

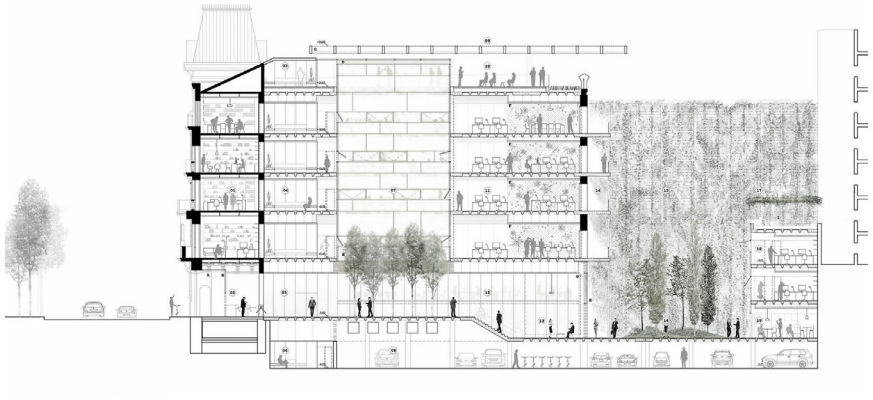
  En cuanto a integración renovable, los edificios públicos buscan ser ejemplares en sostenibilidad siempre que Patrimonio lo permita. Por ejemplo, algunas sedes han instalado paneles fotovoltaicos en cubiertas planas no visibles o sobre marquesinas en patios, para autoconsumo; otras han optado por contratar electricidad de origen 100% renovable para compensar emisiones de CO_2 de su consumo.

  Cabe señalar que en edificios administrativos de gran tamaño y valor (museos, ayuntamientos) es habitual realizar auditorías energéticas para identificar mejoras posibles sin impacto patrimonial: regulación fina de climatización, sectorización de encendidos, recuperación de calor de equipos, etc. Muchas de estas medidas no invasivas proporcionan ahorros del orden de 10-

20% incluso en edificios ya rehabilitados eficientemente (por ejemplo, una auditoría del Palacio de Cibeles detectó potencial de ahorro extra del 17% optimizando instalaciones y horarios).



Rehabilitación edificio Castellana, 19 – Madrid. Fuente: Ruiz Larrea Arquitectos y madc & partners. Foto: Javier Callejas.



Rehabilitación edificio Castellana, 19 – Madrid. Fuente: Ruiz Larrea Arquitectos y madc & partners

El edificio rehabilitado Castellana, 19, cuenta con certificaciones Passivhaus EnerPHit y LEED Platino.

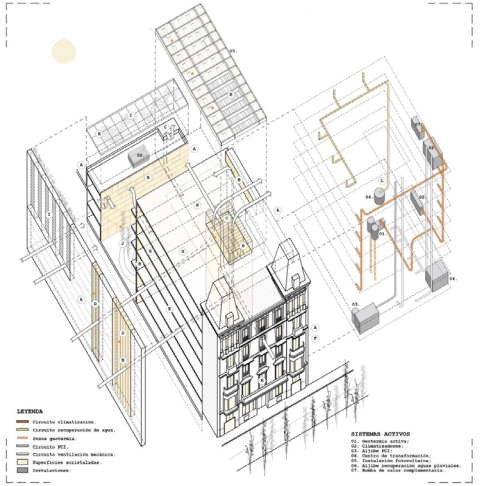
Sistemas de acondicionamiento compatibles y no invasivos.

A la hora de climatizar edificios históricos, se deben privilegiar soluciones no invasivas, es decir, que no requieran alterar la arquitectura original ni introducir elementos visibles.

Una máxima fundamental, aplicable a cualquier intervención arquitectónica, pero especialmente cuando se actúa en rehabilitación es, "primero, reducir la demanda; después, proporcionar sistemas eficientes".

Reducir la demanda en patrimonio implica mejorar el aislamiento donde sea posible, incrementar inercia, y sobre todo mejorar la estanqueidad al aire.

Una vez hecho esto, los sistemas de climatización deben adaptarse al edificio (y no al revés). Se recomiendan emisores de calor/frío por convección o radiación suave en lugar de equipos agresivos.



Rehabilitación edificio Castellana, 19 – Madrid. Fuente: Ruiz Larrea Arquitectos y madc & partners

Por ejemplo, en lugar de instalar splits de aire en salas con ornamentación (lo que implica unidades murales a la vista y tubos atravesando muros), es preferible utilizar radiadores de baja temperatura adosados discretamente (incluso aprovechando nichos existentes bajo ventanas) alimentados por una bomba de calor central. Los suelos radiantes, como vimos, son excelentes en eficiencia y confort, pero solo se instalan si la intervención en suelos es viable; en edificios con solados históricos se descartan para no levantarlos.

Otra opción son los techos radiantes (paneles que calientan/refrigeran por radiación desde el cielorraso) colocados en falsos techos nuevos, siempre que no haya artesonados originales.

La ventilación mecánica con recuperación de calor es muy aconsejable para mejorar la calidad de aire y eficiencia, pero requiere conductos: su implementación solo es posible si existen huecos para distribuirlos (dobles techos añadidos en áreas no nobles, o ejes de ventilación antiguos reutilizados).

En muchos monumentos, la ventilación natural controlada sigue siendo la estrategia principal (apertura programada de ventanas o lucernarios nocturnos, etc.), apoyada por sistemas de deshumidificación en climas húmedos para evitar condensaciones.

Un sistema cada vez más utilizado en rehabilitación patrimonial es la monitorización y gestión inteligente: sensores inalámbricos de temperatura, humedad y CO_2 repartidos por el edificio, conectados a un sistema central de control. Esto permite regular la climatización de forma óptima sin tener que cablear el edificio. Por ejemplo, el recinto modernista de Sant Pau en Barcelona (Patrimonio Mundial) instaló más de 100 contadores y sensores IoT para monitorizar consumos de energía en tiempo real, optimizando el funcionamiento de 15 edificios históricos sin intervenir su apariencia.

También varios edificios históricos en Europa han incorporado geotermia con éxito (por ejemplo, la sede del Parlamento Escocés en un edificio patrimonial en parte o algunos palacios en Italia), y en España comienza a explorarse en rehabilitaciones singulares.

Estanqueidad y eficiencia de las instalaciones sin comprometer la estética.

Un punto crítico en edificios antiguos es mejorar la estanqueidad al aire de la envolvente, dado que muchas patologías energéticas provienen de infiltraciones descontroladas (vientos colándose por ventanas mal selladas, puertas monumentales sin burletes, encuentros muro-forjado agrietados, etc.).

Aumentar la hermeticidad puede lograrse con medidas sencillas y discretas: colocar burletes de goma o cepillos en perímetros de ventanas y puertas (invisibles con la hoja cerrada), sellar juntas estructurales desde el interior con masillas elásticas donde no haya valor artístico, instalar cortavientos en entradas (manteniendo la puerta histórica exterior y añadiendo un vestíbulo interior). Estas acciones mejoran el confort térmico sin alterar la fachada ni exigir materiales modernos visibles.

Por otro lado, la eficiencia de las instalaciones técnicas (calefacción, iluminación, fontanería) debe optimizarse cuidando la estética. Esto implica, por ejemplo, aislar térmicamente tuberías y conductos para evitar pérdidas, pero haciéndolo por el interior de patinillos o huecos ocultos, no dejando aislamientos a la vista en salas históricas. También consiste en elegir rutas de cableado e instalaciones que sigan trazados históricos: en un palacio, se pueden reutilizar antiguas canalizaciones de sirvientes o instalar nuevas tuberías por antiguas chimeneas en desuso, para no romper muros originales.

Cuando hay que añadir equipamiento visible (radiadores, rejillas de ventilación, luminarias), se suele optar por diseños neutros o miméticos: radiadores de hierro fundido de estilo clásico que armonicen con la decoración, rejillas pintadas en el mismo color de la pared, lámparas LED ocultas en carcasa de faroles antiguos, etc.

De igual modo, se evita a toda costa instalar unidades exteriores de climatización en fachadas protegidas – en su lugar, se habilitan patios traseros o cubiertas ocultas para albergar equipos de aire acondicionado, o se usan sistemas integrados como enfriadoras en salas de máquinas interiores con disipación mediante torres ocultas o al terreno. Todo ello requiere de un proyecto minucioso: como recomiendan las cartas internacionales (ICOMOS[5], etc.), las intervenciones deben buscar "no perjudicar la estética ni la autenticidad patrimonial", lo cual se logra con soluciones técnicamente creativas pero respetuosas.

[5] https://icomos.es/biblioteca-y-recursos/

Un caso de éxito lo vemos en la Fundación Sant Pau: durante la restauración de ese conjunto modernista, se modernizaron las instalaciones de climatización, electricidad y contadores sin alterar los pabellones – se aprovechó galerías subterráneas existentes para cableados, se integraron contadores energéticos en armarios camuflados y se incorporaron nuevos aislamientos en cubiertas planas donde no afectaba la vista. Esto demuestra que es posible mejorar la eficiencia manteniendo la apariencia original cuando se planifica cuidadosamente.



Hospital de Sant Pau. Foto: Alex Quezada. Fuente: enero arquitectura.

Energía 100% renovable como compensación de emisiones.

Dado que muchos edificios históricos no alcanzarán niveles óptimos de aislamiento o eficiencia por las limitaciones expuestas, una medida complementaria para reducir su impacto ambiental es garantizar que la energía que consume provenga de fuentes renovables.

Una recomendación frecuente es que los gestores de estos inmuebles contraten electricidad verde certificada para la totalidad del suministro eléctrico del edificio. De esta manera, aunque el consumo pueda ser mayor que el de un edificio moderno, se compensa con generación renovable evitando emisiones de CO_2 asociadas.

En España, prácticamente todas las comercializadoras ofrecen ya tarifas con garantía de origen renovable, lo que facilita esta decisión sin requerir obra alguna. Igualmente, si el edificio utiliza calderas de gas o gasoil y no es viable sustituirlas (por cuestiones patrimoniales o presupuestarias), se puede optar por combustibles renovables: por ejemplo, algunas catedrales en Europa han migrado de gasóleo a calderas de biomasa (pellets) instaladas en criptas o sótanos, reduciendo emisiones netas y en el corto plazo, las calderas de gas podrán ser adaptadas a H2 renovable.

Otra vía es participar en proyectos de comunidad energética local: si el edificio no puede albergar paneles solares, podría invertir en plantas solares o eólicas cercanas y abastecerse de ellas indirectamente. Estas acciones de compensación refuerzan el

compromiso sostenible del edificio protegido sin tocar físicamente el monumento. No obstante, siempre que sea posible se priorizará el autoconsumo in-situ si es compatible con la conservación.

En la Comunidad de Madrid existen ya casos donde edificios históricos contratan energía verde para su funcionamiento (p.ej. museos nacionales patrocinados por empresas energéticas) como parte de su responsabilidad social y para alinearse con los objetivos de sostenibilidad nacionales (ODS de la UNESCO e ICOMOS sobre cambio climático y patrimonio).

Integración de energías renovables en edificios históricos.

La posibilidad de integrar energías renovables in-situ en monumentos es quizás el campo más delicado, pero no imposible. Cualquier intervención debe ser reversible y discreta. Las instalaciones solares fotovoltaicas o térmicas han de colocarse de forma que no sean visibles desde los puntos de vista principales del monumento. Por ejemplo, paneles planos instalados en azoteas ocultas tras balaustradas o petos, o en faldones de tejado que den a patios interiores en lugar de a la calle principal.

Un ejemplo internacional lo brinda el Castillo de Edimburgo: en viviendas históricas aledañas se instalaron paneles solares térmicos de manera que no fueran visibles desde la perspectiva del castillo ni desde las calles históricas, asegurando así que el paisaje urbano protegido no se alterase.



War Memorial del Castillo de Edimburgo. Fuente: Historic Environment Scotland.

Simultáneamente, esas viviendas mejoraron su eficiencia con acristalamientos secundarios y otras medidas integrales. En España, algunas actuaciones piloto han empleado tejas solares que imitan la teja árabe tradicional, integrando fotovoltaica casi invisible en cubiertas de edificios protegidos. Otras han recurrido a paneles desmontables en patios (tipo pérgolas solares) que pueden retirarse sin rastro – tal fue el enfoque en la sede de un organismo en el casco histórico de Toledo, donde se montó una estructura fotovoltaica ligera en un patio trasero para autoconsumo, sin tocar el tejado del edificio protegido (según informes del Plan Nacional de Patrimonio). Otra fuente renovable viable es la geotermia como mencionamos, con perforaciones realizadas cuidadosamente en zonas discretas. La aerotermia (bombas de calor aire-agua) también se considera renovable en la UE; su integración requiere ubicar las unidades exteriores (compresores) en sitios poco visibles y con aislamiento acústico (para no impactar el entorno sonoro de un edificio histórico). En el caso de Saldaña, las 5 unidades de aerotermia se instalaron bajo cubierta, escondidas tras celosías, para no alterar la silueta de la iglesia. Finalmente, en entornos monumentales amplios se puede valorar la minigeneración hidroeléctrica o eólica si hubiese preexistencia (por ejemplo, aprovechar un antiguo salto de agua en un molino histórico para generar electricidad, o reinstalar molinos de viento tradicionales con tecnología moderna donde históricamente los hubo). Cualquier integración de renovables debe contar con la aprobación de Patrimonio y preferiblemente seguir las guías ICOMOS al respecto, que enfatizan minimizar el impacto visual y material. En caso de duda, la alternativa es recurrir a renovables fuera del sitio, como ya se indicó, mediante compra de energía verde.

Iluminación, ventilación y climatización eficientes respetando el patrimonio.

Estos tres aspectos operativos ofrecen margen para mejoras significativas con intervención relativamente baja.

La iluminación es generalmente la actuación más sencilla de todas: sustituir lámparas antiguas por LED de última generación puede reducir el consumo eléctrico de iluminación en más de un 70%, con la ventaja adicional de reducir la carga térmica interna (menos calor disipado) y el daño fotoquímico sobre superficies decoradas.

Es fundamental elegir una temperatura de color e índice de reproducción cromática adecuados para no distorsionar la atmósfera original (por ejemplo, en una catedral se preferirán LEDs de tonalidad cálida que emulen la luz de velas o incandescentes tradicionales).

Muchos edificios históricos madrileños ya han implementado esta medida con excelentes resultados – el Museo del Prado completó en 2017 un proyecto integral de iluminación LED que no solo realzó la apreciación de las obras de arte, sino que ahorró un 74% de energía anual en iluminación.

Por su parte, la ventilación en edificios antiguos suele ser natural (ventanas, rejillas). Para mejorarla sin alterar la estética, se pueden instalar sistemas de ventilación mecánica controlada con recuperadores de calor en zonas no visibles, impulsando aire limpio pre-acondicionado. Cuando no es factible llevar coductos a todas las salas, una alternativa es implementar ventilación híbrida: aprovechar conductos de ventilación natural existentes (chimeneas, lucernas) e incorporar pequeños ventiladores

silenciosos y ocultos que extraigan aire viciado, apoyando la circulación natural.

Además, el control de ventilación según demanda (sensores de CO_2 en grandes salones que abran compuertas motorizadas en linternas o ventanas altas) puede afinar la calidad del aire manteniendo la apariencia intacta.

Respecto a la climatización (calefacción/refrigeración), ya se comentaron varias opciones no invasivas. Un punto a destacar es el uso de la climatización pasiva siempre que sea posible: aprovechar la inercia térmica nocturna, gestionar correctamente las protecciones solares (ej.: utilizar persianas o porticones históricos durante olas de calor, tal como se hacía originalmente), y sectorizar los espacios para no enfriar o calentar áreas vacías.

Muchos edificios históricos tienen patios centrales o muros gruesos que actúan como reguladores naturales; esos elementos pasivos deben ponerse en valor antes de sobredimensionar sistemas mecánicos. En edificaciones de gran masa, es viable por ejemplo mantener temperaturas de consigna algo más relajadas (p. ej. 20°C en invierno en vez de 22°C) apoyándose en que la masa radiante de muros aporta confort radiante. En verano, estrategias tradicionales como toldos en balcones, ventilación nocturna cruzada y uso de vegetación (parras, arbolado en patios) pueden reducir notablemente la necesidad de aire acondicionado, sin tocar un solo elemento patrimonial. Todo esto combinado con sistemas eficientes resulta en un edificio más sostenible y confortable sin haber comprometido su esencia.

Referencias normativas y cartas internacionales aplicables.

Para respaldar las intervenciones en patrimonio construido, existen documentos de referencia que guían a los proyectistas. La Carta de Venecia (ICOMOS, 1964)[6] y otras cartas internacionales como la de Creacovia, sentaron principios como la mínima intervención, la reversibilidad y el respeto a la autenticidad material, que siguen plenamente vigentes al introducir mejoras energéticas (p.ej., cualquier aislamiento añadido debe ser removible a futuro, y distinguirse del original, conforme al principio de distinguibilidad). ICOMOS, a través de comités científicos, ha emitido también lineamientos más específicos: el Documento de París[7] de 2011 sobre patrimonio y desarrollo sostenible destaca que la adaptación de edificios históricos para usos contemporáneos (que incluiría mejorar su rendimiento energético) debe hacerse sin menoscabar su Valor Universal Excepcional en caso de bienes UNESCO. La UNESCO por su parte incorporó en su Agenda 2030 la meta de equilibrar la conservación del patrimonio con acciones frente al cambio climático; en este sentido, promueve que los sitios históricos reduzcan su huella de carbono mediante medidas compatibles, y formula evaluaciones de impacto patrimonial para cualquier cambio significativo. En España, la Ley de Patrimonio Histórico Español (16/1985) y las leyes autonómicas (p. ej. Ley 8/2023 de Patrimonio Cultural de la Comunidad de Madrid) establecen la obligación de conservar los inmuebles catalogados y someten a autorización cualquier obra en ellos – lo que incluye obras de rehabilitación energética. La Ley de Ordenación de la Edificación (LOE 38/1999), como ya se comentó, requiere proyectos dirigidos por arquitectos en intervenciones totales o parciales que afecten a elementos protegidos[8], garantizando un alto nivel técnico en estas rehabilitaciones.

Además, la LOE considera estas obras como "intervenciones totales" a efectos de exigencias, aunque solo afecten a parte del edificio, precisamente por el "plus de garantía" necesario para salvaguardar valores histórico-artísticos. Otra referencia importante es el Plan Nacional de Patrimonio Histórico (coordinado por el Ministerio de Cultura), que aunque no se centra en eficiencia energética, sí impulsa planes sectoriales (catedrales, arquitectura defensiva, patrimonio industrial, etc.) donde la sostenibilidad empieza a incluirse como criterio. Por ejemplo, el Plan Nacional de Catedrales (actualizado 2019) recomienda estudiar la viabilidad de incorporar energías renovables y sistemas eficientes en las catedrales, siempre que no interfieran en su conservación.

Del mismo modo, guías técnicas como la "Guía de Rehabilitación Energética de Edificios de Viviendas" de la Comunidad de Madrid[9] ofrecen orientaciones que pueden aplicarse adaptándolas a edificios con protección, enfatizando las medidas pasivas y el mantenimiento de elementos originales.

Casos de éxito en rehabilitación energética de edificios protegidos (Comunidad de Madrid).

A pesar de las complejidades, la Comunidad de Madrid cuenta con ejemplos notables de edificios históricos que han mejorado su eficiencia manteniendo su esplendor:

- **Museo Nacional del Prado (Madrid)** – Además del proyecto de iluminación LED ya mencionado, el Prado ha llevado a cabo en la última década la optimización de su climatización. En su ampliación y reforma (2007-2009) se introdujeron sistemas de control climático modernos en el edificio histórico de Villanueva, mediante enfriadoras de alta eficiencia y unidades interiores cuidadosamente instaladas en espacios ocultos. El resultado ha sido un ambiente más estable para las obras de arte y una reducción del consumo energético. Según datos publicados, la renovación integral de iluminación completada en 2017 (patrocinada por Iberdrola) supuso un ahorro de 1 GWh anual, "evitando la emisión de 320 toneladas de CO_2 al año" gracias al menor consumo. Todo ello sin alterar un ápice la estética palaciega de las salas, demostrando que la eficiencia puede coexistir con la preservación museográfica.

- **Sede del COAM – Antiguas Escuelas Pías de San Antón (Madrid)** – Este conjunto del s. XVIII, protegido como Bien de Interés Cultural, fue rehabilitado entre 2005-2012 para albergar la sede del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. En la intervención se conjugaron la restauración de la iglesia barroca

[6] https://icomos.es/wp-content/uploads/2020/01/venice_sp.pdf

[7] https://icomos.es/wp-content/uploads/2020/01/GA2011_Declaration_de_Paris_FR_20120109.pdf

[8] https://circulares.arquitectosgrancanaria.es/2009/02/18/090218_edificios_protegidos/

[9] https://www.fenercom.com/actuacion/programa-de-ayudas-para-actuaciones-de-rehabilitacion-energetica-en-el-sector-residencial-de-la-comunidad-de-madrid/

y la construcción de nuevos volúmenes contemporáneos. Desde el punto de vista energético, se aprovechó la obra nueva para dotar al complejo de sistemas eficientes: aislamiento en las nuevas fachadas interiores, acristalamientos dobles en los patios, instalación de paneles solares térmicos en la cubierta plana del gimnasio (ocultos desde la calle) para apoyar la calefacción de la piscina climatizada, y probablemente (según informes técnicos de la obra) un sistema de climatización central con enfriadoras y calderas de condensación de bajo NOx. Aunque no hay cifras públicas de ahorro, el edificio obtuvo una calificación energética muy mejorada respecto a su estado pre-rehabilitación, y lo más importante, se logró sin detrimento de los elementos protegidos – la imponente fachada histórica se conservó tal cual, iluminada con LEDs eficientes, mientras que las partes nuevas alcanzaron estándares modernos. Este caso destaca la integración de lo antiguo y lo moderno, donde las partes nuevas soportan la carga tecnológica y energética, liberando a las partes históricas de intervenciones directas.

- **Palacio de Cibeles – Ayuntamiento de Madrid – El emblemático Palacio de Comunicaciones (inicio s.XX)** fue transformado en ayuntamiento con una profunda rehabilitación terminada en 2011. Se restauraron sus fachadas y patios catalogados, a la vez que se introdujeron mejoras como: climatización zonificada con suelo radiante/refrescante en salas de exposición, un sistema de control domótico centralizado para iluminación y HVAC, y se instaló una cubierta acristalada en la antigua zona de clasificación postal (hoy conocida como Galería de Cristal) con vidrios de control solar que reducen el efecto invernadero. Una auditoría energética posterior indicó que el edificio alcanzó ya un nivel de eficiencia considerable, aunque se propusieron medidas adicionales de mejora del 17% en consumo. Este proyecto es un orgullo madrileño porque consiguió reusar un edificio histórico monumental adaptándolo a oficinas modernas eficientes, sin perder su carácter. La climatización oculta bajo el suelo de mármol, la iluminación LED realzando sus vidrieras, y la gestión inteligente de horarios han hecho compatible el funcionamiento 24/7 del ayuntamiento con la sostenibilidad.

- **Real Monasterio de Santa María de El Paular (Rascafría)** – Fuera de la capital, un ejemplo interesante es este monasterio del s. XV, donde en años recientes se acometió la renovación de su sistema de calefacción. Las antiguas calderas de gasóleo que calentaban algunas estancias fueron reemplazadas por una caldera de biomasa (pellets) ubicada en una sala técnica apartada, con silo de pellets camuflado en un antiguo almacén. Esta intervención, aprobada por la Dirección General de Patrimonio, logró reducir un 90% las emisiones de CO_2 y abarató los costes de combustible, todo sin alterar la imagen del conjunto monástico (la chimenea de gases se encajó en un viejo conducto de ventilación ya existente). Adicionalmente, se añadieron válvulas termostáticas en los radiadores de las celdas y se mejoró el aislamiento en cubiertas secundarias (sobre falsos techos) con lana mineral. El monasterio mantiene sus gruesos muros de piedra vistos, pero su consumo energético se ha optimizado significativamente tras la modernización "invisible" de sus instalaciones. Es un ejemplo de cómo incluso edificios medievales remotos pueden sumarse a la eficiencia energética mediante soluciones adaptadas.

Estos casos de éxito demuestran que, con ingenio técnico y sensibilidad histórica, es posible rehabilitar energéticamente el patrimonio protegido. Cada proyecto requiere soluciones a medida – no existe una receta única – pero comparten un hilo común: respeto absoluto por los valores patrimoniales, intervenciones reversibles y poco visibles, y una concepción integral donde la sostenibilidad se añade como una capa más de valor al edificio histórico. En la Comunidad de Madrid, donde el patrimonio arquitectónico es abundante, esta aproximación integrada es clave para que nuestros monumentos sigan vivos y útiles en el siglo XXI, contribuyendo además a los objetivos de eficiencia energética y climática de nuestra sociedad. Como señalan las guías internacionales, "la gestión sostenible de los edificios históricos" es el camino para prolongar su vida y relevancia, asegurando que sigan siendo testigos del pasado, pero también modelos de futuro sostenible.

Finalmente, eurac research, publica el sitio **HIBER**ATLAS[10] (Historic Building Energy Retrofit Atlas) con un catálogo de rehabilitación energética de edificios en Europa.

[10] https://hiberatlas.eurac.edu/de/willkommen-bei-uns-1.html

9 FINANCIACIÓN Y AYUDAS

La rehabilitación energética de edificios cuenta con diversos mecanismos de financiación y ayudas destinados a impulsar las mejoras en eficiencia, tanto para viviendas residenciales (unifamiliares y plurifamiliares) como, en menor medida, para edificios del sector terciario e institucional.

9.1. SUBVENCIONES Y CRÉDITOS FISCALES

Programas de ayuda en España y Comunidad de Madrid

Desde 2013 se han sucedido múltiples programas públicos para cofinanciar rehabilitaciones energéticas. A nivel nacional, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) lanzó el programa PAREER en 2013, con un presupuesto inicial de ~125 M€, seguido por sucesivas convocatorias ampliadas: PAREER-CRECE (2015) y PAREER II (2017-2018), llegando a movilizar en conjunto cerca de 891 M€ hasta 2020[1]. Estos programas combinaban subvenciones a fondo perdido y préstamos reembolsables blandos para actuaciones en la envolvente térmica, instalaciones eficientes e incorporaciones de renovables. Paralelamente, el Plan PIMA Sol (2013) se enfocó en hoteles, comprando reducciones de CO_2 logradas mediante rehabilitación energética (exigía mejorar dos letras la calificación energética o alcanzar letra B)[2]. Con 5,21 M€ para adquirir créditos de carbono y líneas de crédito del BEI por 200 M€, PIMA Sol incentivó reducciones del 40–70% en emisiones de GEI en el sector hotelero. En años posteriores se continuó con nuevos planes: el Programa PREE (Real Decreto 737/2020) destinado a edificios existentes (con 362 M€ de presupuesto), complementado por el PREE 5000 (RD 691/2021) enfocado a municipios de reto demográfico (pequeña población) para distribuir ayudas en entornos rurales. También surgieron iniciativas regionales y locales como el Plan MAD-RE y posteriormente Plan Rehabilita Madrid del Ayuntamiento de Madrid, que desde 2020 ha dispuesto fondos municipales (50 M€ solo en la convocatoria 2025) para cofinanciar entre un 40% y 90% del coste de las obras de rehabilitación residencial[3]. La Comunidad de Madrid, por su parte, complementa los programas nacionales con convocatorias propias y ventanillas únicas de gestión (por ejemplo, el Plan de Vivienda 2018-2021 cofinanció actuaciones en barrios como Fuencarral, Carabanchel, etc. junto a aportes municipales[4]).

En 2022 se lanzó el Programa de Impulso a la Rehabilitación de Edificios Públicos (PIREP), financiado con fondos europeos Next Generation EU, dirigido a ayuntamientos y administraciones para renovar edificios institucionales. Asimismo, programas específicos como el PRAAST (Programa de Ayudas a Renovables, Autoconsumo, Almacenamiento y Sistemas Térmicos, RD 477/2021) subvencionan instalaciones

1 https://commission.europa.eu/system/files/2021-06/11.idaes_grant_programmes_best_practices_lessons_learned_-_virginia_vivanco_0.pdf

2 https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/planes-y-estrategias/pima-sol.html

3 https://www.eldiariodemadrid.es/articulo/economia/ayuntamiento-aprueba-50-millones-plan-rehabilita-2025-quebeneficiara-mas-14000-familias/20250522132308100672.html

4 https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Actualidad/Noticias/Gonzalez-visita-el-avance-de-las-obras-de-rehabilitacion-urbana-del-ARRUR-Poblado-Dirigido-de-Fuencarral/?vgnextfmt=default&vgnextoid=9b26d9bfae027910VgnVCM1000001d4a900aRCRD&vgnextchannel=a12149fa40ec9410VgnVCM100000171f5a0aRCRD

solares fotovoltaicas, baterías y renovables térmicas en edificios residenciales, terciarios y públicos[5]. En conjunto, estas convocatorias históricas han movilizado cientos de millones de euros en España para reducir la demanda energética de los edificios y avanzar hacia los objetivos europeos.

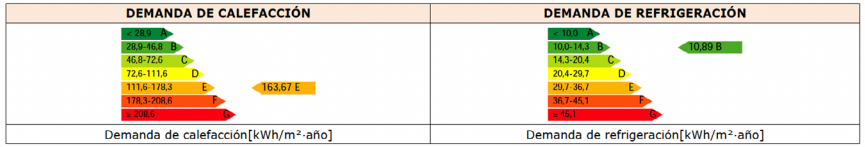


Publicidad programa PRAAST. Fuente: Fenercom

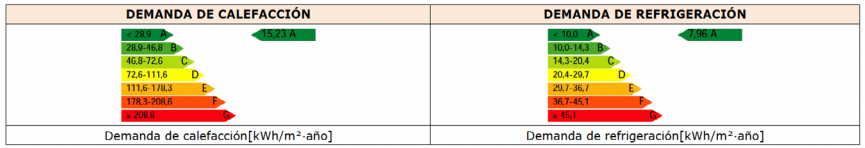
Importancia del certificado de eficiencia energética inicial y final

Un requisito técnico común en la mayoría de ayudas, es la justificación de los ahorros energéticos mediante certificados de eficiencia energética antes y después de la obra. La calificación energética del edificio (según el Real Decreto 390/2021) se utiliza como métrica objetiva para cuantificar la mejora obtenida y reducir riesgos técnicos en las convocatorias. Por ejemplo, en los programas PAREER se exigía mejorar al menos una letra en la calificación o lograr un porcentaje mínimo de ahorro, verificable con los certificados energético inicial y final. Del mismo modo, las deducciones fiscales introducidas en 2021 (descritas abajo) obligan a obtener un certificado de proyecto y otro esperado, de obra terminada para acreditar la reducción del consumo o demanda y así poder acceder al incentivo[6]. Esta doble certificación aporta rigor técnico, ya que cuantifica los ahorros en kWh y verifica que las medidas implementadas alcanzan el desempeño previsto. Además, contar con un certificado energético inicial ayuda a identificar las medidas óptimas de mejora, mientras que el certificado final garantiza que el proyecto efectivamente eleva la eficiencia y permite, en su caso, cuantificar reducciones de emisiones y consumos que pueden ser utilizadas para otras finalidades (como emisión de Certificados de Ahorro Energético, ver sección 9.3).

La demanda energética de calefacción y refrigeración es la energía necesaria para mantener las condiciones internas de confort del edificio.



La demanda energética de calefacción y refrigeración es la energía necesaria para mantener las condiciones internas de confort del edificio.



CEE vivienda unifamiliar aislada año 1982. Estado inicial. Demanda energética. Fuente: Elaboración propia

[5] https://www.cambioclimaticoceuta.com/ayudas-y-subvenciones/autoconsumo/programas-de-ayudas-a-renovables-en-autoconsumo-almacenamiento-y-sistemas-termicos/

[6] https://www.idealista.com/news/fiscalidad/2023/06/27/806510-deduccion-en-el-irpf-por-rehabilitacion-de-vivienda

Libro del Edificio Existente y Pasaporte del Edificio

En línea con la directiva europea de eficiencia energética de edificios (que propugna el building renovation passport), España ha impulsado la herramienta del Libro del Edificio Existente (LEE) como paso previo para planificar rehabilitaciones. El LEE es un documento técnico que recopila el estado del inmueble, inspecciones, mantenimientos pendientes y propone un plan de mejoras a largo plazo para la rehabilitación, incluyendo un cronograma orientativo de actuaciones para alcanzar sucesivamente mayores niveles de eficiencia. De hecho, el LEE incorpora las recomendaciones de la UE sobre el pasaporte de renovación del edificio; una de sus funciones principales es informar a propietarios sobre los beneficios en salud, confort y ahorro que resultarían de las mejoras propuestas, así como orientar sobre las ayudas disponibles[7].

El "Pasaporte del Edificio" se entiende como ese itinerario de rehabilitación energética personalizada para cada inmueble, articulado a través del Libro del Edificio Existente digital. Hasta ahora, existían ayudas específicas (Programa 5 del RD 853/2021) que financiaban la elaboración del LEE y proyectos técnicos iniciales con hasta 9.000 € por edificio[8], fomentando que las comunidades de vecinos dispongan de este "pasaporte" que reduce incertidumbres técnicas y facilita la toma de decisiones informadas sobre qué rehabilitaciones acometer y en qué orden. Incorporar el LEE como requisito en convocatorias futuras podría asegurar que las actuaciones subvencionadas encajen en una estrategia integral de rehabilitación del edificio a medio-largo plazo.



Publicación Guía de Uso del Libro del Edificio Existente. Fuente: CSCAE. Ver modelo LEEx COAM CAM[9]

[7] https://www.cscae.com/index.php/presentacion/189-conoce-cscae/7782-libro-edificio-existente

[8] https://www.comunidad.madrid/servicios/vivienda/ayudas-actuaciones-rehabilitacion-energetica-edificios-residenciales-viviendas-prtr

[9] https://oficinarehabilitacion.coam.org/wp-content/uploads/2025/04/Modelo-LEEx-Oficina-COAM-

Deducciones fiscales por rehabilitación energética

Además de subvenciones directas, el Estado español introdujo incentivos fiscales temporales en el IRPF para quienes emprendieran obras de mejora de la eficiencia energética en sus viviendas (vivienda habitual, alquilada o en perspectiva de alquiler). Actualmente existen tres tramos de deducción fiscal, vigentes (tras prórrogas) hasta finales de 2026, vinculados al nivel de mejora obtenido[10]:

Guía 01 Fondos Next Generation

GUÍA SOBRE DESGRAVACIONES FISCALES PARA REHABILITACIÓN DE VIVIENDAS Y EDIFICIOS RESIDENCIALES

Actualización abril 2024



Fuente: CSCAE

- **Deducción 20% IRPF:** Por obras en vivienda unifamiliar o piso que reduzcan al menos un 7% la demanda anual de calefacción y refrigeración. La mejora debe acreditarse mediante certificado energético antes y después. El máximo deducible es 5.000 € anuales por vivienda. Típicamente incluye actuaciones como mejora de aislamiento en fachadas, cubiertas o cambio de ventanas que logren esa pequeña reducción de demanda térmica.

- **Deducción 40% IRPF:** Por actuaciones que reduzcan mínimo un 30% el consumo de energía primaria no renovable de la vivienda, o alternativamente, alcancen una calificación energética A o B (si partía de C o inferior). Aplica tanto a viviendas unifamiliares como pisos (habitada, alquilada o a alquilar). El tope deducible es 7.500 € anuales. Este tramo incentiva reformas más integrales, por ejemplo: sustitución de calderas por sistemas de bomba de calor, instalación solar fotovoltaica de autoconsumo combinada con envolvente mejorada, etc.

- **Deducción 60% IRPF:** Por obras de rehabilitación energética integral en edificios residenciales (actuación conjunta sobre el edificio completo, ya sea bloque de viviendas o unifamiliar) que logren una reducción del 30% en consumo de energía primaria no renovable del conjunto del edificio o la obtención de clase energética A/B. Cada propietario puede deducir el 60% de lo invertido (proporcional a su coeficiente de participación en la comunidad, en caso de edificio colectivo) con un máximo de 5.000 € por año, acumulable en varios ejercicios hasta un total de 15.000 € por vivienda. Esta deducción, la más potente, está orientada a rehabilitaciones profundas (envolvente + sistemas) realizadas por comunidades de propietarios. Cabe destacar que el ahorro logrado debe ser certificado y registrado oficialmente para poder aplicarse la deducción, lo que nuevamente enfatiza la relevancia de las certificaciones energéticas.

Estas deducciones fiscales no son compatibles entre sí para la misma obra, y además la base de cálculo debe excluir cualquier parte de gasto subvencionado por ayudas públicas. No obstante, suponen un estímulo importante: por ejemplo, una comunidad de vecinos que renueve fachada e instalaciones podría recuperar vía IRPF hasta el 60% del coste no cubierto por subvenciones. Adicionalmente, muchos ayuntamientos ofrecen bonificaciones en impuestos locales como el IBI para inmuebles eficientes o con instalaciones renovables. En Madrid capital, por ejemplo, existe bonificación del IBI de hasta el 50% durante 3 años para viviendas que instalen paneles solares de autoconsumo, con tope del 95% del coste de la instalación[11]. Otras ciudades han estudiado rebajas de IBI según la calificación energética del edificio (en Vitoria se aplica hasta un 20% de descuento a viviendas con etiqueta A). Si bien estas bonificaciones municipales varían según localidad, en conjunto complementan el panorama de incentivos fiscales para la rehabilitación.

Financiación preferente por entidades bancarias

A pesar de las ayudas, en la práctica muchos propietarios requieren financiación para cubrir la parte no subvencionada de las obras. Para ello, se han articulado acuerdos público-privados con entidades financieras que ofrecen préstamos en condiciones favorables ("hipotecas verdes" o créditos de rehabilitación). El Ayuntamiento de Madrid, a través de la EMVS, ha firmado convenios con hasta ocho bancos (Deutsche Bank, UCI, Banco Sabadell, CaixaBank, BBVA, Bankinter, Ibercaja y Triodos) para facilitar préstamos a comunidades de propietarios con tipos de interés inferiores al mercado[12]. Estos préstamos cubren hasta el 100% del coste de la obra de rehabilitación y pueden concederse por adelantado (sin necesidad de esperar a

[10] http://www.cscae.com/index.php/component/jdownloads/send/16-documentos-cscae/56-guia-sobre-desgravaciones-fiscales-para-rehabilitacion-de-viviendas-y-edificios-residenciales?option=com_jdownloads

[11] https://planesdefuturo.mapfre.es/derechos-obligaciones/impuestos/descuento-del-ibi-por-eficiencia-energetica/

[12] https://diario.madrid.es/blog/notas-de-prensa/el-ayuntamiento-facilita-financiacion-preferente-para-obras-de-rehabilitacion-en-viviendas-y-edificios/

cobrar la subvención). Por ejemplo, el programa Avanza Credit de Deutsche Bank está especializado en financiar comunidades: ofrece hasta 15 años de plazo, 2 años de carencia mientras se ejecuta la obra y se tramita la subvención, e incluso ha financiado proyectos íntegros en barrios vulnerables. UCI (Unión de Créditos Inmobiliarios) también dispone de préstamos específicos para rehabilitación eficiente, y Banco Sabadell cuenta con soluciones financieras en el marco de los fondos europeos. Gracias a estas líneas, tras la firma de los acuerdos iniciales en 2020 se financiaron en Madrid más de 1.300 viviendas en 75 comunidades por valor de 13 M€ (préstamo medio ~175.000 €) a intereses reducidos. Esto demuestra el interés del sector bancario en apoyar la rehabilitación, al considerarla una inversión segura que revaloriza los inmuebles y reduce la morosidad (al bajar las facturas energéticas de los vecinos). En suma, a la tríada de subvención + deducción fiscal + ahorro energético, se añade esta financiación preferente que cierra el círculo para que las comunidades puedan afrontar las obras sin barreras económicas insalvables. De cara al futuro, la Unión Europea y las administraciones locales planean focalizar crecientemente las ayudas en los hogares con mayor necesidad económica, para garantizar equidad. La idea es que los fondos públicos prioricen la rehabilitación de edificios con peores prestaciones y residentes vulnerables, evitando que la transición energética deje atrás a quienes menos recursos tienen (principio de "no dejar a nadie atrás"). Algunos mecanismos ya van en esa dirección, como mayores porcentajes de ayuda en barrios declarados de regeneración urbana (ERRP) con riesgo de exclusión. Esta focalización progresiva requerirá combinar subvenciones elevadas (hasta el 80%–100%) para hogares vulnerables, con fórmulas de financiación privada para los de mayor renta, manteniendo el esfuerzo global de renovación del parque edificatorio.

9.2. CASOS DE ÉXITO Y RETORNO DE LA INVERSIÓN



Programas de financiación para rehabilitación de UCI. Fuente: UCI[13]

Los beneficios de la rehabilitación energética se evidencian en diversos casos de éxito en la Comunidad de Madrid, tanto a nivel de edificio individual como de barrios completos. A continuación se destacan algunos ejemplos ilustrativos, indicando la revalorización inmobiliaria lograda, la reducción de consumo energético y la recuperación de la inversión, así como beneficios colaterales técnicos y sociales.

[13] https://uci.es/es/rehabilitacion-de-edificios/

Rehabilitación integral en Poblados Dirigidos (Fuencarral)

En el histórico Poblado Dirigido de Fuencarral (viviendas sociales de los años 50), se ha llevado a cabo un proyecto modélico de regeneración urbana y energética liderado por la arquitecta Mireya Reguart Oyarbide.

La actuación sobre múltiples edificios del barrio, no solo actúa sobre eficiencia energética, sino que además, recupera la composición original de fachada en dimensiones de huecos.

Complementariamente en muchos de ellos se han llevado a cabo también acciones dirigidas a conseguir la accesibilidad en las zonas comunes de los edificios.

Como resultado, los edificios rehabilitados lograron en promedio un 60% de reducción de la demanda de calefacción, mejorando sustancialmente su calificación energética y confort térmico. Este ahorro equivale a dejar de emitir ~1.000 toneladas de CO_2 al año.

Además, gracias a la concurrencia de subvenciones, los propietarios solo asumieron aproximadamente el 13% del coste de la inversión, pues el 87% fue cubierto por ayudas públicas. En términos de retorno económico, la combinación de subvenciones masivas con la drástica reducción de las facturas energéticas implica que la rehabilitación se amortiza prácticamente de inmediato para los vecinos (su aportación fue mínima y se compensa con el ahorro en unos pocos años).

Socialmente, la intervención tuvo enormes beneficios: mejor habitabilidad en viviendas de población envejecida (se instalaron ascensores y rampas donde no los había, mejorando la accesibilidad en edificios de más de 4 plantas), se erradicó la pobreza energética en un barrio vulnerable y se dignificó el entorno urbano.

Tras las rehabilitaciones integrales, los edificios han visto incrementado su valor de mercado hasta en un 20-25% debido a su mayor eficiencia y renovada estética. Este caso demuestra cómo la rehabilitación a escala de barrio puede generar un círculo virtuoso: ahorro económico, plusvalías inmobiliarias, mejora social (vecinos más satisfechos, barrios revitalizados) y beneficios ambientales locales (menos emisiones, mejor calidad del aire).

Edificio residencial en Móstoles (Cerro Prieto)

En Móstoles, municipio muy poblado de la región, se están acometiendo rehabilitaciones energéticas destacables.

Un ejemplo es la renovación de un bloque de viviendas en la Avenida de Portugal (barrio Cerro Prieto), construido en los años 70. Presentaba una envolvente pobre (muros sin aislamiento, ventanas antiguas) que provocaba consumos elevados y problemas de condensación[14]. Mediante la instalación de un Sistema de Aislamiento Térmico Exterior (SATE) en toda la fachada –poliestireno grafitado de alto espesor, morteros especiales y nuevos revestimientos– se mejoró drásticamente el aislamiento térmico del edificio.

[14] https://www.juno.es/proyectos/proyectos-rehabilitacion-energetica-obra-nueva/

Los resultados han sido notables: se estima una reducción superior al 45% en demanda de calefacción, con el consiguiente ahorro económico para los vecinos, y se ha eliminado la aparición de humedades interiores.

A falta de datos exactos de consumo, los residentes reportan un mayor confort térmico y menor uso de la calefacción tras la rehabilitación. Además, la estética del inmueble mejoró sustancialmente, revalorizando las viviendas.

Este proyecto fue posible gracias al apoyo del ayuntamiento mediante el plan Móstoles Regenera (que provee asesoramiento y facilita la tramitación de ayudas), así como a subvenciones del programa PREE. La recuperación de la inversión para cada propietario se estima en menos de 10 años considerando el ahorro en energía, pero si se incluyen las subvenciones obtenidas (que cubrieron ~50% del presupuesto), el payback real se reduce a aproximadamente 5 años.

Cabe mencionar que Móstoles ha apostado por la rehabilitación a nivel de barrio: existen oficinas municipales de rehabilitación energética y se priorizan barrios con edificios envejecidos, lo que multiplica estos casos de éxito.

Otros casos en municipios de Madrid

En Leganés, otro municipio importante, también se han ejecutado proyectos de rehabilitación energética en comunidades de vecinos antiguas.

Un caso representativo es la rehabilitación de fachadas en edificios de los años 60 en el barrio de Zarzaquemada, mediante SATE y sustitución de ventanas. Estas mejoras alcanzaron reducciones de consumo superiores al 30% y permitieron acceder a deducciones fiscales y ayudas Next Generation que costearon buena parte de la obra. Muchos vecinos vieron cómo sus pisos aumentaban de valor (se estima un +10-15%) tras obtener una calificación energética mejor (p.ej. subir de E a C) – lo cual coincide con estudios del sector inmobiliario que cifran en torno al 10-20% la revalorización de una vivienda por convertirse en energéticamente eficiente[15].

En barrios de Leganés con población vulnerable, las rehabilitaciones han redundado también en cohesión social: las comunidades se organizan para mejorar su entorno, y se genera empleo local durante las obras.

A escala de barrio, la Comunidad de Madrid tiene declarados varios Entornos Residenciales de Rehabilitación Programada (ERRP, Programa 1) en distritos de la capital (Puente de Vallecas, Usera, Villaverde, etc.) y municipios, donde se concentra el esfuerzo inversor.

La experiencia demuestra que rehabilitar múltiples edificios contiguos aporta economías de escala (contratar conjuntamente reduce costes) y beneficios comunitarios: por ejemplo, mejorar aislamientos en bloques colindantes potencia el confort de todo el vecindario y puede permitir actuaciones complementarias como modernización de alumbrado público, creación de zonas verdes, etc.

[15] https://www.eleconomista.es/vivienda/noticias/11736230/04/22/Las-viviendas-se-revalorizan-hasta-un-20-tras-larehabilitacion.html

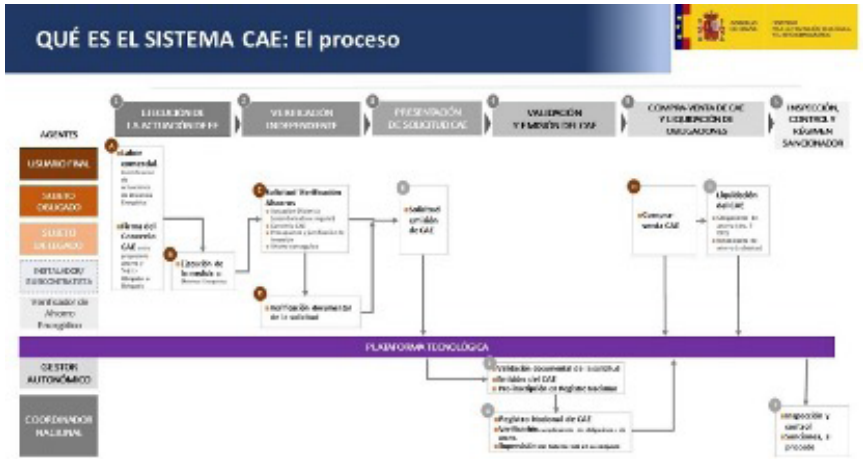
Los casos de éxito madrileños evidencian que la rehabilitación energética sí es rentable. La inversión se recupera vía ahorros en energía (50% en promedio en muchos proyectos recientes), vía incremento del valor del activo, y vía mejora de la calidad de vida (difícil de cuantificar, pero tangible en la salud y satisfacción de los residentes).

Una vivienda eficiente puede reducir 30-70% el consumo de energía y 40% el de agua, lo que ahorra dinero al usuario a la vez que revaloriza la vivienda en un 10-20% de su valor. Si a esto sumamos las ayudas públicas disponibles y los nuevos ingresos posibles por instrumentos como los CAEs, la ecuación económica de la rehabilitación es cada vez más favorable, reduciendo los periodos de retorno de inversión.

9.3. CERTIFICADOS DE AHORRO ENERGÉTICO (CAEs)

En 2023 España puso en marcha un nuevo mecanismo de impulso a la eficiencia: los Certificados de Ahorro Energético (CAEs). Se trata de un sistema tipo "white certificates" alineado con la Directiva de Eficiencia Energética de la UE, que permite cuantificar y monetizar los ahorros de energía logrados por proyectos de eficiencia.

¿Qué es un CAE y cómo se cuantifica?



Fuente: RD 36/2023 – Oficina de Rehabilitación del COAM.

Un Certificado de Ahorro Energético es un documento electrónico emitido por la autoridad competente que certifica que, tras una determinada actuación de eficiencia energética, se ha conseguido un ahorro de energía final de 1 kWh anual[16]. Dicho de otro modo: 1 CAE = 1 kWh ahorrado (en términos de energía final). Si una rehabilitación reduce, por ejemplo, el consumo anual del edificio en 5000 kWh, se generarían 5000 CAEs. El Sistema CAE, establecido por el Real Decreto 36/2023, define procedimientos rigurosos para calcular esos ahorros de forma

[16] https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/cae.html

fiable. Existen dos modalidades: medidas estandarizadas (recogidas en un Catálogo oficial con fichas técnicas y factores de ahorro predefinidos) y medidas singulares (donde el ahorro se calcula con metodologías ad hoc, p.ej. mediante mediciones o simulaciones, y debe ser verificado caso por caso).

En la práctica, la mayoría de actuaciones en edificios se acogen a fichas estandarizadas para simplificar: el MITECO ha publicado un catálogo con decenas de fichas que indican cuántos kWh se consideran ahorrados por cada unidad de medida implementada (por ejemplo, por cada m² de fachada aislada, cada caldera sustituida por bomba de calor, cada ventana cambiada, etc.). Esto aporta transparencia y agilidad al sistema, ya que antes de acometer el proyecto uno puede estimar cuántos CAEs obtendría. Una vez ejecutada la medida, un verificador acreditado revisa que se ha implantado correctamente y emite un informe aprobando los ahorros estimados. Con ello, el titular de la actuación (propietario del edificio o entidad delegada) solicita la expedición de los CAEs en la plataforma habilitada, los cuales quedan inscritos electrónicamente.

Funcionamiento y valor de los CAEs

¿Para qué sirven estos certificados? Básicamente, los CAEs tienen un valor económico porque los llamados sujetos obligados –las comercializadoras de energía eléctrica, gas y operadores de productos petrolíferos– están obligadas por ley a lograr cada año un cupo de ahorro energético (objetivos nacionales de eficiencia)[17].

Ahora bien, en lugar de realizar directamente acciones de ahorro, estas empresas pueden comprar CAEs equivalentes a esos ahorros a quienes los generen. Es un mercado regulado: si una compañía no adquiere suficientes CAEs, deberá contribuir al Fondo Nacional de Eficiencia Energética pagando una cuota (históricamente, esa contribución ha sido costosa, por lo que existe incentivo a comprar CAEs si son más baratos que la penalización).

En España, el coste de cumplimiento equivale a ~2,2 millones € por ktep ahorrado (kilotonelada equivalente de petróleo)[18], lo que traducido a energía final supone onerosos euros por kWh. Por tanto, los CAEs tienen un valor de mercado: se estima que en 2025 el valor por kWh ahorrado tenderá al alza para incentivar proyectos más ambiciosos[19].

De hecho, casos reales ya muestran retornos interesantes: por ejemplo, una industria aragonesa que ahorró ~1.029.000 kWh/año en un proyecto de eficiencia obtuvo 113.240 € al vender los CAEs generados, ingresando más del doble de lo que ahorró en su factura energética (46.668 €). Este ingreso extra transformó un proyecto que sin CAEs tendría retorno negativo, en uno con rentabilidad económica clara.

[17] https://www.arquitecturar.com/certificado-ahorro-energetico-edificios-residenciales/

[18] https://www.fcirce.es/blog/certificados-de-ahorro-energetico-caes-en-2025-como-ahorrar-mas-en-tu-empresa

[19] https://serviciosempresariales.camaramadrid.es/certificados-ahorro-energetico-impulso-eficiencia-energetica-espana/

En edificios residenciales, los CAEs probablemente generen importes más modestos por edificio (dependiendo de los kWh ahorrados), pero aun así suponen recuperar una parte adicional de la inversión: esencialmente, vender el ahorro de energía conseguido. Por ejemplo, si una comunidad reduce 30.000 kWh anuales tras aislar su edificio, y suponiendo un valor de 0,1 € por kWh ahorrado, podría obtener ~3.000 € mediante CAEs – cifra nada desdeñable si se considera que se suma a las subvenciones y ahorros en facturas.

Viabilidad en comunidades de propietarios

Las comunidades de vecinos pueden beneficiarse del sistema CAE, aunque el proceso técnico-administrativo requiere cierta asistencia profesional. Según la normativa, los clientes finales (particulares, empresas o comunidades) pueden generar CAEs por sus ahorros y transferirlos a los sujetos obligados.

Para tramitarlo, normalmente interviene un "sujeto delegado", figura que suele corresponder a una Empresa de Servicios Energéticos (ESE) u otra entidad acreditada. En la práctica, una comunidad de propietarios que realiza una rehabilitación energética puede delegar en una ESE la gestión de sus ahorros: la empresa verifica los kWh ahorrados, registra la solicitud de CAEs y luego los vende en el mercado a un sujeto obligado (una comercializadora).

Las ESE actúan así como agregadores, agrupando los ahorros de muchos pequeños clientes para negociar con las energéticas. A cambio, suelen retener una comisión o parte de los ingresos de los CAEs, pero el resto se revierte a la comunidad. Alternativamente, la comunidad podría tramitarlo por sí misma si dispone de apoyo técnico, aunque dado que requiere certificaciones y acceso a la plataforma del MITECO, lo habitual será confiar en especialistas. Este esquema es viable incluso en régimen de división horizontal: no es necesario que el edificio tenga un solo propietario, basta con que la comunidad acuerde realizar la actuación común y autorice a un gestor a certificar el ahorro conjunto. Un aspecto importante es que los CAEs se generan una vez por la actuación (no anualmente recurrente), certificando el ahorro conseguido por año tipo a partir de la reforma.

Es decir, si el aislamiento instalado ahorra X kWh cada año, se obtienen X CAEs una sola vez (no cada año), que se liquidan en el ejercicio de cumplimiento correspondiente. Por tanto, se recomienda solicitar los CAEs tan pronto finaliza la obra y se constatan los ahorros, para monetizarlos cuanto antes.

Mecanismos actuales para obtener ingresos por CAEs

En el momento actual (2025-2026), el Sistema CAE se encuentra en fase de consolidación. Desde su puesta en marcha en noviembre de 2023 hasta principios de 2024, ya se habían solicitado más de 196 GWh/año de ahorros para certificar, equivalentes a unos 1,96 millones de € en valor, lo que indica un interés significativo.

Existen 35 empresas acreditadas oficialmente como sujetos delegados para tramitar CAEs, varias de las cuales se están publicitando activamente a comunidades de propietarios y pymes.

Por ejemplo, compañías consultoras energéticas, asociaciones como ACIE, o plataformas como Energía Abierta ofrecen servicios llave en mano: evalúan gratuitamente el potencial de CAEs de tu proyecto, y si es viable, gestionan la certificación y venta. Los ingresos por la venta de CAEs suelen materializarse mediante un contrato privado: la energética obligada compra los CAEs y transfiere el dinero (sea al sujeto delegado o a la comunidad directamente, según se pacte).

Regulación de precios

No existe un precio fijo por CAE, sino que depende de la oferta-demanda y del coste de aportar al Fondo de Eficiencia. Sin embargo, el Gobierno ha fijado una equivalencia orientativa – mencionada arriba – que en la práctica sitúa el valor en torno a 0,1 € por kWh (100 € por MWh) o más, sujeto a actualización.

Cabe señalar que estos ingresos por CAEs son compatibles con las subvenciones tradicionales, aunque obviamente no se pueden contabilizar como ahorro del usuario (puesto que provienen de la venta del ahorro). De hecho, el RD 36/2023 aclara que los ahorros energéticos por los que ya se haya recibido una subvención pública también pueden destinarse a CAEs, siempre que sean "nuevos ahorros" reales.

Esto permite que una comunidad que obtuvo, por ejemplo, un 50% de subvención, todavía pueda recuperar otra fracción de la inversión vendiendo los ahorros en forma de CAEs, logrando así reducir aún más el coste neto de la rehabilitación.

En resumen, los Certificados de Ahorro Energético constituyen una herramienta innovadora para dotar de ingresos adicionales a los proyectos de rehabilitación: premian con dinero los kWh no consumidos.

Para un edificio residencial típico, los CAEs por rehabilitar su envolvente y sistemas quizá no financien todo el proyecto, pero sí pueden representar ese "último empujón" financiero que mejore la rentabilidad y anime a las comunidades a dar el paso.

Junto con las subvenciones, créditos blandos y ahorros en la factura, los CAEs completan un panorama en el que rehabilitar energéticamente un edificio es más atractivo y sostenible económicamente que nunca.

10 CERTIFICACIONES AMBIENTALES

Las certificaciones ambientales en edificación son sellos voluntarios que verifican de forma objetiva el grado de sostenibilidad de proyecto y obra arquitectónica. Estos sistemas evalúan múltiples aspectos del edificio, yendo más allá del simple ahorro energético, abarcando criterios de salud y bienestar de los usuarios, economía circular (gestión de recursos y residuos), análisis de ciclo de vida de materiales, impacto en la comunidad y otros indicadores de desempeño sostenible. Al obtener una certificación ambiental, un edificio demuestra ante terceros su compromiso con la sostenibilidad en sus tres vertientes: ambiental, social y económica.

10.1. LEVEL(S), CERTIFICACIONES VERDE, DGNB, BREEAM ES, PASSIVHAUS, VIVE COAM

Level(s), VERDE, DGNB, BREEAM ES, PassivHaus y VIVE COAM constituyen seis de los sistemas de certificación o evaluación de la sostenibilidad más relevantes en el contexto madrileño y español. Cada uno presenta enfoques y alcances diferentes, por lo que su elección dependerá del tipo de proyecto (obra nueva o rehabilitación), sus objetivos específicos y el marco geográfico o institucional. Antes de describir individualmente cada sistema, conviene destacar que no se incluye en este capítulo la certificación LEED (EE.UU.), ya que su equivalente adaptado al contexto español es precisamente el sello VERDE del Green Building Council España (GBCe), con criterios más rigurosos y acordes a la normativa local[1].

Se detalla cada certificación mencionada, seguida de una comparativa de sus ventajas, desventajas, ámbitos de evaluación y aplicaciones preferentes en proyectos de rehabilitación residencial, terciaria o institucional.

10.1.1. Level(s): Marco común europeo de sostenibilidad

Level(s) es un marco de indicadores de sostenibilidad desarrollado por la Comisión Europea[2], orientado a crear un lenguaje común para evaluar y reportar el desempeño ambiental de los edificios a lo largo de su ciclo de vida. A diferencia de las certificaciones tradicionales (BREEAM, LEED, DGNB, VERDE), Level(s) no otorga una etiqueta o puntuación final, sino que proporciona una metodología y un conjunto de seis macro-objetivos con indicadores asociados, garantizando consistencia y comparabilidad en las evaluaciones. Estos seis macro-objetivos abarcan las principales áreas de impacto en la edificación sostenible:

- **Emisiones de gases de efecto invernadero** (GEI) a lo largo del ciclo de vida del edificio (incluyendo análisis de ciclo de vida de carbono incorporado en materiales y energía operativa).

- **Uso eficiente de recursos y economía circular**, abordando la gestión de materiales, residuos de construcción y fin de vida útil de los componentes .

[1] https://arquitectura-sostenible.es/certificado-verde-gbce/

[2] https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2023-02/UM1.ENV-2020-00021-02-00-ES-TRA-00.pdf

- **Uso eficiente del agua** durante la vida útil del edificio.
- **Espacios interiores saludables y confortables**, evaluando la calidad del aire, confort térmico, iluminación natural, confort acústico, etc..
- **Adaptación al cambio climático y resiliencia**, considerando la capacidad del edificio para afrontar escenarios futuros (fenómenos extremos, inundaciones, olas de calor) .
- **Coste y valor del ciclo de vida**, analizando los costos totales de construcción, operación y mantenimiento, así como el valor aportado a largo plazo .

Level(s) se aplica tanto a edificaciones residenciales como terciarias (oficinas), en proyectos de nueva planta o de rehabilitación, y no fija umbrales de cumplimiento "apto/no apto" – es decir, no califica con un nivel tipo plata u oro, sino que establece qué parámetros medir y cómo informar. Esto lo hace especialmente útil como herramienta de diseño y evaluación interna, permitiendo a los equipos técnicos identificar mejoras y comparar opciones de manera objetiva. En la práctica, Level(s) se está integrando progresivamente en las herramientas de certificación existentes en Europa e incluso sirviendo de base para futuras normativas: por ejemplo, muchos de sus indicadores (como la huella de carbono de ciclo de vida) se incorporarán a las exigencias nacionales. De hecho, la nueva Directiva Europea de Eficiencia Energética de Edificios (EPBD) prevé la inclusión de un Documento Básico de Sostenibilidad en el Código Técnico de la Edificación (CTE) español en 2026, que inicialmente será voluntario, pero a partir de 2030 hará obligatorio evaluar la sostenibilidad (ACV) en todos los proyectos. Esto significa que herramientas basadas en Level(s) –como el Ecómetro ACV, desarrollada en España para cálculo de impactos en fase de proyecto– serán clave en la práctica profesional próxima.



Fuente: Comisión Europea

El Ecómetro es una herramienta de análisis de ciclo de vida de código abierto, promovida y desarrollada por la Asociación Ecómetro y que actualmente cuenta con un convenio con el COAM, que permite calcular la huella de carbono y otros 20 impactos ambientales de un proyecto de edificación en poco tiempo, facilitando así el cumplimiento de las nuevas exigencias de sostenibilidad[3].

Ventajas: Level(s) ofrece un enfoque holístico y estandarizado a nivel europeo, fomentando la comparabilidad entre proyectos y países. Es gratuito y abierto, respaldado por la Comisión Europea, lo que lo hace accesible para todo tipo de agentes (administraciones, técnicos, promotores). Cubre aspectos no atendidos por las normativas energéticas tradicionales (como el impacto de materiales y ciclo de vida completo), alineándose con objetivos de neutralidad climática 2050. Para proyectos de rehabilitación energética, Level(s) permite cuantificar beneficios más allá de la reducción de consumo operativo (por ejemplo, la reducción de emisiones de carbono embebido al reutilizar elementos existentes, la mejora en salud interior tras la rehabilitación, etc.), generando informes que pueden apoyar la toma de decisiones y la comunicación del valor añadido de la intervención.

Inconvenientes: Al no ser una certificación con un sello reconocible por el mercado, Level(s) no proporciona un distintivo inmediato para marketing o incremento de valor del inmueble. Su implementación requiere cierta capacitación técnica en ACV y manejo de indicadores, lo que implica esfuerzo adicional para los proyectistas. Dado que no tiene un organismo certificador que audite, la responsabilidad recae en el equipo técnico para asegurar la fiabilidad de los datos reportados. En resumen, Level(s) es más una metodología de evaluación que un sello comercial, por lo que suele usarse complementariamente a otras certificaciones (por ejemplo, VERDE o BREEAM ya incorporan criterios alineados con Level(s) en sus versiones más recientes).

Aplicación preferente: Level(s) es recomendable en cualquier proyecto de rehabilitación cuyo equipo quiera anticiparse a las futuras exigencias normativas y profundizar en la sostenibilidad integral. Puede emplearse como guía inicial de diseño sostenible, incluso si luego se opta por certificar con otro sello. En la Comunidad de Madrid, donde el COAM está impulsando la integración del ACV en el visado colegial, usar Level(s) y herramientas como Ecómetro puede ser especialmente útil para rehabilitaciones integrales de edificios públicos o residenciales, de cara a cumplir con las próximas obligaciones de justificación de huella de carbono. En proyectos de regeneración urbana financiados con fondos europeos (Next Generation, etc.), Level(s) aporta un marco común para reportar indicadores de sostenibilidad tal como suelen requerir esos programas.

10.1.2. VERDE (GBCe): Certificación española de sostenibilidad

VERDE (acrónimo de "Valoración de Eficiencia de Referencia de Edificios") es el sello de certificación ambiental desarrollado en España por el Green Building Council

[3] https://ecometro.org/2025/04/08/el-coam-incorpora-el-analisis-de-ciclo-de-vida-en-el-visado-de-proyectos/

España (GBCe) desde 2009. Se trata de un sistema integral pensado para nuestras condiciones normativas, climáticas y culturales, surgido como alternativa local a LEED. De hecho, GBCe es miembro del WorldGBC y diseñó VERDE para adaptarse al contexto español, incorporando criterios específicos de nuestro clima, normativa y prioridades ambientales[4]. VERDE evalúa la sostenibilidad del edificio a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la fase de diseño hasta la construcción, el uso y el eventual fin de vida. La metodología de evaluación de VERDE está basada en la cuantificación de reducción de impactos respecto a un edificio de referencia, apoyándose fuertemente en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y en indicadores medibles.



Biblioteca Municipal "Los mil soles" (Francisco Umbral) – Madrid. Fuente: madc & partners. Certificador VERDE: A. Bosqued. 4 hojas VERDE (Versión 2020) equivalente a VERDE ORO. Foto: Javier Callejas.

El sistema VERDE aborda cinco grandes áreas[5] (alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU y con el marco Level(s) europeo y Taxonomía Europea): Estrategias ambientales, Estrategias sociales, Estrategias económicas, Gestión del entorno y Calidad del proceso.

En la práctica, GBCe organiza los criterios en seis categorías técnicas: emplazamiento y parcela, energía y atmósfera, recursos naturales, calidad del ambiente interior, calidad del servicio (infraestructura y técnica) y aspectos sociales-económicos.

Cada categoría contiene múltiples criterios con ponderaciones; por ejemplo, en el Ciclo de Energía se valoran la demanda de calefacción/refrigeración, el uso de renovables, las emisiones de CO_2, etc.; en el Ciclo de los Materiales, se considera la selección de materiales sostenibles con bajo carbono, gestión de residuos y la huella de carbono de materiales; en Edificios Inclusivos, se incluyen accesibilidad, bienestar de usuarios e impacto comunitario, entre otros. Este enfoque holístico garantiza que un edificio certificado VERDE tenga un desempeño equilibrado: de hecho, se exige un mínimo de puntuación en cada área para lograr la certificación.

El proceso de certificación VERDE suele dividirse en dos fases: una Pre-certificación durante el diseño (que guía al equipo técnico con recomendaciones y evaluación preliminar), y la Certificación final tras la construcción, verificando in situ el cumplimiento de los objetivos planteados. GBCe dispone de una plataforma online donde se registran los proyectos y se entregan evidencias documentales.

Es necesario contar con un evaluador acreditado (un Evaluador Autorizado VERDE) que recopila y verifica los documentos justificativos de cada criterio.

GBCe realiza una revisión independiente antes de otorgar el certificado. Tradicionalmente, la puntuación final de VERDE se expresaba en una escala de "hojas", de 0 a 5 hojas (siendo 5 hojas el nivel máximo de sostenibilidad alcanzado). No obstante, desde 2022 se introdujo una correspondencia con categorías tipo medalla para facilitar la comunicación: así, un determinado porcentaje de cumplimiento se traduce ahora en un nivel Bronce, Plata, Oro o Platino, equivalente a las antiguas hojas. Esto alinea a VERDE con otros sistemas internacionales en cuanto a nomenclatura de niveles, si bien mantiene su identidad técnica propia. Por ejemplo, un edificio que antes obtenía 5 hojas VERDE ahora sería reconocido como VERDE Platino si cumple con los porcentajes requeridos.

Ventajas: VERDE es probablemente la certificación más adaptada a rehabilitación en España, ya que cuenta con metodologías específicas para edificios existentes y actuaciones de rehabilitación. Sus criterios están ligados a la normativa española (CTE, RITE, etc.), haciendo más fácil integrar la justificación de la certificación con la del proyecto básico o de ejecución.

Por ejemplo, los cálculos energéticos parten de las exigencias del DB-HE local. Además, desde su actualización 2022, VERDE incorpora plenamente indicadores de Level(s) y requisitos de la Taxonomía verde europea en sus criterios, adelantándose a lo que pronto será obligatorio.

Otra fortaleza es su visión holística: un certificado VERDE refleja desempeño en salud, confort, economía circular, comunidad y calidad técnica, no solo energía. Esto aporta un alto valor educativo al equipo de proyecto; muchos arquitectos destacan que seguir el proceso VERDE mejora sustancialmente la calidad global del proyecto independientemente del sello obtenido.

Asimismo, GBCe es una entidad sin ánimo de lucro y la certificación VERDE suele tener un coste más asequible que otras internacionales, especialmente para proyectos pequeños.

Para un edificio de viviendas en rehabilitación, puede representar un sobrecoste asumible comparado con los ahorros potenciales (en consumo y en valorización del inmueble).

En cuanto a reconocimiento, aunque VERDE es principalmente nacional, cada vez es más valorado: ya existen alrededor de 412 edificios certificados VERDE en España (a mediados de 2025), y algunos promotores lo prefieren por su rigurosidad local.

De hecho, al no incluirse LEED en algunas convocatorias públicas españolas, VERDE se ha convertido en la alternativa de prestigio local, con casos ejemplares. Un ejemplo destacado es Casa Sophia en Guadalix de la Sierra (Madrid), una vivienda

[4] https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/el-sello-para-distinguir-las-edificaciones-sostenibles-asi-funciona-la-certificacion-verde/

[5] https://gbce.es/esquemas_cert/verde-edificios-2022/

unifamiliar rehabilitada con criterios bioclimáticos que logró la puntuación VERDE más alta hasta la fecha en España, demostrando el nivel de excelencia al que se puede llegar con este sello.

Desde la versión 2030, VERDE cuenta con reconocimiento global: El certificado además está oficialmente reconocido por GRESB[6] como sistema de certificación válido para su inclusión en el GRESB Real Estate Assessment, con la categoría de Full Points Validation Status, lo que refuerza la solidez técnica y la alineación del certificado con los estándares ESG más exigentes.

Otros ejemplos de rehabilitación sostenible certificados con VERDE incluyen la rehabilitación integral del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid (COAM), que obtuvo en su día 4 hojas VERDE, o proyectos residenciales de los programas ECO-OOH de la EMVS en Madrid.

Inconvenientes: El principal desafío de VERDE es su menor reconocimiento internacional frente a sellos como BREEAM o LEED.

Para promotores que busquen marketing global o atraer inversores extranjeros, un certificado local puede no ser tan inmediatamente comprensible (aunque GBCe ha paliado esto con la equivalencia a medallas y su colaboración con DGNB, como se menciona más adelante).

Por otro lado, la documentación técnica requerida en VERDE es muy amplia y detallada; aunque esto asegura rigor, puede suponer una carga notable para el equipo de proyecto. Cada crédito exige evidencias (planos, memorias, cálculos) que deben prepararse cuidadosamente, y el evaluador externo revisa cada punto, lo que prolonga plazos.

En rehabilitación, a veces ciertos créditos son difíciles de alcanzar (por ejemplo, criterios de emplazamiento o de orientación pueden estar limitados por el edificio existente). También es necesario que al menos un miembro del equipo esté acreditado o subcontratar un consultor evaluador, lo que añade coste. No obstante, este coste suele justificarse si se persigue un alto nivel de certificación.

Finalmente, cabe señalar que el proceso de certificación VERDE puede ser percibido como complejo para quienes lo abordan por primera vez, debido al número de indicadores; sin embargo, GBCe ofrece guías y acompañamiento, y muchos criterios están alineados con buenas prácticas arquitectónicas estándar.

Aplicación preferente: VERDE es altamente recomendado para proyectos de rehabilitación integral en España que busquen una certificación de sostenibilidad robusta y adaptada.

En la Comunidad de Madrid, es una opción idónea para edificios públicos rehabilitados (ayuntamientos, centros educativos, sanitarios) dado que evalúa componentes como la integración social y la economía local, alineados con objetivos de las administraciones.

[6] https://www.gresb.com/nl-en/

También en vivienda colectiva en rehabilitación energética profunda (por ejemplo, renovación de barrios) VERDE ofrece un marco que abarca tanto la eficiencia energética como la mejora del confort y la accesibilidad, aspectos críticos en vivienda.

Promotores privados enfocados en mercado nacional encuentran en VERDE un sello creíble para añadir valor de mercado: certificaciones GBCe han ayudado a vender viviendas con el argumento de menor coste operativo y mayor salubridad. No obstante, si el proyecto apunta a un reconocimiento más allá de España (por ejemplo, un edificio de oficinas en Madrid para un fondo de inversión internacional), a veces se opta por una doble certificación: VERDE junto con un sello global (DGNB o BREEAM). Afortunadamente, GBCe permite certificar un proyecto simultáneamente con VERDE y DGNB de forma coordinada, aprovechando la homologación de criterios entre ambos sistemas.

10.1.3. DGNB: Sello alemán con presencia en España vía GBCe

DGNB es la certificación de sostenibilidad desarrollada por el Consejo Alemán de Construcción Sostenible (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) desde 2009[7].



Fuente: GBCe - Green Building Council España

Se ha posicionado internacionalmente como un referente de excelencia técnica, considerado a menudo el "Global Benchmark for Sustainability" por su enfoque holístico y exigente. El sistema evalúa edificios en 5 grandes ámbitos de calidad: Ambiental, Económica, Sociocultural y Funcional, Técnica y Proceso, a los que suma consideraciones de ubicación (si bien esta última no influye en la nota final). Esta estructura da idea de su filosofía: DGNB busca un equilibrio entre la calidad ambiental (p.ej. bajas emisiones, ACV favorable), la calidad social (confort, accesibilidad, impacto comunitario) y la viabilidad económica (costes de ciclo de vida, valor residual), además de valorar la calidad técnica (durabilidad, mantenimiento, resiliencia) y un proceso bien gestionado (gestión de obra, commissioning, etc.).

En muchos sentidos, DGNB comparte con VERDE la aproximación integral, lo cual facilitó que GBCe y DGNB establecieran una alianza: desde 2015 aproximadamente, GBCe actúa como socio local de DGNB en España, ofreciendo la Certificación DGNB adaptada (DGNB System ES) en paralelo al sello VERDE. De hecho, un edificio evaluado con VERDE puede optar a certificado DGNB con trámites adicionales mínimos, ya que ambos sistemas están "hermanados" y comparten metodología en buena medida.

DGNB utiliza una escala de puntuación porcentual de 0 a 100%. El nivel de certificación se otorga en Plata, Oro o Platino para edificios nuevos que alcancen

[7] https://gbce.es/metodologia-dgnb/

los umbrales correspondientes de cumplimiento de criterios (anteriormente existía nivel Bronce solo en ciertos esquemas).

Cabe mencionar que, en España, GBCe emite los certificados DGNB y los proyectos nacionales certificados hasta la fecha han logrado niveles Oro o Platino principalmente en edificios de oficinas de nueva planta. Sin embargo, DGNB también cuenta con esquemas para edificios existentes y rehabilitaciones (por ejemplo, DGNB Renovación), por lo que es aplicable a proyectos de mejora sobre construcciones existentes. Una característica distintiva de DGNB es su énfasis en la optimización continua: más que un checklist fijo, premia la mejora porcentual en cada criterio. Además, requiere obligatoriamente la realización de análisis de ciclo de vida (ACV) y análisis de ciclo de coste (LCC) como parte de la evaluación, incluso en fase de diseño, fomentando decisiones informadas por datos.

Ventajas: DGNB es reconocida por su rigor científico y transparencia. Los manuales DGNB detallan fórmulas de cálculo para cada criterio, promoviendo que los proyectistas aprendan y cuantifiquen los impactos (no es un simple cumplimiento de precondiciones, sino un proceso optimizable).

Esta profundidad la hace muy valiosa para proyectos innovadores o de alta exigencia, donde se busca la máxima sostenibilidad demostrable.

En rehabilitación, DGNB permite poner en valor medidas como la conservación adaptativa de edificios históricos (evitando emisiones de nueva construcción), la mejora de la calidad de espacios existentes y la participación del usuario final en el diseño (aspectos socioculturales).

Otra ventaja es su credibilidad internacional: un certificado DGNB Platino en un edificio rehabilitado en Madrid sería reconocido y respetado en toda Europa, aportando prestigio al propietario e incluso ventajas competitivas en acceso a financiación verde.

Precisamente, bancos y fondos internacionales comienzan a exigir certificaciones para activos inmobiliarios sostenibles, y junto con BREEAM y LEED, DGNB es de las más aceptadas; de hecho, en Europa más del 60% de inversores inmobiliarios ya prefiere BREEAM o similares, y DGNB es nombrado junto a LEED entre los estándares relevantes[8].

En España, la colaboración GBCe-DGNB significa que existe ya capacidad técnica local (consultores formados) y documentación en español para llevar a cabo la certificación, reduciendo barreras idiomáticas o de adaptación normativa.

Inconvenientes: Por su inherente complejidad, DGNB puede percibirse como más demandante en esfuerzo técnico que otros sellos. La necesidad de realizar un ACV completo y un análisis de coste de ciclo de vida durante el proyecto implica dedicar recursos especializados (software, datos ambientales, analistas), lo cual puede ser un reto en proyectos de rehabilitación pequeños con presupuesto limitado.

Asimismo, el coste de certificación con DGNB a través de GBCe es significativo (tarifas oficiales + consultoría), por lo que hasta ahora ha estado restringido mayoritariamente a proyectos de cierto volumen (edificios corporativos, sedes institucionales, etc.).

[8] https://breeam.es/por-que-certificar/

En comparación con VERDE, hay menos proyectos residenciales certificados DGNB en España, lo que sugiere que no ha calado aún en rehabilitación de vivienda privada, quizá por falta de demanda del mercado residencial.

Otro punto a considerar es que, aunque GBCe facilite la certificación, DGNB es menos conocido por el público general en España; así, el valor comercial para promoción inmobiliaria local puede ser menor que BREEAM o incluso que VERDE en entornos municipales.

No obstante, en círculos profesionales e inversores informados, DGNB sí otorga distinción.

Por último, se necesita la participación de un Auditor DGNB acreditado, figura análoga al Evaluador Acreditado VERDE (EA VERDE), para tramitar la certificación – lo que implica contratar a terceros especializados si el estudio de arquitectura no cuenta con uno.

Aplicación preferente: DGNB está especialmente indicado para proyectos de rehabilitación de alto nivel o emblemáticos, donde se busque alcanzar un estándar máximo de sostenibilidad con reconocimiento global. Por ejemplo, la rehabilitación de un edificio corporativo o sede institucional en Madrid podría beneficiarse de DGNB para destacar en responsabilidad social corporativa y compromiso ambiental. Si el proyecto aspira a la excelencia en todos los ámbitos (energético, material, bienestar, economía), DGNB proporciona el marco para conseguir un edificio "mejor que nuevo" tras la rehabilitación.

En casos de colaboración internacional (p.ej. un arquitecto alemán en un proyecto en España, o fondos europeos en la financiación), usar DGNB asegura alineación con las prácticas centroeuropeas.

En la Comunidad de Madrid, donde ya existe experiencia con BREEAM en edificios terciarios, DGNB podría emplearse para diferenciar proyectos punteros – por ejemplo, la futura rehabilitación de un complejo empresarial buscando ser referencia en sostenibilidad podría optar por DGNB Platino como sello de excelencia.

Para vivienda colectiva en rehabilitación, su aplicación sería menos común salvo en promociones muy específicas orientadas a clientes concienciados de alto poder adquisitivo, dado el sobrecoste; en tales casos se suele priorizar VERDE o BREEAM por ser más asequibles.

10.1.4. BREEAM ES: Versión española del pionero británico

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) es el sistema de certificación de edificios sostenibles más antiguo y extendido a nivel mundial, creado en el Reino Unido en 1990[9]. Desde entonces ha certificado más de 600.000 edificios en 93 países, convirtiéndose en un estándar de facto en el sector inmobiliario global. En España, BREEAM cuenta con una adaptación local denominada BREEAM ES, lanzada en 2010 con la participación de más de 200 profesionales para adecuar los criterios al idioma, normativa y prácticas constructivas

[9] https://breeam.es/

españolas.

BREEAM ES dispone de distintos esquemas según el tipo de proyecto: Nueva Construcción, Vivienda, En Uso (edificios existentes en operación), Urbanismo (planeamiento), e incluso versiones a medida para proyectos singulares.



Villa Moraria Dicam Passive House & Amalur Arquitectos. Fuente: BREEAM_ES

Para proyectos de rehabilitación energética, los esquemas más relevantes son BREEAM Nueva Construcción (cuando la rehabilitación equivale prácticamente a un edificio nuevo) o BREEAM En Uso (para edificios ya operativos que mejoran su gestión sostenible), así como BREEAM Vivienda si es un residencial.

BREEAM evalúa el edificio en 10 categorías de impacto que cubren ampliamente la sostenibilidad: Gestión, Salud y Bienestar, Energía, Transporte, Agua, Materiales, Residuos, Uso ecológico del suelo, Contaminación e Innovación. Cada categoría otorga puntos según el cumplimiento de ciertos créditos (por ejemplo, en Energía se puntúa la eficiencia energética, presencia de renovables; en Salud se mide la iluminación natural, calidad del aire interior, confort térmico; en Materiales se valora el uso de productos con baja huella ambiental, etc.).

Al final, se agrega un porcentaje de puntuación que ubica al proyecto en un nivel de certificación BREEAM, que en España se denomina: Aprobado, Bueno, Muy Bueno, Excelente y Excepcional (estos corresponden a los niveles internacionales Pass, Good, Very Good, Excellent, Outstanding, respectivamente). Por ejemplo, alcanzar >70% de la puntuación equivale a BREEAM Excelente, y >85% a BREEAM Excepcional.

El proceso de certificación BREEAM ES requiere la participación de un Asesor BREEAM acreditado desde fases tempranas. Este profesional guía al equipo de proyecto en la documentación de cada crédito y finalmente envía un informe de evaluación a BREEAM España (gestionado por el Instituto Tecnológico de Galicia, bajo licencia de BRE Global). BRE revisa y, si todo es conforme, emite el certificado.

Existen casos de rehabilitación con éxito en BREEAM: por ejemplo, la histórica sede del Banco Santander en Santander (Edificio Hernán Cortés, 1902), tras una profunda renovación, obtuvo BREEAM Excepcional en 2024, demostrando que es posible rehabilitar un edificio centenario con los más altos estándares sin comprometer su valor patrimonial.

También en Madrid, proyectos como el centro comercial intu Xanadú (Arroyomolinos) mejoraron su operación para lograr BREEAM En Uso Excepcional, convirtiéndose en referencia por obtener la mayor puntuación BREEAM En Uso para un edificio comercial en España. Estos ejemplos evidencian la aplicabilidad de BREEAM tanto en rehabilitación arquitectónica integral como en optimización sostenible de edificios ya en servicio.

Ventajas: BREEAM ofrece un equilibrio entre rigor y viabilidad comercial. Su larga trayectoria hace que haya multitud de Asesores BREEAM formados en España (más de 260 según datos de 2023) y abundante experiencia previa, lo que facilita su implementación.

Para el promotor o propietario, BREEAM es una marca reconocida por el mercado: diversos estudios indican que edificios certificados BREEAM logran rentas de alquiler superiores y mayor valor de venta que edificios convencionales equivalentes.

En Londres, por ejemplo, se constató un 21% más de renta y 18% más valor de venta en edificios con BREEAM, controlando otros factores.

En España, BREEAM reporta que los edificios con este certificado reducen costos de funcionamiento (energía un 50-70% menos, agua hasta 40% menos) y aumentan el valor del inmueble en torno a un 7.5%, con incrementos de rentas del 3%.

Además, tener una certificación BREEAM mejora la imagen corporativa y visibiliza el compromiso ESG de la empresa de forma fiable y reconocible. Desde el punto de vista técnico, BREEAM es flexible: permite elegir qué créditos abordar según convenga al proyecto (no todos son obligatorios excepto unos mínimos), y premia la innovación si se logran medidas sobresalientes fuera del estándar.

Para rehabilitación energética, esto significa que el proyecto puede enfocarse en créditos relevantes (por ejemplo, mejora de aislamiento, sistemas eficientes, materiales con contenido reciclado) y quizás obviar otros menos aplicables, manteniendo aún la posibilidad de un buen nivel global.

Otra ventaja práctica es que BREEAM En Uso permite certificar un edificio existente sin grandes obras, evaluando su gestión y operación; esto es útil en inmuebles donde no es viable intervenir físicamente pero sí optimizar su uso (por ejemplo, oficinas arrendadas donde el propietario mejora mantenimiento, residuos, compras responsables, etc., para lograr el sello).

Finalmente, BREEAM cuenta con versiones específicas para vivienda, lo que en rehabilitación de bloques residenciales es muy interesante: el esquema BREEAM Vivienda evalúa desde la eficiencia hasta el confort térmico, con adaptaciones a tipologías residenciales, proporcionando un atractivo diferenciador en el competitivo

mercado inmobiliario madrileño[10].

Inconvenientes: La obtención de BREEAM conlleva costes significativos.

Además de la tarifa de certificación, que depende del tamaño del proyecto, está el coste del Asesor BREEAM y del cumplimiento de ciertos créditos (p.ej., realizar estudios especializados de iluminación natural o calidad del aire para maximizar puntuación en Salud).

En proyectos de rehabilitación pequeños, este sobrecoste puede ser proporcionalmente alto. BREEAM también implica un elevado volumen documental: para cada punto se requiere evidencia (memorias, fichas de materiales, certificados de equipos, mediciones), lo que demanda tiempo de coordinación.

Algunos críticos señalan que BREEAM es en parte menos exigente técnicamente en ciertas categorías comparado con LEED o DGNB; por ejemplo, podría otorgar puntos por medidas relativamente sencillas, pero por otro lado esto hace que sea más alcanzable escalonadamente (incluso con un presupuesto modesto se puede aspirar al nivel "Bueno" o "Muy Bueno"), comercialmente es maravilloso, pero catalogar un edificio como "Bueno o Muy Bueno" siendo de los escalones más bajos es cuanto menos engañoso o irreal.

En rehabilitación de edificios existentes, un inconveniente específico es que BREEAM En Uso se centra en operación y no en la mejora constructiva; para certificar la renovación física hay que recurrir a BREEAM Nueva Construcción, lo cual, tratándose de una rehabilitación, puede implicar cumplir créditos pensados para obra nueva (aunque BREEAM ES tiene guías para rehabilitaciones dentro de Nueva Construcción).

Aplicación preferente: BREEAM ES puede ser adecuado para edificios terciarios en rehabilitación: oficinas corporativas, centros comerciales, hoteles, hospitales, etc., donde los propietarios buscan benchmarking internacional y retornos tangibles (ahorros operativos, marketing verde).

En Madrid, numerosos inmuebles de oficinas en Azca, Paseo de la Castellana, etc., se han rehabilitado buscando BREEAM para revalorizar su posición en el mercado de alquiler.

También es cada vez más común en el sector público: por ejemplo, algunos hospitales y colegios rehabilitados han seguido criterios BREEAM para asegurar calidad ambiental interior y eficiencia (el Hospital Universitario Infanta Sofía en San Sebastián de los Reyes ganó en 2020 un BREEAM Award al edificio público en uso más sostenible).

En vivienda colectiva privada, BREEAM comienza a verse como reclamo en promociones de lujo o cooperativas preocupadas por sostenibilidad; sin embargo, en rehabilitación residencial de clase media su penetración aún es limitada debido al coste.

Es previsible que con los fondos Next Generation y exigencias municipales (por ejemplo, Madrid 2050, ciudad neutra en carbono), BREEAM o sellos análogos se incentiven en rehabilitación residencial, pudiendo integrarse con subvenciones.

[10] https://breeam.es/tres-proyectos-espanoles-entre-los-finalistas-de-los-breeam-awards-2025/

10.1.5. PASSIVHAUS: Eficiencia energética extrema y confort en rehabilitación

Passivhaus (o Passive House) no es un sello de sostenibilidad amplio sino un estándar específico de construcción orientado a la máxima eficiencia energética y confort térmico.

Desarrollado en Alemania en la década de 1990 por el Passivhaus Institut, se ha difundido globalmente como sinónimo de "edificio de consumo casi nulo".

Un edificio Passivhaus reduce radicalmente las necesidades de climatización manteniendo excelente confort interior, gracias a estrategias pasivas de diseño, superaislamiento y hermeticidad. Para ser certificado como Passive House, una construcción debe cumplir estrictamente con unos criterios cuantitativos de demanda y consumo energético, entre ellos típicamente: demanda máxima de calefacción 15 kWh/m²·año, demanda de refrigeración similar, consumo de energía primaria (para todos los usos: climatización, agua caliente, electricidad) menor a 60 kWh/m²·año, y una permeabilidad al aire n50 ≤ 0,6 h^{-1} (renovaciones de aire indeseadas por hora a 50 Pa)[11]. En esencia, un edificio Passivhaus casi no necesita calefacción convencional: conserva el calor interno de personas y equipos, recupera el calor del aire de ventilación y aprovecha ganancias solares controladas.



Sellos PassivHaus EnerPHit. Fuente: PassivHaus Institut

Si bien nació enfocado a obra nueva, existen adaptaciones para rehabilitación llamadas EnerPHit, que flexibilizan ligeramente algún criterio (por ejemplo, permiten hasta ~25 kWh/m²·año en calefacción si 15 es inviable) a cambio de asegurar la máxima mejora posible en edificios existentes.

España ha adoptado fuertemente este estándar en la última década a través de la Plataforma de Edificación Passivhaus (PEP); en la Comunidad de Madrid, varias viviendas unifamiliares rehabilitadas han obtenido EnerPHit, demostrando que incluso en climas de veranos calurosos se puede lograr un confort superior con mínima energía.

Un caso paradigmático a nivel nacional es la Torre Bolueta en Bilbao, un edificio residencial de 28 plantas y 88 metros de altura que en 2018 se convirtió en el edificio Passivhaus más alto del mundo al obtener la certificación tras su construcción[12]. Este hito mostró que la eficiencia extrema es alcanzable también en gran escala.

[11] https://energiehaus.es/certificacion-passivhaus/

[12] https://inarquia.es/edificios-passivhaus-espana/

En rehabilitación, un ejemplo público notable es la Biblioteca de Villamediana de Iregua (La Rioja), que tras una reforma integral obtuvo certificación Passivhaus, mejorando drásticamente el confort de los usuarios y sirviendo como modelo de rehabilitación energética municipal.

El proceso para lograr el certificado Passivhaus implica desde la fase de diseño la utilización de la herramienta de cálculo PHPP (Passive House Planning Package) para dimensionar aislamientos, carpinterías de altas prestaciones, sistemas de ventilación con recuperación de calor, etc., de modo que se aseguren los valores límite. Durante la obra, se requiere especial cuidado en puentes térmicos y estanqueidad (realizando Blower Door tests de verificación[13]). La certificación la emite el Passivhaus Institut o entidades licenciadas (en España, por ejemplo, Energiehaus Arquitectos es homologada para certificar), tras revisar el PHPP y resultados de ensayos in situ.

Ventajas: Passive House es el estándar energético más exigente del mundo, por lo que garantiza per se una reducción enorme del consumo y por ende de emisiones de CO_2 operativas.

En rehabilitación energética, aplicar criterios Passivhaus puede lograr ahorros del orden del 75-90% en calefacción y refrigeración respecto a la situación previa.

Además, por definición, un Passivhaus ofrece un confort superior: temperaturas interiores estables todo el año (entre 20-25°C constantes, sin corrientes de aire), excelente calidad de aire interior gracias a la ventilación mecánica filtrada, y alto aislamiento acústico como beneficio colateral. Para el usuario final, esto se traduce en hogares más saludables (menos humedades, menos contaminantes interiores) y en facturas energéticas mínimas.

Desde el punto de vista de promoción, una rehabilitación certificada Passivhaus puede incrementar el valor del inmueble notablemente; aunque en España aún es un nicho, cada vez más compradores valoran la etiqueta por asociarla a calidad.

A nivel técnico, una gran ventaja es que el estándar es claro y objetivo: o se cumplen o no los números, lo cual evita ambigüedades. Esto hace que el proceso de diseño se centre en optimizar la física del edificio, y suele generar un alto nivel de conocimiento en el equipo proyectista (muchos arquitectos se han formado como Certified Passivhaus Designer para abordar estos proyectos).

En Madrid, gracias a climas fríos en invierno, las rehabilitaciones Passivhaus pueden incluso lograr edificios Net Zero si se combinan con algo de energía renovable in situ, especialmente dado que el estándar cuenta con niveles superiores Plus y Premium (si el edificio, además de eficiente, genera mediante renovables tanta o más energía de la que consume). Esto posiciona a PassivHaus como contribuyente clave a objetivos de descarbonización urbana.

Inconvenientes: La principal limitación de Passivhaus es su foco acotado: no evalúa ni garantiza aspectos de sostenibilidad más allá de la energía y el confort térmico. Un edificio puede ser Passivhaus y, sin embargo, emplear materiales poco ecológicos, no gestionar adecuadamente sus residuos o tener escasa integración urbana, aspectos que otros sellos sí cubren.

Por ello, Passivhaus no aborda, por ejemplo, la huella de carbono de los materiales (aunque en la práctica muchos proyectos Passivhaus usan materiales sostenibles, no es un requisito del certificado).

En rehabilitación de edificios existentes, lograr el estándar a veces implica actuaciones muy invasivas o costosas: para aislar adecuadamente y eliminar puentes térmicos en un edificio antiguo, puede ser necesario añadir aislamiento interior perdiendo espacio o modificar fachadas protegidas, lo cual no siempre es viable. También la exigencia de hermeticidad podría ser difícil de alcanzar en edificios históricos sin renovar toda la carpintería y otras uniones. En esos casos, alcanzar casi el estándar sin certificar podría ser más razonable, o aspirar a EnerPHit (más flexible).

Otro inconveniente es que, aunque el estándar es libre, la certificación formal conlleva costes (normalmente algunos miles de euros para el certificador y tests, más honorarios del consultor Passivhaus si no hay experiencia interna).

El mercado residencial convencional aún desconoce en buena parte el término Passivhaus, por lo que su valor añadido comercial depende de la labor pedagógica.

Finalmente, no todas las tipologías edificatorias se adaptan fácilmente: en rehabilitación de edificios muy pequeños o con mala orientación, cumplir el criterio de 15 kWh/m² puede ser muy difícil sin medidas activas.

Aplicación preferente: Passivhaus (o EnerPHit) es altamente recomendable en rehabilitaciones energéticas de viviendas unifamiliares, donde se puede intervenir integralmente en la envolvente.

Muchos proyectos de reforma de vivienda particular en la sierra de Madrid, por ejemplo, están optando por EnerPHit para lograr casas confortables de muy bajo consumo. Asimismo, en vivienda colectiva se han hecho ya rehabilitaciones piloto (especialmente en el norte de España) y en Madrid hay interés incipiente a través de cooperativas ecológicas o la EMVS.

También edificios destinados a usos sensibles, como colegios o guarderías, son candidatos ideales para rehabilitaciones Passivhaus, dado el beneficio en salud (ya existen escuelas rehabilitadas a estándar pasivo en Navarra y el País Vasco con resultados positivos en la atención de los niños, menor absentismo por enfermedades, etc.).

Sin embargo, si el objetivo del promotor es una sostenibilidad integral certificada, probablemente combine Passivhaus con otro sello: es frecuente que un edificio rehabilitado obtenga doble certificado, por ejemplo Passivhaus + VERDE, donde el primero asegura eficiencia energética extrema y el segundo avala el resto de aspectos.

Un ejemplo de esto es el Edificio ZERO de KÖMMERLING (oficinas en Valladolid, de nueva planta), que logró la triple certificación Passivhaus, BREEAM Muy Bueno y VERDE 3 hojas. En dicho proyecto, los arquitectos señalaron que trabajar con varias certificaciones garantizó abordar el ciclo de vida de materiales, la gestión del agua,

[13] https://www.passivehouse.es/blower-door-test-en-la-certificacion-passivhaus/

la calidad del aire, la gestión de residuos... asegurando que el edificio es mejor en todos esos aspectos[14]. Tomando esa lección, una rehabilitación ambiciosa en Madrid podría perfectamente aspirar a Passivhaus para energía y a un sello complementario para lo demás.

10.1.6. VIVE COAM: Marca local de calidad ambiental en proyectos (actualmente inactiva)

VIVE COAM[15] es un sello de sostenibilidad de carácter local y voluntario creado por el Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid (COAM) en 2012, en colaboración con BREEAM España. Su nombre "VIVE" alude a Visado Verde o a la idea de edificaciones "vivas" y eficientes.

Más que una certificación exhaustiva, VIVE COAM se planteó como una marca de calidad ambiental otorgada por el COAM a aquellos proyectos de arquitectura (obra nueva o rehabilitación) que integrasen un conjunto de indicadores clave de sostenibilidad en su diseño[16]. La intención era sensibilizar y formar a los arquitectos en sostenibilidad, facilitándoles una guía sencilla para conseguir edificios más eficientes y menos contaminantes, y al mismo tiempo reconocer esos esfuerzos mediante un sello en el proyecto visado.

Técnicamente, VIVE COAM está basada en la metodología BREEAM ES, simplificada para aplicación voluntaria temprana.

Se definieron una serie de criterios (alineados con categorías BREEAM como energía, agua, materiales, etc.) que el proyecto debía cumplir o justificar. Al presentarse el proyecto a visado colegial, si se incluían las medidas e informes correspondientes, el COAM emitía un Certificado VIVE COAM para el proyecto.

Es importante señalar que VIVE COAM no evalúa la obra construida, sino el proyecto en fase de visado; por tanto, es más una distinción de diseño sostenible. Según el protocolo original, los proyectos que obtuvieran VIVE COAM podrían exhibir la marca en planos y memorias, y serían registrados por el COAM.

La marca estaba abierta a proyectos en toda España gestionados por COAM (aunque por su naturaleza, principalmente se orientaba a visados en la Comunidad de Madrid).

Ventajas: VIVE COAM se concibió como una herramienta muy accesible y de rápida implementación. Al estar integrada en el trámite de visado colegial, no requería contratar entidades certificadoras externas ni pagar cuotas significativas adicionales; era un servicio del propio Colegio.

Para muchos estudios de arquitectura madrileños, especialmente pequeños, esto podía suponer una entrada fácil al mundo de la construcción sostenible, antes de dar el salto a certificaciones más complejas. La marca era flexible y educativa: servía como checklist de buenas prácticas en el proyecto (por ejemplo, prever preinstalación de renovables, especificar aislamientos mejorados, prever zonas verdes, etc.), ayudando a incorporar la sostenibilidad de forma natural en la fase de diseño conceptual.

En rehabilitaciones, VIVE COAM podía adaptarse para valorar mejoras típicas (aislar fachadas por el interior o exterior, sustituir carpinterías por altas prestaciones, instalar aerotermia, etc.) y reconocer al arquitecto su esfuerzo en llevar el proyecto más allá del mero cumplimiento normativo.

Otro punto a favor es que al ser una iniciativa del COAM, tenía el respaldo institucional local: podía ser bien vista por administraciones municipales de Madrid a la hora de, por ejemplo, concursos o subvenciones, al reflejar que el proyecto cumple criterios verificados por la autoridad colegial de arquitectos.

Inconvenientes: Uno de los inconvenientes de VIVE COAM es que su alcance y continuidad han sido limitados. Tras su lanzamiento en 2012, la iniciativa no tuvo la acogida esperada en número de proyectos, posiblemente por falta de difusión o incentivos externos.

De hecho, a día de hoy, la marca VIVE COAM se encuentra "inactiva" según la web del COAM[17], lo que sugiere que no se está tramitando recientemente.

Esto implica que, aunque la idea es buena, en la práctica no hay un cuerpo de proyectos certificados VIVE COAM amplio para evaluar su impacto, ni una estructura actualizada de criterios más allá de los originales.

En términos de exigencia, al ser una herramienta simplificada, VIVE COAM no alcanza la profundidad técnica de otras certificaciones: confiaba en la declaración en proyecto de ciertas medidas, sin un proceso robusto de auditoría o seguimiento en obra. Por lo tanto, su garantía de desempeño real es más débil (un edificio podría haber obtenido VIVE en proyecto y no ejecutarse tal cual, o no rendir luego como se esperaba, sin un mecanismo de verificación post-construcción). Asimismo, su reconocimiento fuera del entorno COAM es escaso: ni el público general ni muchos promotores conocen la marca, por lo que su valor de mercado es modesto comparado con los otros sellos.

Aplicación preferente: Dado el estado actual, VIVE COAM es sobre todo relevante desde una perspectiva histórica o pedagógica. Si se revitalizara la iniciativa, su aplicación ideal sería en pequeños proyectos residenciales o de locales en Madrid, donde los arquitectos quieran un sello verde de forma ágil.

Por ejemplo, una rehabilitación energética de una vivienda unifamiliar o un edificio de viviendas de pocos vecinos, donde certificar BREEAM/VERDE resultaría oneroso, podría acogerse a VIVE COAM si el COAM ofreciera de nuevo esa posibilidad, obteniendo así un reconocimiento básico.

También en proyectos de jóvenes arquitectos presentados a visado, VIVE COAM podría ser un plus que les diferencie en cuanto a sensibilidad ambiental. No obstante,

[14] https://www.kommerling.es/eventos/el-edificio-zero-kommerling-recibe-certificaciones-breeam-passivhaus-verde

[15] https://www.coam.org/en/servicios/visado/marca-vive-coam

[16] https://breeam.es/breeam-es-y-el-coam-presentan-la-marca-de-calidad-medioambiental-vive-2/

[17] https://www.coam.org/servicios/servicios/certificado/

para proyectos de mayor envergadura o con aspiraciones de marketing sostenible fuertes, hoy por hoy se recurre a certificaciones consolidadas. Es de esperar que el COAM, involucrado en iniciativas como el Ecómetro y la formación en ACV, retome en algún formato la idea de VIVE COAM para alinearla con las nuevas políticas (por ejemplo, podría integrarse con la obligatoriedad de ACV en 2030).

Por ahora, no se conocen ejemplos recientes de edificios rehabilitados con VIVE COAM, pero su espíritu se refleja en otras acciones del COAM para impulsar la sostenibilidad local.

10.1.7. Comparativa de los sellos: resumen de fortalezas, debilidades y uso recomendado

Para sintetizar la información expuesta, se presenta a continuación una tabla comparativa de los seis sistemas analizados, destacando sus ámbitos de evaluación principales, ventajas, limitaciones y el tipo de proyecto de rehabilitación donde encajan mejor:

Certificación	Ámbitos clave evaluados	Fortalezas	Debilidades	Aplicación preferente (rehabilitación)
Level(s) (UE)	6 macro-áreas: carbono ciclo de vida, materiales (ACV y circularidad), agua, salud interior, adaptación climática, costo/valor. *No otorga nivel, solo marco de indicadores.*	- Marco **común europeo**; gratuito y voluntario. - **Holístico** (incluye ACV completo, coste ciclo vida). -**Preparación normativa**: anticipa requisitos futuros (CTE 2026/2030).	- **No es un sello** reconocido por público/inversores (sin placa). -Implementación requiere **capacidad técnica** (ACV, indicadores). -**Sin auditor externo**: autocontrol del equipo.	- **Todos los proyectos** de rehabilitación para guiar diseño sostenible. -Proyectos con **financiación UE** (exigen reportes comunes). -Como **complemento** a otro sello para profundizar en ACV.
VERDE (España)	5 áreas (ambiental, social, económica, entorno, proceso) desplegadas en ~6 categorías de criterios (energía, agua, materiales, sitio, calidad interior, etc.) *Escala: 0-5 hojas → Bronce/Plata/ Oro/Platino.*	- **Adaptada a España** (normativa, clima): relevante y precisa localmente. - **Integral** (incluye salud, confort, ACV, economía circular). - **Coste moderado** y soporte GBCe. Facilita **DGNB dual** (reconocimiento global).	- **Menos conocida internacionalmente** (frente a LEED/ BREEAM). -**Proceso y documentación intensos**, requiere evaluador acreditado. -Mercado residencial privado la conoce poco aún (necesaria pedagogía).	- Rehabilitación **integral de edificios en España** (vivienda, oficinas, públicos) buscando **sostenibilidad amplia**. - Proyectos con **alineación a ODS/Taxonomía** (ej. edificios públicos ejemplares). - Donde se quiera **maximizar puntuación ambiental local** o optar a DGNB simultáneo.
DGNB (Alemania)	5 ámbitos de calidad: ambiental (ACV, energía), económica (LCC), sociocultural (confort, comunidad), técnica (durabilidad, resiliencia), proceso (gestión obra). *Escala: Certificado Plata, Oro, Platino.*	- **Máximo rigor técnico**, con ACV y LCC obligatorios (garantiza desempeño cuantificado). -**Reconocimiento internacional** elevado (prestigio en Europa) - Equilibrio **triple balance** (ambiental-social-económico) real, evita enfoques unilaterales.	- **Complejidad alta**: implementación laboriosa, necesita consultor/auditor especializado. -**Coste alto** relativo, justificado solo en proyectos grandes o emblemáticos. -Poca difusión en residencial; limitada cantidad de proyectos españoles certificados hasta ahora.	-Rehabilitaciones **emblemáticas/ piloto** que aspiren a **excelencia absoluta** (Platino). -Activos de **inversión internacional** en Madrid (oficinas prime, hoteles) para atraer tenants/inversores *verdes*. -Proyectos con **colaboración alemana/ europea** deseando metodología común.

Certificación	Ámbitos clave evaluados	Fortalezas	Debilidades	Aplicación preferente (rehabilitación)
BREEAM ES (UK)	10 categorías: gestión, salud, energía, transporte, agua, materiales, residuos, uso del suelo/ ecología, contaminación, más innovación. *Escala: Aprobado, Bueno, Muy Bueno, Excelente, Excepcional.*	- **Muy reconocido comercialmente**; añade valor de mercado (inmuebles BREEAM logran +6-18% valor). - Amplia **red de asesores** y experiencia en España (procedimientos rodados). -**Flexible y escalable**: distintos niveles según inversión, aplicable también en uso (operación).	- **Costes de certificación y asesoría** notables, que pueden ser barrera en pequeños proyectos. -**Burocracia documental** elevada; proceso puede alargar tiempos de proyecto. - En rehabilitación, dividir entre Nueva Construcción vs En Uso puede ser confuso (eligir esquema adecuado).	-Rehabilitaciones de **oficinas, centros comerciales, edificios corporativos** buscando acreditación reconocida para marketing o RSC. - **Promociones residenciales de alto nivel** para venta/alquiler (diferenciación por sostenibilidad). - **Edificios públicos** que quieran certificar eficiencia en operación (BREEAM En Uso).
Passivhaus/ EnerPHit (Alemania)	Enfoque en **eficiencia energética y confort térmico**: demanda de calefacción/ refrigeración, consumo de energía primaria, hermeticidad, confort higrotérmico. *Escala: Certificado Classic / Plus / Premium (según renovables).*	- **Ahorro energético extremo** (hasta 75-90% menos demanda), con retorno económico a medio plazo. - **Confort y salud inmejorables** (temperatura estable, aire filtrado, sin humedades). - Criterios claros, resultado objetivo; **garantía de desempeño real** muy alta.	- Cubre solo energía y confort; **no evalúa otros aspectos** (materiales tóxicos, impacto entorno, etc.). - En edificios existentes puede requerir **obras invasivas** (aislamientos interiores, cambio total de ventanas) para cumplir estándar. -**Beneficio comercial limitado** si cliente no entiende el concepto (requiere divulgación).	-Rehabilitaciones de **viviendas unifamiliares** o edificios pequeños donde se busca **consumo casi nulo** y máximo confort. - **Equipamientos sensibles** (colegios, residencias, centros de salud) donde el confort y calidad de aire son prioritarios. - Como **componente energético** dentro de una rehabilitación mayor, combinado con otro sello amplio.
VIVE COAM (Madrid)	Basado en BREEAM *simplificado*: criterios de energía, agua, materiales, ecología, etc., integrados en el **proyecto visado**. *Sin niveles jerarquizados; se otorga o no la marca según cumplimiento.*	- **Ágil y didáctico**: checklist sencillo para incorporar sostenibilidad en diseño . -**Sin coste significativo** ni entes externos: respaldo del COAM, visado con sello verde. -Fomenta sostenibilidad en **pequeños proyectos locales**, accesible a estudios pequeños.	- **Alcance limitado**: actualmente inactivo, escasa implementación real. - **Sin verificación en obra**: garantía teórica basada solo en proyecto. -Nula proyección fuera de Madrid; **valor de mercado bajo** comparado con certificaciones formales.	- **Pequeñas rehabilitaciones residenciales o comerciales en Madrid** cuyos autores busquen un reconocimiento medioambiental local de fácil obtención. -**Proyectos académicos o pilotos** para inculcar criterios verdes en arquitectura madrileña. -(Si se reactivase) complementario a incentivos municipales de sostenibilidad en licencia/visado.

Tabla 10.1 – Comparativa de sellos de certificación en rehabilitación energética. Fuente: Elaboración propia

10.2. PROCESO GENERAL DE CERTIFICACIÓN AMBIENTAL EN REHABILITACIÓN

Aunque cada sistema tiene su propio procedimiento, en términos generales una certificación ambiental en proyectos de rehabilitación sigue estos pasos comunes:

Registro del proyecto ante la entidad certificadora: se inscribe el edificio/proyecto en la fase correspondiente (diseño o existente) y se paga una tasa inicial. Por ejemplo, en BREEAM se registra al comienzo del diseño; en VERDE se crea un expediente en la plataforma GBCe al iniciar la evaluación.

Análisis inicial y preevaluación: el equipo (a menudo con un consultor acreditado) realiza un diagnóstico de la situación existente del edificio y del alcance de la rehabilitación, determinando qué créditos son viables. Se elabora un plan de acción sostenible: p.ej., qué medidas se incorporarán al proyecto para cumplir criterios de la certificación.

Diseño y documentación: Se integran en el proyecto arquitectónico las soluciones previstas (mejoras energéticas, selección de materiales certificados, estrategias de ventilación, gestión de residuos de obra, etc.). En paralelo, se recopila la documentación justificativa: memorias técnicas, cálculos (simulaciones energéticas, ACV, etc.), fichas de producto (ecoetiquetas, EPDs), planos acreditativos, y políticas de mantenimiento o planes de gestión según aplique. En rehabilitación, un reto aquí es disponer de datos del edificio existente (p.ej., para ACV o para requisitos mínimos de consumo), lo que requiere auditorías o mediciones previas.

Evaluación con herramienta: Muchos sellos cuentan con herramientas informáticas o plantillas. En Passivhaus se usa PHPP para comprobar que el diseño cumple los umbrales numéricos. En VERDE, GBCe proporciona una hoja de cálculo estructurada por criterios. En BREEAM, el asesor dispone de listas de chequeo y plantillas oficiales donde argumenta el cumplimiento de cada punto.

Revisión interna y precertificación (opcional): Algunos sistemas ofrecen precertificación en fase de proyecto (VERDE, LEED, etc.), útil para asegurar que el diseño alcanzará la meta y para marketing temprano. En rehabilitación, podría emitirse una precertificación que ayude a asegurar subvenciones o financiaciones verdes antes de la obra.

Ejecución de la obra: Aquí es crítico conservar las medidas sostenibles previstas. El equipo de certificación suele realizar seguimiento durante la construcción. Por ejemplo, en BREEAM se llevan a cabo visitas de obra del asesor para verificar residuos gestionados correctamente, que se instalan los materiales especificados, que se hacen comisionados de instalaciones, etc. En Passive House se realizan tests de estanqueidad durante la obra (Blower Door) y al finalizar, para comprobar el criterio de hermeticidad.

Documentación as built y auditoría final: Una vez terminada la rehabilitación, se recopilan documentos finales (certificados de energías, resultados de ensayos, fotos de obra, planos as built). El auditor o evaluador realiza una última revisión in situ (sobre todo en BREEAM, DGNB, LEED es común visitar el edificio terminado). Se corrobora que el proyecto construido corresponde al evaluado en papel. Si todo es conforme, se prepara el informe final de certificación.

Emisión del certificado y sello: La entidad certificadora (GBCe, BREEAM-ES, Passivhaus Institut, etc.) expide el certificado oficial, con el nivel logrado (ej. "BREEAM Excelente") y suele entregar una placa física para colocar en el edificio. Este resultado puede tardar algunas semanas tras la solicitud final, ya que pasa por controles de calidad. En el caso de VERDE/DGNB, GBCe incluso ofrece la posibilidad de encargar una placa con la distinción obtenida.

Explotación y mejora continua: En certificaciones como BREEAM En Uso o Level(s), se espera que el edificio monitorice su operación y eventualmente recertifique cada cierto tiempo. En rehabilitaciones energéticas, es muy recomendable continuar midiendo consumos y confort para verificar el desempeño real (post-occupancy evaluation), lo cual puede ser requisito si se busca renovación de certificado o simplemente para retroalimentación.

Es importante destacar que, en la mayoría de los sellos, se requiere la implicación de un profesional acreditado: ya sea un asesor BREEAM, un EA VERDE, un auditor DGNB, un diseñador Passivhaus, etc.

Estos agentes actúan de enlace con la entidad certificadora y aportan experiencia específica, aumentando las garantías de éxito.

Su participación debe preverse en los honorarios de la rehabilitación. En cuanto a costes orientativos, varían mucho con la escala: por ejemplo, certificar una comunidad de vecinos pequeña con VERDE podría rondar algunos miles de euros, mientras que un edificio de oficinas grande con BREEAM/DGNB puede suponer decenas e incluso centenas de miles (incluyendo consultoría, ensayos y tasas). Sin embargo, estos costes se justifican por la complejidad del proceso y tienden a recuperarse en valor añadido del inmueble y en ahorros operativos.

11 CONCLUSIONES

11.1. RESUMEN DE ESTRATEGIAS PARA LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA

En este capítulo final se sintetizan las principales estrategias de rehabilitación energética tratadas a lo largo de la guía, organizadas por tipo de edificio (vivienda unifamiliar, vivienda plurifamiliar y edificios terciarios/industriales).

Se ofrece una visión técnica y práctica de las intervenciones clave – abarcando mejoras en la envolvente térmica, sistemas de climatización, iluminación, ventilación y calidad del aire interior, integración de energías renovables, consideraciones de financiación y otras – priorizándolas según su impacto energético y viabilidad.

Para profundizar en cada medida, se indican referencias a capítulos previos de la guía donde corresponda. Al final de esta sección, se presenta una tabla comparativa (Tabla 11.1) que resume estas estrategias por tipo de edificio, facilitando una consulta rápida.

11.1.1. VIVIENDA UNIFAMILIAR

Envolvente térmica: En las viviendas unifamiliares, la mejora de la envolvente es una de las estrategias de mayor impacto.

Aislar fachadas, cubiertas y suelos reduce drásticamente la demanda de calefacción y refrigeración, mejorando el confort interior (ver Capítulo 3: Soluciones Constructivas de la Envolvente).

Las opciones incluyen sistemas de aislamiento térmico por el exterior (SATE) o fachadas ventiladas (ideales cuando se busca mínima interferencia interior), así como insuflado de aislante en cámaras de aire o aislamiento interior en caso de restricciones.

La sustitución de ventanas es igualmente prioritaria: instalar vidrios dobles o triples con baja emisividad y marcos con rotura de puente térmico reduce pérdidas térmicas e infiltraciones de aire.

Dado que en viviendas unifamiliares el propietario tiene control total, la viabilidad de estas intervenciones es alta; se recomienda planificarlas preferentemente antes de abordar mejoras en instalaciones, para dimensionar correctamente los nuevos sistemas a la baja demanda resultante.

(Nota: En edificios históricos o protegidos aplicar soluciones compatibles, p. ej. aislamiento interior, según se indica en el Capítulo 8: Patrimonio Protegido.)

Sistemas de climatización (calefacción, refrigeración y ACS): Tras reducir la demanda, es fundamental modernizar los sistemas térmicos existentes por otros más eficientes (ver Capítulo 4: Sistemas de Calefacción y Refrigeración Eficientes).

En vivienda unifamiliar suele existir una caldera individual (de gasóleo, gas o eléctrica) y equipos de aire acondicionado tipo split.

Se recomienda sustituir calderas antiguas por calderas de condensación de gas natural (si se prevé seguir con combustible fósil) o, preferiblemente, por bombas de calor eléctricas (aerotermia) capaces de proporcionar calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria con alto rendimiento estacional.

Las bombas de calor aire-agua, por ejemplo, permiten alimentar radiadores de baja temperatura o suelo radiante, logrando ahorros importantes de energía primaria.

En climas fríos, combinar la aerotermia con apoyo de resistencia eléctrica mínima o sistemas híbridos puede asegurar el confort. Adicionalmente, instalar termostatos programables y sistemas de regulación por zonas permitirá ajustar la climatización a la ocupación real, evitando consumos innecesarios. En cuanto al aire acondicionado, la sustitución de equipos de ventana o splits antiguos por equipos Inverter de alta eficiencia reduce significativamente el consumo en verano.

Siempre que sea posible, aprovechar las mejoras pasivas (aislamiento, sombreamiento) para disminuir la necesidad de refrigeración activa. Por último, en ACS (agua caliente sanitaria), optar por calentadores estancos eficientes o sistemas integrados en la bomba de calor mencionada; si se mantiene termo eléctrico, considerar modelos de aerotermia específicos para ACS o apoyo solar térmico (véase apartado de energías renovables).

Iluminación eficiente: Aunque la iluminación en viviendas unifamiliares representa una fracción menor del consumo energético total, es una medida rápida y de muy alta viabilidad. Se recomienda renovar toda la iluminación a tecnología LED de bajo consumo (ver Capítulo 5: Iluminación).

Las lámparas LED reducen el consumo hasta un 80% respecto a bombillas incandescentes o halógenas, con una vida útil muy superior, disminuyendo también la necesidad de reemplazos frecuentes.

Además, en exteriores o estancias poco usadas, la instalación de sensores de presencia o temporizadores asegura que las luces solo estén encendidas cuando se necesitan, ahorrando energía. Estas medidas tienen un coste bajo comparado con otras intervenciones y generan ahorros inmediatos en la factura eléctrica, por lo que deben ser implementadas a corto plazo.

Ventilación y calidad del aire interior: Al mejorar la envolvente y hacerla más estanca, es crítico garantizar una adecuada ventilación para evitar problemas de humedad y asegurar la salubridad del ambiente interior (ver Capítulo 7: Ventilación y Calidad del Aire Interior).

En viviendas unifamiliares, la estrategia recomendada es instalar sistemas de ventilación mecánica controlada. Idealmente se optará por ventilación mecánica de doble flujo con recuperador de calor, que extrae el aire viciado de interiores (cocina, baños) y aporta aire fresco filtrado, transfiriendo el calor entre ambas corrientes para minimizar pérdidas energéticas. Esto mantiene una buena calidad del aire (reduciendo CO_2, olores y contaminantes) con un impacto energético muy bajo.

Si la inversión en un sistema centralizado no es viable, asegurar al menos ventilación cruzada natural diaria y la colocación de ventiladores extractores eficientes en zonas húmedas.

También es importante controlar la estanqueidad: tras la renovación de ventanas y aislamientos, sellar correctamente juntas y grietas pero incorporando aireadores o pequeñas rejillas regulables en ventanas (en caso de ventilación natural) para permitir la renovación continua del aire sin corrientes excesivas. La calidad del aire interior repercute directamente en la salud y confort de los ocupantes, por lo que estas acciones tienen alta prioridad, especialmente tras actuaciones que hermetizan la vivienda.

Energías renovables: Las viviendas unifamiliares suelen disponer de cubierta propia o espacio suficiente para incorporar energías renovables in situ, lo cual es una estrategia altamente recomendable para reducir el consumo de energía de la red y las emisiones asociadas (ver Capítulo 6: Energías Renovables).

La intervención más común y efectiva es la instalación de paneles solares fotovoltaicos para autoconsumo eléctrico. Un sistema fotovoltaico bien dimensionado puede cubrir gran parte de la demanda eléctrica de la vivienda (climatización eléctrica, iluminación, electrodomésticos), sobre todo en horas diurnas, generando ahorros económicos significativos a medio plazo.

En la Comunidad de Madrid, la alta irradiación solar hace muy rentable esta medida, más aún con las facilidades de compensación de excedentes vertidos a la red.

Asimismo, es aconsejable aprovechar la normativa vigente de autoconsumo compartido si existe más de una vivienda en la parcela.

Otra medida renovable es la energía solar térmica para apoyo a la producción de ACS; con uno o dos paneles solares térmicos en cubierta se puede atender una parte sustancial de la demanda de agua caliente en meses soleados, reduciendo el consumo de gas o electricidad. Aunque en la actualidad la solar térmica ha quedado en parte relegada frente a la aerotermia y el fotovoltaico, sigue siendo una opción válida especialmente si la vivienda cuenta con espacio de almacenamiento de agua caliente y una demanda significativa.

Otras renovables posibles, menos comunes, incluyen las calderas de biomasa (pellets) en entornos rurales como sustitución de calderas de gasóleo, o pequeños aerogeneradores domésticos en ubicaciones muy ventosas (aunque en Madrid urbano esto último es poco frecuente).

En cualquier caso, integrar energías renovables tras optimizar la eficiencia energética del inmueble contribuye a acercar la vivienda a un balance energético casi nulo.

Aspectos económicos y financiación: Para el propietario de una vivienda unifamiliar, planificar la rehabilitación energética con un criterio costo-efectividad es esencial. Se aconseja realizar, previo a las obras, una auditoría energética inicial (ver Capítulo 2: Evaluación Energética del Edificio) que identifique qué medidas proporcionan mayor ahorro por euro invertido, facilitando así priorizar actuaciones.

Muchas de las intervenciones descritas –aislamiento, ventanas, cambio de sistemas, solar fotovoltaica– suponen una inversión inicial notable, pero existen ayudas y subvenciones que mejoran su viabilidad.

En la Comunidad de Madrid y a nivel nacional se han habilitado programas de incentivo a la rehabilitación (por ejemplo, programas cofinanciados con fondos Next

Generation de la UE, antiguos programas PAREER o PREE del IDAE, y subvenciones locales como el Plan Rehabilita del Ayuntamiento).

Es importante informarse sobre subvenciones vigentes, deducciones fiscales o préstamos bonificados disponibles al momento de planificar la obra. Asimismo, dado que muchas mejoras reducen la factura energética, el ahorro operativo puede destinarse a amortizar la inversión.

En vivienda unifamiliar, una estrategia común es planificar la rehabilitación por fases (ver sección 11.2.5), abordando primero las medidas de "rápido retorno" (como iluminación LED o ajuste de sistemas) y reservando las intervenciones de mayor envergadura (como aislamientos integrales o cambios de sistema completos) para cuando se disponga de financiación suficiente o coincidan con reformas necesarias por mantenimiento.

11.1.2. VIVIENDA PLURIFAMILIAR

Envolvente térmica: En los edificios residenciales plurifamiliares (bloques de pisos), la mejora de la envolvente es igualmente prioritaria por su impacto en la reducción de la demanda energética global del edificio, aunque su implementación requiere coordinación entre todos los propietarios.

La rehabilitación energética de fachadas mediante sistemas de aislamiento por el exterior (SATE) es la solución más eficaz y homogénea, mejorando el confort de todas las viviendas y renovando la estética del edificio; esta opción suele implicar andamiaje y obra comunitaria, por lo que requiere acuerdo en la comunidad de propietarios (ver Capítulo 3: Soluciones Constructivas de la Envolvente).

Cuando la intervención exterior no es posible (por ejemplo, en fachadas protegidas o comunidades que rechazan alterar la fachada), se pueden contemplar soluciones alternativas como el aislamiento térmico por el interior de cada vivienda o la inyección de aislante en cámaras de aire si las hay, aunque estas suelen ofrecer menores prestaciones o implicar pérdida de espacio interior en cada piso.

Además de los muros, el aislamiento de la cubierta del edificio es crítica: al ser una zona común, es viable colocar aislamiento sobre el forjado superior o bajo la cubierta, reduciendo las pérdidas de calor en invierno y ganancias en verano para los pisos superiores.

La sustitución de ventanas y cerramientos en cada vivienda es otra medida fundamental: a nivel de comunidad se puede fomentar la renovación de ventanas antiguas (normalmente de madera o aluminio sin rotura) por ventanas con doble acristalamiento y marcos eficientes.

Algunas comunidades organizan compras o instalaciones conjuntas para conseguir economías de escala en la sustitución de carpinterías en todos los pisos, asegurando uniformidad estética a la vez que se mejora la envolvente.

Es importante también atender a las fugas de aire en huecos comunes (por ejemplo: puertas de portal, escaleras y patinillos): colocar burletes, automatizar el cierre de puertas comunes y mejorar el aislamiento de medianeras o forjados que separan viviendas de zonas no calefactadas (como garajes o locales) contribuirá a reducir pérdidas.

En edificios plurifamiliares existentes en Madrid, muchos construidos antes de normas térmicas exigentes, estas intervenciones pasivas pueden suponer ahorros significativos (20-40% en calefacción), por lo que, aunque la inversión sea alta, son altamente recomendables. La viabilidad técnica suele ser buena (muchos edificios tienen espacio para añadir aislamiento exterior y cambiar ventanas), y la económica mejora al poder repartirse el coste entre varios propietarios y acceder a subvenciones específicas para comunidades (ver financiación). (Para edificios residenciales protegidos, véase Capítulo 8 para estrategias adaptadas que respeten los valores patrimoniales.)

Sistemas de climatización y ACS: En edificios de pisos, los sistemas térmicos pueden ser centralizados (una sala de calderas comunitaria que proporciona calefacción y/o agua caliente a todas las viviendas) o descentralizados (equipos individuales en cada vivienda, típicamente calderas murales de gas para calefacción/ACS y aparatos individuales de aire acondicionado).

Cada tipología requiere estrategias específicas, abordadas en el Capítulo 4: Sistemas de Calefacción y Refrigeración Eficientes. Si el edificio cuenta con una instalación centralizada de calefacción/ACS, una intervención clave es modernizar la sala de calderas: sustituir calderas antiguas de gasóleo o gas convencional por calderas de condensación de alta eficiencia, o considerar la instalación de bombas de calor centralizadas (aerotermia central) que alimenten un circuito común de calefacción. Las calderas de condensación pueden aumentar la eficiencia un 15-20% respecto a calderas estándar, y permiten reducir emisiones contaminantes, especialmente si se cambia de un combustible más contaminante (carbón, gasóleo) a gas natural. La aerotermia central, por su parte, puede abastecer calefacción y ACS colectivas con menor consumo de energía primaria, aunque puede requerir adaptación de emisores (ideal para suelo radiante o fan-coils).

Adicionalmente, es importante incorporar sistemas de regulación y equilibrado en la instalación central: válvulas termostáticas en radiadores de cada vivienda, control central por sonda exterior y variadores en bombas, para distribuir el calor según la demanda real, evitando sobrecalentamientos en plantas inferiores, típicos de sistemas centralizados antiguos.

Si el edificio tiene climatización individual por vivienda, la estrategia pasa por fomentar/ concienciar y facilitar la renovación de los equipos particulares: por ejemplo, sustituir calderas individuales antiguas por calderas de condensación (muchas compañías energéticas ofrecen planes de sustitución) o migrar hacia sistemas de bomba de calor individuales (ej. Unidades compactas aerotérmicas para cada piso que cubran calefacción, refrigeración y ACS).

En cuanto a la refrigeración, muchos edificios residenciales en Madrid se han ido equipando con splits; se recomienda el recambio de equipos antiguos por modelos Inverter A+++ de menor consumo y el posible uso de sistemas multi-split o VRF comunitarios si se realiza una intervención conjunta (por ejemplo, en rehabilitaciones

integrales se podrían instalar preinstalaciones de climatización centralizada por conductos o sistemas VRF con unidades interiores para cada piso, mejorando la eficiencia global y la estética al eliminar unidades exteriores individuales en fachada).

En cualquier caso, una comunidad de propietarios puede también evaluar soluciones innovadoras como la conexión a una red de calor urbana (district heating) si existe disponibilidad en la zona, o la instalación de calderas de biomasa comunitarias en pueblos o las afueras (siempre que se garantice el suministro de biocombustible y se controlen adecuadamente las emisiones).

Por último, la producción de ACS centralizada puede optimizarse instalando intercambiadores o acumuladores bien aislados y bombas de recirculación eficientes con control horario (evitando pérdidas nocturnas innecesarias).

Iluminación y servicios comunes eficientes: En un edificio plurifamiliar, además de la iluminación interior de cada vivienda (que cada propietario puede mejorar a LED por iniciativa propia), existen importantes consumos energéticos en las zonas comunes que pueden optimizarse (ver Capítulo 5: Iluminación).

Se recomienda a la comunidad implementar iluminación LED en portales, escaleras, rellanos, trasteros y garajes, sustituyendo lámparas incandescentes, halógenas o fluorescentes. También es muy eficaz instalar detectores de presencia y temporizadores que mantengan las luces encendidas solo cuando haya usuarios: por ejemplo, iluminación por sensores en cada planta de escalera y en aparcamientos sectorizados por zonas, lo cual puede recortar sustancialmente el consumo eléctrico comunitario.

Estas medidas tienen coste reducido y suelen amortizarse rápidamente vía ahorro en la factura de la comunidad.

Otro aspecto a considerar en servicios comunes es la eficiencia de los ascensores y equipos auxiliares: si el edificio cuenta con ascensor antiguo, la modernización a un modelo con motor de imanes permanentes, variador de frecuencia e iluminación LED automática en cabina puede ahorrar energía (Capítulo 4 menciona brevemente eficiencia en ascensores).

Igualmente, instalar sistemas de control (automatización) para apagar equipos comunitarios en horas de no uso, o regular la ventilación forzada de garajes mediante sondas de CO, son intervenciones adicionales que mejoran la eficiencia global del edificio.

Ventilación y calidad del aire interior: La ventilación en edificios de viviendas suele ser natural (mediante rejillas y conductos shunt en cocina/baños y ventilación cruzada a través de ventanas). Al rehabilitar energéticamente, especialmente si se aíslan fachadas y se cambian ventanas mejorando la estanqueidad, conviene asegurarse de mantener o mejorar la calidad del aire interior en cada vivienda (ver Capítulo 7: Ventilación y Calidad del Aire Interior).

Una comunidad podría plantear la instalación de sistemas de ventilación mecánica comunitarios o por vivienda. En rehabilitaciones integrales, es posible integrar ventilación mecánica de doble flujo con recuperadores a nivel de cada piso o de forma centralizada por shunts verticales existentes, aunque suele ser complejo en edificios existentes por la falta de conductos adecuados.

Alternativamente, se pueden instalar sistemas individuales compactos de ventilación con recuperación de calor por vivienda (equipos empotrados en pared exterior que extraen e introducen aire con recuperador entálpico, de forma independiente en cada apartamento). Estas unidades no requieren conductos extensos y son una solución interesante para mejorar ventilación en reformas de pisos individuales.

También es importante mantener y limpiar las chimeneas de ventilación y shunts ya presentes, asegurando su buen funcionamiento (muchos edificios antiguos tienen conductos obstruidos o con escasa extracción).

En zonas comunes cerradas (p. ej. pasillos sin ventilación natural) se podrían añadir rejillas o ventiladores controlados para evitar acumulación de CO_2. Garantizar una buena ventilación en cada vivienda mejorará la salud de los residentes (reduciendo humedad, mohos, contaminantes de mobiliario, etc.), complementando las mejoras energéticas.

Por tanto, aunque la ventilación mecánica en edificios existentes puede ser de viabilidad moderada, debe formar parte del plan de rehabilitación, ya sea promoviendo buenas prácticas de ventilación natural (ventilación cruzada diaria aprovechando las ventanas oscilo-batientes nuevas) o implementando soluciones mecánicas donde técnicamente posible.

Energías renovables: Los edificios residenciales colectivos también ofrecen oportunidades para integrar energías renovables, si bien requieren acuerdo comunitario y un reparto de beneficios claro (ver Capítulo 6: Energías Renovables).

La energía solar fotovoltaica es particularmente atractiva: las azoteas de los bloques suelen tener superficie suficiente para instalar una planta solar. Gracias a la normativa de autoconsumo colectivo en España, una comunidad de propietarios puede instalar paneles fotovoltaicos y repartir la energía generada entre las viviendas (según coeficientes acordados) y/o destinar parte a cubrir los consumos de los servicios comunes (iluminación de escalera, ascensor, bombas, etc.). Esta medida puede reducir considerablemente la factura eléctrica de todos los vecinos a largo plazo.

Se recomienda estudiar la viabilidad estructural de la cubierta (para soportar los paneles), la existencia de sombras, y dimensionar el sistema fotovoltaico en función del consumo agregado diurno del edificio. La energía solar térmica para producción centralizada de agua caliente también es una opción interesante en edificios de viviendas –de hecho, la normativa española ha exigido tradicionalmente un porcentaje de cobertura solar de ACS en obra nueva–.

Si el edificio cuenta con un sistema colectivo de ACS, la instalación de un campo de colectores solares térmicos en cubierta conectados a un acumulador central puede cubrir una fracción notable de la demanda anual de agua caliente (20-70% dependiendo del diseño), aliviando el trabajo de la caldera y ahorrando combustible. No obstante, la solar térmica requiere mantenimiento (evitar sobrecalentamiento en verano, control de la congelación en invierno, etc.), por lo que deberá asegurarse una gestión adecuada.

Además de la energía solar, en entornos no urbanos algunas comunidades podrían valorar calderas comunitarias de biomasa (por ejemplo, peletizado) en sustitución de combustibles fósiles, aunque hay que considerar logística de suministro y emisiones; o incluso micro-cogeneración en grandes edificios con alta demanda simultánea de calor y electricidad (p. ej., instalaciones de cogeneración a gas para proveer calor al edificio y electricidad a las zonas comunes o a red, si bien su rentabilidad ha variado con los precios energéticos).

Aspectos económicos y financiación: La rehabilitación energética de un edificio plurifamiliar debe planificarse a nivel comunitario, atendiendo tanto al reparto de costes como a la captación de ayudas disponibles. Es muy aconsejable que la comunidad promueva una auditoría energética del edificio (Capítulo 2) para cuantificar consumos actuales y simular ahorros de distintas medidas, lo que facilita alcanzar consenso informando a los propietarios del beneficio esperado en sus facturas.

En cuanto a financiación, las ayudas públicas para comunidades de propietarios suelen ser más elevadas que para viviendas individuales, justamente para fomentar acciones integrales. A nivel de Comunidad de Madrid y estatal, existen subvenciones que cubren un porcentaje de la obra (en algunos programas, dependiendo del nivel de ahorro energético logrado, se subvenciona entre el 30% y 80% de la inversión). Programas recientes, financiados con fondos europeos (como los incluidos en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia), proporcionan incentivos específicos para la rehabilitación de edificios residenciales, incluyendo deducciones fiscales en el IRPF para cada propietario que contribuya a la obra.

Es importante que la comunidad se informe y posiblemente contrate asistencia técnica (oficinas de rehabilitación municipales o autonómicas) para gestionar la solicitud de ayudas, licencias, etc. Además de subvenciones, la comunidad puede optar por financiación colectiva mediante derramas periódicas o préstamos comunitarios.

Algunas entidades financieras ofrecen préstamos ventajosos a comunidades para rehabilitación energética, considerando el ahorro futuro en gastos de calefacción como parte de la capacidad de repago. Una alternativa para grandes actuaciones es recurrir a Empresas de Servicios Energéticos (ESE/ESCO): estas empresas pueden encargarse de la inversión y ejecución de ciertas mejoras (por ejemplo, cambio de calderas, instalación solar) a cambio de explotar parte del ahorro conseguido durante un periodo.

Esto permite realizar mejoras sin inversión inicial por parte de los vecinos, aunque requiere contratos de desempeño energético. En cualquier caso, lograr el acuerdo de la comunidad es fundamental: presentar claramente los beneficios económicos (ahorro en facturas), incremento del valor de las viviendas y mejora en confort ayuda a justificar la inversión ante los propietarios. Finalmente, se recomienda planificar las intervenciones por fases, abordando primero medidas de alto retorno o aquellas obligatorias (por seguridad o normativa) y programando en un plan plurianual las inversiones mayores, aprovechando renovaciones necesarias (p. ej. si en 5 años tocará impermeabilizar la fachada, coordinar para instalar aislamiento térmico al mismo tiempo).

Esta hoja de ruta escalonada (ver sección 11.2.5) facilita la viabilidad financiera y técnica, permitiendo distribuir gastos en el tiempo y minimizar molestias a los residentes.

11.1.3. EDIFICIOS TERCIARIOS E INDUSTRIALES

Envolvente térmica: En edificios terciarios (oficinas, comercios, centros educativos, sanitarios, etc.) e industriales, la mejora de la envolvente también desempeña un papel clave, aunque el perfil de uso (horarios, cargas internas) difiere del residencial.

La estrategia general es similar: aislamiento de fachadas, cubiertas y mejora de carpinterías, tal como se detalla en el Capítulo 3: Soluciones Constructivas de la Envolvente.

En oficinas y equipamientos públicos construidos décadas atrás, a menudo la envolvente es deficitaria (muros sin aislante, murocortina de vidrio simple, etc.), provocando altos consumos en climatización. Se recomienda añadir aislamiento en fachadas opacas (por el exterior, mediante SATE o fachada ventilada, especialmente viable en edificios terciarios donde la imagen renovada puede revalorizar el inmueble) y mejorar los cerramientos transparentes: sustituir vidrios simples por dobles o dobles por triples según convenga, empleando vidrios de control solar en fachadas expuestas al sol para reducir cargas de refrigeración en verano.

En edificios de oficinas de varias plantas, una medida efectiva es implementar protecciones solares (lamas, aleros, persianas automatizadas) en ventanas o muros cortina, integradas en la rehabilitación de fachada, para minimizar la sobrecarga térmica debida a la radiación directa sin perder luz natural. En naves industriales, la envolvente suele ser ligera (panel sándwich o chapa metálica); se puede mejorar añadiendo paneles aislantes adicionales en cubiertas y cerramientos, y sellando infiltraciones de aire (portones, lucernarios).

Dado que en el sector terciario e industrial la actividad puede verse afectada por obras, muchas intervenciones en envolvente se planifican coincidiendo con paradas vacacionales o se realizan por fases para no interrumpir por completo el uso del edificio. La viabilidad de aislar por fuera suele ser buena (menos limitaciones estéticas que en residencial), y el impacto energético es alto: en un clima mediterráneo continental como el de Madrid, una piel térmicamente eficiente puede reducir considerablemente los consumos en HVAC de oficinas o reducir la necesidad de calefacción en naves.

Por tanto, en proyectos de rehabilitación integral de edificios terciarios, la envolvente debe atenderse con prioridad, siguiendo el principio de "primero reducir la demanda" antes de abordar mejoras en sistemas.

Sistemas de climatización y gestión energética: Los edificios terciarios e industriales suelen contar con sistemas de climatización más complejos que los residenciales, a menudo centralizados y de gran potencia (climatizadoras, enfriadoras, calderas de gran capacidad, redes de conductos, etc.). Actualizar y optimizar estos sistemas térmicos es fundamental para reducir consumos, tal y como se aborda en Capítulo 4: Sistemas de Calefacción y Refrigeración Eficientes.

En edificios de oficinas y comerciales, una estrategia habitual es la renovación de equipos de climatización central (HVAC): por ejemplo, sustituir antiguas enfriadoras

o bombas de calor centralizadas por modelos modernos de mayor eficiencia (con compresores inverter, refrigerantes de nueva generación y mejor rendimiento a carga parcial), o reemplazar calderas de calefacción antiguas por calderas de condensación o bombas de calor aire-agua de alta capacidad.

Asimismo, incorporar o actualizar los sistemas de control BMS (Building Management System) es clave: un edificio terciario debe contar con automatización que ajuste la climatización y ventilación según horarios de ocupación, temperatura exterior y zonas en uso. Programar encendidos/apagados optimizados, modulación de caudales de aire (mediante VAVs – volumen de aire variable– en oficinas, por ejemplo) y control por sensores (CO_2, temperatura) en cada área puede traducirse en ahorros sustanciales sin merma de confort.

Otra medida eficaz es la sectorización de sistemas: dividir plantas o zonas con distintos usos en circuitos independientes que puedan regularse por separado, evitando climatizar áreas vacías. En locales comerciales, instalar sistemas de aire acondicionado eficientes tipo inverter y cortinas de aire en accesos puede reducir pérdidas.

En edificios sanitarios o educativos, asegurar la eficiencia de calderas de calefacción, recuperar calor de las ventilaciones y optimizar la producción de agua caliente son puntos clave.

Para edificios industriales, donde pueda haber procesos que disipen calor, considerar recuperación de calor de proceso (utilizar ese calor residual para calefacción de naves o precalentamiento de ACS) o implementar sistemas de freecooling (aprovechar aire exterior fresco para refrigerar en entretiempo) en grandes espacios.

Además, en naves industriales con techos altos, medidas como estratificadores de aire (ventiladores de techo para homogeneizar temperaturas) contribuyen a ahorrar calefacción.

Una estrategia común a todos los edificios terciarios es el mantenimiento y regulación fina: ajustar temperaturas de consigna (por ejemplo, evitar enfriar por debajo de 24°C en verano ni calentar por encima de 21°C en invierno en oficinas), usar termostatos inteligentes y monitorear consumos (contadores sectoriales de energía) para detectar desviaciones o consumos anómalos.

Iluminación y equipos eléctricos eficientes: El consumo eléctrico por iluminación y equipamiento en edificios terciarios puede ser muy significativo (en oficinas puede representar 20-30% del consumo eléctrico). Por ello, optimizar la iluminación es una estrategia inmediata y de alta rentabilidad (ver Capítulo 5: Iluminación).

Se debe renovar la iluminación a tecnología LED en todas las áreas (oficinas, pasillos, naves de producción, almacenes), reemplazando tubos fluorescentes, lámparas de halogenuros, etc., por luminarias LED de alto rendimiento. Las ventajas son dobles: ahorros energéticos del 50-70% y reducción de carga térmica (los LED emiten menos calor, disminuyendo ligeramente la demanda de climatización).

En conjunto con esta renovación, implementar sistemas de control de iluminación es crucial: sensores de presencia para apagar luces en zonas desocupadas (salas de reuniones, aseos, almacenes) y control de iluminación natural (sensores de luz diurna que regulen la intensidad de luminarias cercanas a ventanas o lucernarios).

En oficinas modernas ya se integran sistemas DALI o similares para gestión punto a punto; en rehabilitación, se pueden instalar kits de sensores inalámbricos si el cableado nuevo es costoso.

En naves industriales, usar iluminación sectorizada por zonas de trabajo y con temporización fuera de horas productivas evita el despilfarro (ej. apagar secciones enteras de la nave durante pausas o turnos inactivos).

Además de la iluminación, conviene revisar la eficiencia de otros equipos eléctricos: por ejemplo, en edificios terciarios con ascensores, modernizar motores y control (similiar a lo indicado para residenciales) y en centros con muchos equipos ofimáticos o maquinaria, fomentar la adquisición de equipos con etiqueta de eficiencia (ENERGY STAR o equivalentes) y configurarlos con modos de ahorro de energía.

Un edificio inteligente combinará iluminación eficiente, climatización optimizada y gestión de equipos para minimizar consumos sin afectar la funcionalidad, y estas mejoras suelen tener viabilidad alta dado que la reducción de costes operativos justifica la inversión ante empresas o entidades (además, mejoran el confort laboral y la productividad gracias a una mejor calidad de iluminación, por ejemplo).

Ventilación y calidad del aire interior: En el sector terciario, mantener una alta calidad de aire interior es no solo una cuestión de salud sino muchas veces un requerimiento normativo (p. ej. normativa RITE para ventilación mínima por ocupante en oficinas, aulas, locales públicos). Por lo tanto, las estrategias de ventilación eficiente ocupan un lugar destacado en la rehabilitación (ver Capítulo 7: Ventilación y Calidad del Aire Interior).

En oficinas y edificios de uso público, se recomienda instalar o mejorar los sistemas de ventilación mecánica con recuperación de calor. Muchas edificaciones antiguas carecen de ventilación forzada adecuada; la rehabilitación debe incorporar unidades de tratamiento de aire (UTA) que aseguren las renovaciones de aire reglamentarias, pero equipadas con recuperadores entálpicos (recuperación de calor y humedad) para minimizar la carga térmica añadida por ventilar.

Actualizar o añadir recuperadores a sistemas existentes puede ahorrar entre un 20-30% de energía en climatización. Asimismo, la ventilación necesaria debe ser controlada: mediante sensores de CO_2 en salones de actos, salas de reuniones, aulas, etc., las UTA pueden modular el caudal de aire fresco según la ocupación real, evitando sobre-ventilación innecesaria cuando hay pocos ocupantes.

En naves industriales, la ventilación suele estar asociada a control de contaminantes específicos (polvo, humos); donde sea aplicable, también se pueden utilizar recuperadores de calor en la extracción de aire caliente de procesos para precalentar el aire de reposición.

Además de la ventilación general, es importante el control de calidad del aire interior mediante filtración adecuada (filtros de partículas y, si procede, de contaminantes

químicos) para garantizar un ambiente saludable a la par que eficiente. Un buen sistema de gestión permitirá mantener niveles óptimos de CO_2 (por debajo de 800-1000 ppm) con el mínimo coste energético.

Tras la rehabilitación, especialmente si se hermetiza más el edificio, es clave monitorizar la calidad del aire y ajustar los sistemas en consecuencia (ver sección 11.2.1 sobre monitorización).

Energías renovables: Las instalaciones terciarias e industriales suelen tener consumos energéticos elevados, por lo que la incorporación de energías renovables puede aportar ahorros económicos notables y mejorar el cumplimiento de objetivos de sostenibilidad corporativa (ver Capítulo 6: Energías Renovables).

La energía solar fotovoltaica encabeza las recomendaciones, sobre todo para edificios con grandes cubiertas o explanadas disponibles (por ejemplo, naves industriales, centros comerciales con tejados amplios o parking). Un sistema fotovoltaico puede abastecer parte de la demanda eléctrica diurna de oficinas (que coincide con horas solares) o de procesos industriales, reduciendo la compra de energía de la red.

Muchas empresas en Madrid ya instalan fotovoltaica para autoconsumo, aprovechando además incentivos fiscales (amortización acelerada, bonificaciones del IBI, etc. ofrecidas por algunos municipios) y la mejora de imagen verde.

En naves logísticas, también se pueden integrar cubiertas fotovoltaicas tipo sandwich (paneles FV integrados en la cubierta).

Otra opción interesante en edificios con demanda térmica significativa es la energía solar térmica: por ejemplo, hoteles, hospitales o polideportivos con gran consumo de ACS pueden beneficiarse de un sistema solar térmico centralizado que cubra buena parte del agua caliente, o incluso de sistemas de climatización solar (colectores solares de concentración acoplados a máquinas de absorción para refrigeración, aunque esto es menos común).

En polígonos industriales con disponibilidad de terreno, la geotermia (bombas de calor geotérmicas con pozos) puede ser una solución eficiente para climatización, aprovechando el subsuelo como fuente y sumidero estable de calor; su instalación es costosa pero está apoyada por subvenciones en algunos casos.

Asimismo, ciertos procesos industriales podrían utilizar biomasa o biogás como combustible renovable en sus calderas, si disponen de esa posibilidad (por ejemplo, restos orgánicos aprovechables).

Por último, para empresas con objetivos ambientales ambiciosos, la compra de energía verde certificada (ver apartado 11.2.4) complementa las medidas in situ, garantizando que la energía de red que consumen provenga de fuentes renovables.

Aspectos económicos y gestión de la rehabilitación: Acometer la rehabilitación energética en edificios terciarios e industriales suele involucrar a propietarios empresariales o institucionales, donde los criterios de rentabilidad de la inversión y continuidad del negocio son cruciales.

Es fundamental realizar un estudio de viabilidad que priorice las medidas por ROI (retorno de la inversión), integrando los costos de oportunidad por posibles interrupciones de la actividad durante las obras.

Muchas de las estrategias mencionadas (modernización de climatización, sistemas de control, renovables) tienen retornos financieros atractivos por el ahorro energético, y pueden financiarse mediante presupuestos de capital de la empresa, leasing operativo o financiación por terceros (ESCO). Por ejemplo, existen empresas de servicios energéticos que firman contratos de rendimiento garantizado con grandes consumidores: la ESCO asume la inversión en medidas de eficiencia (nueva iluminación, calderas, etc.) y el cliente le paga con parte del ahorro conseguido, asegurándose así un ahorro neto desde el primer día. Este modelo, detallado en capítulos previos, puede eliminar la barrera de la inversión inicial para industrias o gestores de edificios terciarios.

También es importante aprovechar incentivos fiscales: las empresas pueden deducir inversiones ambientales, depreciar aceleradamente equipos eficientes y beneficiarse de ayudas públicas (IDAE y organismos regionales ofrecen subvenciones también para PYMES y grandes empresas que mejoren su eficiencia energética, p. ej. Programas para industria).

Desde la perspectiva de valor inmobiliario, un edificio terciario rehabilitado energéticamente obtiene mejor calificación energética y puede aspirar a certificaciones ambientales (VERDE, LEED, BREEAM ES, etc.) que incrementan su prestigio y atractivo para arrendatarios de alto perfil, posibilitando rentas superiores. Por ello, más allá del mero ahorro en facturas, la rehabilitación energética se alinea con estrategias de Responsabilidad Social Corporativa (RSC) y puede ser usada como argumento de marketing (edificios ecológicos, espacios de trabajo saludables).

A la hora de gestionar el proyecto, se recomienda plantear la rehabilitación en fases compatibles con la operación (ver 11.2.5), por ejemplo: fase 1 en offseason o periodos de cierre (cambiar climatizadoras), fase 2 en siguiente año (aislamiento de fachada por zonas para no andamiar todo a la vez), etc., minimizando impacto en trabajadores o producción.

En definitiva, con el apoyo de estudios técnicos y económicos rigurosos, las rehabilitaciones energéticas en el sector terciario e industrial pueden lograrse de forma rentable, contribuyendo no solo al ahorro sino también a la modernización y valor patrimonial de las instalaciones.

Categoría de intervención	Vivienda unifamiliar (chalet)	Vivienda plurifamiliar (bloque de pisos)	Edificio terciario/ industrial
Envolvente térmica (Aislamiento en fachadas, cubiertas; mejoras de ventanas)	**Prioridad Alta:** Aislamiento exterior o interior muy recomendable en muros y cubierta; fácil decisión individual. Ventanas de alta eficiencia imprescindibles en reforma.	**Prioridad Alta:** Gran impacto en demanda. SATE comunitario ideal (requiere acuerdo); alternativas interiores si fachada protegida. Ventanas eficientes en todas las viviendas, coordinar estéticamente.	**Prioridad Alta:** Esencial en rehabilitación integral para reducir consumos. Añadir aislamiento en fachadas/cubiertas y vidrios de control solar en terciario. Viabilidad buena en muchos casos (menos limitaciones estéticas).
Climatización y ACS eficientes (Calderas, bombas de calor, distribución, control)	**Prioridad Muy Alta:** Sustituir caldera por bomba de calor o condensación; equipos AC eficientes. Zonas y control programable para optimizar uso. Inversión moderada con ahorro a medio plazo.	**Prioridad Muy Alta:** Si caldera central, cambiar a condensación o sistema central renovable; si individuales, fomentar renovación de cada equipo. Equilibrar y sectorizar sistemas. Retorno medio según combustible.	**Prioridad Muy Alta:** Modernizar chillers, calderas o instalar bombas de calor centralizadas. Implementar BMS y control por zonas/ horarios. Medida crítica con ahorros significativos; suele amortizarse en pocos años en usos intensivos.
Iluminación eficiente (LED y control de iluminación)	**Prioridad Alta:** Cambio a 100% LED en interior y exterior; sensores en exteriores o estancias poco usadas. Coste bajo, retorno inmediato.	**Prioridad Alta:** LED en zonas comunes (escaleras, garaje) y promover LED en viviendas. Detectores de presencia/ temporizadores en iluminación comunitaria. Ahorro notable en gasto común.	**Prioridad Alta:** Renovación total a LED en oficinas, naves, etc. Integrar sensores de presencia y aprovecha luz diurna. Retorno muy rápido por alto uso horario y menor carga térmica.
Ventilación e IAQ (Calidad de aire, recuperadores de calor)	**Prioridad Media:** Instalar ventilación mecánica con recuperador en rehabilitaciones profundas (mejora salud y conserva energía). Si no, asegurar ventilación natural suficiente y extracción en baños/ cocina.	**Prioridad Media:** Mejorar ventilación de viviendas (difícil de centralizar). Posible ventilación mecánica individual por piso con recuperador. Mantener conductos shunt. Necesario tras hermetizar para evitar humedades.	**Prioridad Alta:** Obligatorio buen caudal de aire en terciario. Instalar/ optimizar UTA con recuperadores de calor y control por CO_2. En industria, recuperar calor de procesos y ventilar según necesidad. Impacto alto en eficiencia y salud ocupacional.
Energías renovables in situ (Solar FV, solar térmica, biomasa, etc.)	**Prioridad Media-Alta:** Muy recomendable FV en tejado para autoconsumo (alta rentabilidad con apoyo actual). Solar térmica para ACS si demanda importante. Biomasa en entornos rurales. Viabilidad alta con espacio disponible.	**Prioridad Media:** FV colectiva en azotea para autoconsumo compartido (reducir costes comunes y de vecinos, requiere acuerdo y reparto). Solar térmica en ACS centralizada (cumplir % renovable). Viable con ayudas, considerar mantenimiento.	**Prioridad Alta:** FV en cubiertas o terrenos, altamente viable por escala (ahorros sustanciales en tarifa eléctrica). Solar térmica o geotermia si hay demanda térmica relevante (ej. ACS masivo). Biomasa/ biogás en procesos industriales según caso.
Financiación e incentivos (Ayudas, modelos de negocio)	**Claves:** Subvenciones locales/estatales (NextGen, IDAE) cubren parte de la inversión. Deducciones fiscales por obras que mejoren eficiencia. Inversión asumida por propietario, amortizada con ahorro energético en ~5-10 años en varias medidas. Planificar fases si presupuesto limitado.	**Claves:** Acceso a ayudas elevadas para rehabilitación integral (>30% ahorro). Comunidad reparte coste; ayudas pueden cubrir un % importante. Posibles préstamos comunitarios o contrato con ESCO para ciertas mejoras (caldera, solar). Ahorros reducen cuota de comunidad a largo plazo y aumentan valor de pisos.	**Claves:** Evaluar ROI de cada medida; muchas con payback breve. Aprovechar subvenciones para empresas (eficiencia industrial, autoconsumo). Modelos ESCO para financiar sin CAPEX inicial (leasing iluminación, etc.). Mejora de certificaciones aumenta valor comercial e imagen corporativa.

Tabla 11.1. Comparativa de estrategias de rehabilitación energética por tipo de edificio (prioridad aproximada de cada medida según impacto energético y viabilidad práctica):

11.2. ACCIONES PARA LA SOSTENIBILIDAD

Además de ejecutar las intervenciones técnicas descritas, es imprescindible establecer acciones de seguimiento y buenas prácticas que aseguren la sostenibilidad y el óptimo desempeño energético a largo plazo del edificio rehabilitado. A continuación, se presentan recomendaciones concretas para consolidar los resultados obtenidos y potenciar beneficios adicionales, desde la monitorización postobra hasta el mantenimiento eficiente y la planificación futura. Asimismo, se destacan las ventajas colaterales en salud, confort y valor inmobiliario derivadas de una rehabilitación energética exitosa.

11.2.1. MONITORIZACIÓN Y SEGUIMIENTO DE CONSUMOS

Implementar un sistema de monitorización energética es fundamental una vez terminada la rehabilitación. Consiste en medir y registrar regularmente los consumos de energía (electricidad, gas, etc.) y otros parámetros relevantes (temperaturas interiores, caudal de ventilación, calidad de aire) para verificar que las mejoras implantadas generan los ahorros previstos y para detectar desviaciones o oportunidades de optimización.

En la práctica, se recomienda instalar contadores inteligentes y sistemas de adquisición de datos que permitan el seguimiento en tiempo real o casi real del consumo por usos (climatización, iluminación, electrodomésticos, producción, etc., dependiendo del tipo de edificio).

Por ejemplo, en una comunidad de vecinos, un monitor de consumo eléctrico en zonas comunes o un repartidor de costes de calefacción central puede mostrar patrones de uso anómalos (como un aumento inusual de consumo en horas nocturnas). En edificios terciarios, un software de gestión energética (BMS) centralizado puede generar alertas si un equipo consume más de lo previsto o si coinciden picos de demanda que podrían escalonarse. La monitorización continua permite también cuantificar las reducciones efectivas de consumo y emisiones tras la rehabilitación, dando una medidadel éxito del proyecto.

Es aconsejable comparar los consumos reales post-rehabilitación con la línea base anterior (ajustada por clima u ocupación) para evaluar el porcentaje de ahorro logrado. Con esos datos, los gestores o propietarios pueden tomar decisiones informadas: por ejemplo, reprogramar horarios de climatización si se detecta funcionamiento innecesario, o reajustar setpoints.

11.2.2. AUDITORÍAS ENERGÉTICAS POSTOBRA

Relacionado con la monitorización está la realización de auditorías energéticas periódicas después de la rehabilitación. Una auditoría post-obra (por ejemplo, al año de haberse completado las intervenciones) servirá para verificar integralmente el comportamiento del edificio ya rehabilitado. Técnicos especializados pueden analizar los consumos medidos, comprobar las condiciones de confort en distintos espacios y contrastar el funcionamiento de las nuevas soluciones instaladas con lo proyectado.

Esta auditoría de verificación puede incluir ensayos in situ, como termografías en fachada para comprobar la correcta instalación del aislamiento (ausencia de puentes térmicos), tests de hermeticidad (Blower Door) para medir la infiltración de aire tras las mejoras en envolvente, o equilibrado fino de las instalaciones (p. ej. asegurarse de que la distribución de calor en un sistema central es uniforme).

También se revisarán las regulaciones: que las sondas, termostatos, válvulas y automatismos estén calibrados y funcionando conforme a las estrategias de control previstas. Si se detectan desviaciones, la auditoría recomendará acciones correctivas: por ejemplo, si el consumo de calefacción no bajó lo esperado, quizá sea necesario ajustar horarios de encendido, o si ciertos espacios no alcanzan el confort, tal vez agregar un emisor o mejorar el sellado de una ventana.

Además, la auditoría post-obra permite actualizar la calificación energética del edificio: tras las mejoras, conviene obtener un nuevo Certificado de Eficiencia Energética (CEE) que refleje la nueva letra de calificación (esperablemente mejorada a A, B o C dependiendo del alcance de la rehabilitación). Esto no solo comprueba el cumplimiento de objetivos, sino que aporta un documento oficial que revaloriza el inmueble de cara a venta o alquiler.

En edificios terciarios, auditorías térmicas y acústicas regulares (cada 3-5 años)

11.2.3. CERTIFICACIONES VOLUNTARIAS DE SOSTENIBILIDAD

Una vez realizadas las mejoras energéticas, es muy beneficioso aspirar a certificaciones voluntarias que reconozcan el nivel de sostenibilidad y eficiencia alcanzado en el edificio. Sellos como VERDE (GBCe), Passivhaus, BREEAM ES, LEED u otros equivalentes aportan un marco de referencia y una validación externa de la calidad ambiental de la rehabilitación.

Por ejemplo, la certificación VERDE, desarrollada por el Green Building Council España, evalúa multitud de aspectos (energía, agua, materiales, calidad ambiental, confort, etc.) y permite calificar el edificio rehabilitado con medallas (de bronce a platino) según su desempeño sostenible global. Obtener un sello VERDE para un edificio rehabilitado en la Comunidad de Madrid proporcionaría garantía de que se han seguido buenas prácticas y se han alcanzado estándares superiores a los mínimos normativos.

Por su parte, el estándar Passivhaus (o EnerPHit en caso de rehabilitación) certifica que el edificio logra una demanda de calefacción y refrigeración extremadamente baja, gracias a medidas pasivas exhaustivas y alto nivel de hermeticidad y recuperación de calor; si bien es exigente, algunas rehabilitaciones pueden acercarse a sus criterios y lograr el certificado, lo que implica un reconocimiento internacional de edificio de consumo casi nulo.

Asimismo, sistemas como BREEAM ES (adaptación española del británico BREEAM) o LEED (estadounidense) evalúan la sostenibilidad en múltiples categorías y otorgan niveles (Ej. BREEAM Muy Bueno/Excelente, LEED Oro/Platino) que pueden ser atractivos para propiedades terciarias, ya que mejoran la imagen corporativa.

Aunque obtener estas certificaciones conlleva un proceso y costos adicionales (auditorías, documentación, tasas), sus beneficios son múltiples: aseguran una metodología de diseño y ejecución rigurosa, fomentan la consideración de aspectos a veces olvidados (gestión de residuos, bienestar ocupantes, innovación), y al final brindan un sello de calidad reconocido en el mercado. Esto último puede traducirse en mayor valor de alquiler o venta, facilidad para atraer inquilinos o compradores concienciados, e incluso acceso a financiación "verde" (préstamos hipotecarios o bonos verdes vinculados a edificios sostenibles certificados).

Por tanto, se recomienda, tras las intervenciones, evaluar la posibilidad de certificar el edificio en alguno de estos esquemas voluntarios o al menos utilizar sus guías como referencia para futuras mejoras. Incluso si no se busca la certificación formal, seguir los principios de estos estándares contribuirá a garantizar que la rehabilitación alcance niveles superiores de sostenibilidad.

11.2.4. MANTENIMIENTO EFICIENTE Y USO RESPONSABLE

Ninguna rehabilitación energética tendrá éxito duradero sin un mantenimiento adecuado de los nuevos sistemas y un uso responsable por parte de los ocupantes. Una vez implementadas las mejoras, es crucial establecer planes de mantenimiento preventivo que aseguren que todo funcione según su eficiencia diseñada.

Por ejemplo, los sistemas de climatización (bombas de calor, calderas, enfriadoras) requieren revisiones periódicas: limpieza o sustitución de filtros, comprobación de refrigerantes, ajuste de quemadores, calibración de sondas, etc. Un equipo sucio o mal ajustado puede perder parte de su eficiencia en pocos años, anulando parte del ahorro logrado; por ello, se debe programar el mantenimiento con la periodicidad recomendada por los fabricantes y normativa (RITE en España obliga a mantenimiento anual o bianual según equipo).

Lo mismo aplica a la ventilación: limpiar conductos, intercambiadores de calor y verificar el estado de ventiladores garantiza caudales adecuados y rendimiento óptimo de recuperadores.

En sistemas solares, tanto fotovoltaicos como térmicos, habrá que inspeccionar y limpiar los paneles regularmente (por lo menos una vez al año, más en ambientes urbanos con polvo) para mantener su eficiencia; en solar térmica verificar el nivel de glicol y la bomba de circulación.

También las luminarias LED aunque tienen vida larga, se deben revisar pasados algunos años y reemplazar las que fallen por modelos equivalentes para conservar el nivel de iluminación eficiente.

Junto al mantenimiento técnico, está el uso adecuado por los usuarios: es importante concienciar a los habitantes o usuarios del edificio sobre buenas prácticas de eficiencia. Por ejemplo, aunque haya nueva climatización eficiente, seguir recomendando moderación en las temperaturas de consigna (no abusar de calefacción en invierno ni de refrigeración en verano) maximiza el ahorro y prolonga la vida de los equipos al evitar esfuerzos excesivos.

En oficinas, fomentar apagar luces y equipos al salir, o en viviendas recordar la ventilación breve pero efectiva en invierno (en vez de dejar ventanas horas abiertas) son pequeños hábitos que potencian los resultados de la rehabilitación.

Se puede designar un gestor energético en comunidades grandes o edificios terciarios, encargado de vigilar consumos (ver 11.2.1) y promover estas buenas prácticas entre los usuarios.

Adicionalmente, conviene mantener actualizados los protocolos de mantenimiento: llevar un registro de las intervenciones efectuadas en equipos, fechas de cambio de filtros, etc., idealmente integrándolo en la documentación del edificio. Así, ante cualquier transacción inmobiliaria o simplemente para control interno, se tiene constancia de que el edificio se explota eficientemente.

11.2.5. PLANIFICACIÓN DE INTERVENCIONES POR FASES FUTURAS

La rehabilitación energética debe ser entendida como un proceso continuo a lo largo de la vida del edificio, no solo como una intervención única. Por ello, es recomendable establecer un plan a largo plazo que contemple intervenciones por fases, alineado con la vida útil de elementos y con los objetivos de descarbonización a 2030-2050.

Si bien en esta guía se han priorizado ciertas actuaciones inmediatas, puede haber medidas que no se implementaron inicialmente por limitaciones presupuestarias o técnicas y que conviene programar para el futuro. Por ejemplo, una comunidad de propietarios podría decidir aislar fachadas y cambiar caldera ahora (fase 1, inmediato), pero posponer la instalación fotovoltaica a una fase 2 (mediano plazo) en 2-3 años, cuando se recupere inversión o haya nuevas subvenciones, y quizá planificar la renovación total de ventanas en una fase 3 (largo plazo) dentro de 8-10 años, coincidiendo con el fin de vida de las actuales. Esta planificación escalonada permite repartir inversiones, aprovechar máximamente la vida útil restante de algunos elementos y adaptarse a la evolución tecnológica (por ejemplo, esperar para incorporar en unos años baterías de almacenamiento si se abaratan, complementando la FV instalada).

Es útil elaborar un cronograma de mejoras futuras a partir de la auditoría inicial y del estado del edificio: identificando qué componentes serán los próximos en requerir renovación (tejado, sistema de climatización, etc.) e integrando criterios de eficiencia en esas futuras renovaciones.

Para edificios terciarios e industriales, esta planificación suele formar parte del plan de activos de la empresa: conviene incluir hitos como "sustitución de iluminación a LED al 100% en 2026", "instalación de recuperadores de calor en 2027", "certificación VERDE en 2028", etc., marcando un camino claro hacia la sostenibilidad total.

A nivel residencial, cabe también coordinar las actuaciones con las exigencias normativas crecientes: la legislación europea y española está tendiendo a mayores requerimientos de eficiencia (por ejemplo, potenciales obligaciones de rehabilitar edificios con peores calificaciones energéticas en próximos años). Contar con un

plan por fases asegura que el edificio irá cumpliendo con futuros estándares sin sobresaltos, evitando costosas adaptaciones de última hora.

11.2.6. BENEFICIOS ADICIONALES Y CONCLUSIÓN FINAL

Finalmente, es importante recalcar que la rehabilitación energética y las acciones de sostenibilidad asociadas no solo se traducen en ahorros económicos y cumplimiento normativo, sino que generan beneficios directos en la calidad de vida, salud y valor del inmueble.

Un edificio rehabilitado energéticamente ofrece entornos interiores más saludables y confortables: temperaturas más estables, ausencia de corrientes frías, mejor calidad del aire sin humedades ni concentraciones de CO_2, y mayor aporte de luz natural controlada. Esto repercute en el bienestar de los ocupantes, reduciendo problemas respiratorios y alérgicos (al eliminar moho y mejorar la filtración del aire) y aumentando la satisfacción general al habitar o trabajar en el espacio.

Desde el punto de vista del confort, los usuarios experimentan menos oscilaciones térmicas, menos ruidos exteriores (las mejoras de aislamiento suelen incrementar el aislamiento acústico) y mayor sensación de control sobre su entorno (gracias a la domótica, termostatos, etc.).

Además, los edificios eficientes contribuyen a mitigar el estrés térmico en olas de calor o frío, protegiendo especialmente a poblaciones vulnerables (niños, mayores).

En cuanto al valor inmobiliario, múltiples estudios en España y Europa muestran que las viviendas y locales con mejor certificación energética o con instalaciones modernas sostenibles ven incrementado su valor de mercado. Un piso con letra energética B o A puede venderse ofrece un alquiler más rentable para el propietario comparado con otro similar de letra E, debido al ahorro en costes operativos que ofrece y a la mayor conciencia de los compradores sobre la eficiencia.

Asimismo, edificios terciarios con certificaciones ambientales suelen atraer empresas de prestigio dispuestas a pagar rentas más altas por espacios de calidad y representativos de sus valores corporativos.

La rehabilitación energética posiciona por tanto al inmueble en un nivel competitivo más alto, protegiendo su valor a largo plazo frente a la obsolescencia.

Por último, no hay que olvidar el beneficio medioambiental y social: cada edificio rehabilitado contribuye a la reducción de emisiones de CO_2 y a la lucha contra el cambio climático, mejorando la calidad del aire urbano al disminuir la quema de combustibles. Esto repercute positivamente en la comunidad, reduciendo también la llamada pobreza energética al bajar las facturas y haciendo las ciudades más sostenibles y habitables.

En conclusión, acometer una rehabilitación energética integral y mantener prácticas sostenibles no solo cumple el objetivo técnico de ahorrar energía, sino que transforma positivamente el espacio construido y la experiencia de sus usuarios, creando edificios más habitables, saludables y con mayor valor presente y futuro.

Esta guía técnica espera haber proporcionado las estrategias y herramientas necesarias para lograrlo en la Comunidad de Madrid, invitando a arquitectos, técnicos y propietarios a ser protagonistas de esta mejora del parque edificatorio y, con ello, del bienestar colectivo.

12
ANEXOS

ANEXO I

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aerogel: Material de muy baja densidad con enorme capacidad aislante térmico, compuesto en más de un 90% de aire. Debido a su altísima eficacia térmica en poco espesor, es ideal para rehabilitaciones con limitaciones de espacio.

Aerotermia: Sistema de climatización basado en bombas de calor aire-agua que extrae energía térmica del aire exterior para calefacción, refrigeración y ACS (agua caliente sanitaria). Se considera legalmente energía renovable cuando la bomba de calor cumple ciertos requisitos de rendimiento, pues puede obtener hasta un ~75% del calor del aire ambiente usando solo ~25% de electricidad.

Aislamiento térmico: Proceso o material destinado a reducir la transferencia de calor a través de un elemento o sistema, oponiendo resistencia al flujo de calor entre el interior y el exterior. Un buen aislamiento minimiza las pérdidas o ganancias de calor en un edificio.

Análisis de Ciclo de Vida (ACV): Metodología estandarizada que evalúa los impactos ambientales asociados a todas las etapas del ciclo de vida de un producto, material o sistema –desde la extracción de materias primas, producción, transporte e instalación, hasta su uso, mantenimiento y fin de vida (residuos o reciclaje)-. En rehabilitación energética, el ACV permite comparar soluciones no solo por su eficiencia operativa (consumo energético), sino también por su huella ambiental global, favoreciendo decisiones más sostenibles a largo plazo. Se basa en normas ISO 14040 y 14044.

Biomasa (energía): fuente renovable basada en la materia orgánica (vegetal o animal). Comprende madera, residuos agrícolas, pellets, etc., que pueden quemarse o procesarse para obtener calor o biocombustibles. La energía de biomasa aprovecha el carbono fijado por las plantas para generar calor o electricidad de forma "neutra" en emisiones (excluyendo transporte), ya que el CO_2 emitido al quemarse es similar al capturado durante su crecimiento. Suele usarse en calderas o estufas de biomasa para calefacción colectiva o individual.

Bomba de calor: Sistema de climatización que aprovecha un ciclo frigorífico para trasladar calor de un ambiente a otro. Funciona extrayendo calor de una fuente fría (aire exterior, agua, suelo) y "bombeándolo" hacia un foco caliente (interior a climatizar) o viceversa, consumiendo energía en el proceso. Puede proporcionar calefacción en invierno y refrigeración en verano con un mismo equipo.

BTU (Unidad térmica británica): Unidad anglosajona de energía térmica utilizada en climatización. Equivale aproximadamente a 1055 julios y se define como el calor necesario para elevar en 1 °F la temperatura de una libra de agua. En HVAC se usa para expresar capacidades de calefacción o refrigeración (por ejemplo, 12 000 BTU/h ≈ 1 tonelada de refrigeración).

Caldera: Equipo generador de calor que calienta un fluido caloportador (usualmente agua) mediante la combustión de un combustible (gas, gasóleo) o resistencia eléctrica. El agua caliente producida se distribuye por tuberías a emisores

(radiadores, suelo radiante) para ceder calor a los espacios. Las calderas son típicas de sistemas de calefacción hidrónicos.

Caldera de baja temperatura: Caldera diseñada para operar con temperaturas de agua de retorno más bajas que las estándar (aprox. 35–60 °C), alcanzando mejor rendimiento que las calderas convencionales. Son más eficientes porque minimizan las pérdidas de calor en los humos, aunque no llegan a condensar vapor de agua. En rehabilitación, su uso (junto con ajustes de temperatura de impulsión más baja y emisores adecuados) mejora la eficiencia de la calefacción.

Caldera de condensación: Caldera de alta eficiencia que enfría los gases de combustión hasta condensar el vapor de agua que contienen, recuperando el calor latente de esa condensación. Este diseño permite aprovechar más calor de la combustión que una caldera tradicional, logrando rendimientos estacionales superiores al 100% (referidos al PCI del combustible). En rehabilitación energética, sustituir calderas convencionales por calderas de condensación reduce considerablemente el consumo de energía y las emisiones.

Calefacción por aire caliente (convección): Sistema de calefacción centralizada por aire, más habitual en edificios y viviendas de América del Norte, que calienta aire mediante un generador térmico (de combustión o eléctrico) y lo distribuye mediante conductos y un ventilador impulsor. El equipo puede funcionar con gas natural, gasóleo o electricidad: en los modelos de combustión, el aire se calienta al pasar por un intercambiador térmico; en los eléctricos, mediante resistencias. El aire caliente se reparte por las estancias a través de rejillas de impulsión, y el aire más frío retorna al equipo por rejillas de retorno, completando el ciclo de recirculación. Aunque en España es menos frecuente que los sistemas de calefacción por agua, puede encontrarse en edificios terciarios, viviendas unifamiliares o rehabilitaciones con conductos existentes.

Calefacción radiante: Método de climatización en el que superficies calientes (suelos, paredes o techos radiantes) emiten calor principalmente por radiación térmica hacia el resto de la estancia. Calienta directamente objetos y personas en lugar de calentar primero el aire, lo que mejora la eficiencia y el confort.

Calidad del aire interior (CAI): Conjunto de condiciones que determinan la salubridad, confort y seguridad del aire en los espacios interiores de un edificio. Se evalúa en función de parámetros como la concentración de CO_2, humedad relativa, temperatura, presencia de contaminantes (COV, partículas, radón, etc.) y tasa de renovación de aire.

Mantener una buena CAI es esencial para la salud y el bienestar de los ocupantes y forma parte de las exigencias del RITE y del Código Técnico de la Edificación (DB-HS3). En rehabilitación energética, se debe garantizar una ventilación adecuada tras mejorar la hermeticidad del edificio, mediante sistemas de ventilación natural, mecánica o híbrida, preferentemente con recuperación de calor.

Calificación energética: clasificación oficial de un inmueble según su consumo de energía. Se determina mediante el certificado energético y refleja si un edificio es más o menos eficiente. Una calificación alta (A) indica bajo consumo, mientras que valores bajos (F, G) reflejan altos consumos. El certificado analiza parámetros constructivos y de instalaciones.

Calor latente: Energía térmica absorbida o liberada por una sustancia al cambiar de fase (por ejemplo, evaporación o condensación) sin variar su temperatura. Este calor "escondido" no se aprecia con un termómetro, pero es crucial en procesos de humidificación, deshumidificación y en el ciclo frigorífico (evaporador y condensador).

Calor sensible: Energía térmica que, al ser añadida o extraída de una sustancia, produce un cambio de temperatura detectable, sin cambio de estado de la materia. Es el calor medido directamente con un termómetro (por oposición al calor latente). En refrigeración, la capacidad sensible de un equipo se refiere a la porción dedicada a bajar la temperatura del aire (no a remover humedad).

Carga térmica: Cantidad de potencia térmica (energía por unidad de tiempo) que un espacio cerrado intercambia con el exterior debido a las condiciones interiores/exteriores, y que debe ser compensada por los sistemas de climatización. Incluye cargas de calefacción (pérdidas de calor en invierno) y cargas de refrigeración (ganancias de calor en verano) que determinan el tamaño de los equipos HVAC necesarios.

Carta psicrométrica (diagrama psicrométrico): Gráfico utilizado en climatización que representa las relaciones termodinámicas del aire húmedo mediante un conjunto de curvas y líneas. En este diagrama se muestran variables como la temperatura de bulbo seco, humedad relativa, humedad absoluta, entalpía y volumen específico del aire. Es una herramienta de cálculo que permite analizar procesos de acondicionamiento de aire (mezclas de corrientes, enfriamiento, deshumidificación, etc.).

Certificado de Eficiencia Energética (CEE): documento oficial que indica la calificación energética (consumo de energía y emisiones de CO_2) de un edificio o vivienda. Se basa en un análisis de factores como aislamiento térmico, sistemas de climatización e iluminación, y suele incluir recomendaciones de mejora. Su etiqueta muestra una calificación (A, B, C…) según la eficiencia.

Chiller: Equipo de producción de agua fría que utiliza un ciclo frigorífico (por compresión mecánica o por absorción) para extraer calor del agua y cederlo al exterior. Se usa principalmente en climatización y procesos industriales para alimentar sistemas de climatización (fan-coils, climatizadores, suelo refrescante, etc.), trabajando habitualmente con agua a baja temperatura (en torno a 5–7 °C a la salida). Puede ser condensado por aire (intercambia con el aire exterior) o condensado por agua (intercambia con una torre de refrigeración u otro circuito de agua).

Ciclo de refrigeración por compresión de vapor: Proceso termodinámico cíclico empleado en la mayoría de sistemas de refrigeración y bombas de calor. Consta de cuatro etapas principales realizadas por sus componentes: el compresor comprime el refrigerante gaseoso de baja presión, elevando su presión y temperatura; el condensador expulsa calor al ambiente y condensa el refrigerante a líquido; la válvula

de expansión estrangula el paso del líquido, bajando su presión y temperatura; y el evaporador absorbe calor del ambiente a enfriar mientras el refrigerante líquido se evapora. Este ciclo extrae calor de un espacio frío y lo libera en uno más cálido de forma continua.

Ciclo transcrítico: Ciclo frigorífico en el que el refrigerante trabaja por encima de su temperatura y presión críticas en el lado de alta, de modo que no hay condensación "clásica" sino un enfriamiento sensible en un gas cooler (en lugar de condensador). Es típico de sistemas con CO_2 (R-744): el fluido se comprime hasta zona supercrítica, se enfría en el gas cooler y luego se expande hacia el evaporador. Permite altas temperaturas de impulsión y recuperación de calor, pero exige presiones muy elevadas y un control fino de la presión óptima de alta para mantener buen rendimiento energético.

Climatización: conjunto de técnicas para crear condiciones adecuadas de temperatura, humedad y calidad del aire interior en un espacio habitable. Incluye calefacción (invierno), refrigeración (verano), ventilación y humidificación/deshumidificación. El objetivo de la climatización es mantener el confort térmico y el aire salubre. El término abarca tanto sistemas de calefacción como de aire acondicionado (HVAC) y puede referirse a climatización natural (diseño bioclimático) o artificial (sistemas mecánicos). Una rehabilitación energética eficiente busca climatizar consumiendo la menor energía posible, por ejemplo mediante aislamiento, sistemas de alta eficiencia y aprovechamiento solar.

Coeficiente de rendimiento (COP): Índice de eficiencia instantánea de bombas de calor u otros equipos térmicos eléctricos. Se define como la razón entre la potencia térmica entregada (calor proporcionado para calefacción o extraído para refrigeración) y la potencia eléctrica consumida por el equipo. Por ejemplo, un COP = 3 indica que por cada 1 kW de electricidad consumido, el sistema entrega 3 kW en calefacción/enfriamiento. Un COP más alto implica un funcionamiento más eficiente.

Compresor: Máquina motriz del ciclo frigorífico que succiona el refrigerante en estado gaseoso a baja presión desde el evaporador y lo comprime, elevando su presión y temperatura antes de enviarlo al condensador. Es esencialmente la "bomba" que mantiene la circulación del refrigerante y el corazón del sistema de refrigeración.

- Compresor tipo scroll: Compresor volumétrico formado por dos "espirales" (scrolls), una fija y otra que orbita sin girar sobre sí misma. Al moverse, va atrapando el refrigerante en cavidades que se desplazan hacia el centro, reduciendo su volumen y aumentando su presión. Son muy habituales en equipos de climatización (splits, rooftops pequeños, chillers de pequeña y media potencia) por su buena eficiencia, bajo nivel de ruido y vibraciones reducidas.

- Compresor tipo screw (de tornillo): Compresor volumétrico que utiliza dos rotores helicoidales engranados (tornillos macho y hembra) que giran en sentidos opuestos. El gas queda atrapado entre los filetes de los tornillos y la carcasa, y se comprime al avanzar hacia la descarga. Se emplean sobre todo en chillers y sistemas de refrigeración de media y gran potencia, con buen rendimiento a carga parcial y funcionamiento continuo robusto.

Conductividad térmica (λ): Propiedad intrínseca de los materiales que mide la cantidad de calor que conducen a través de una unidad de espesor, por unidad de área y de tiempo, cuando existe un gradiente de temperatura (W/m·K). Cuanto más baja es la conductividad térmica de un material, mejor aislante es. En la guía se mencionan, por ejemplo, aislamientos de EPS especiales con λ ≈0,030 W/m·K, que aportan más aislamiento con menos espesor.

Condensador: Intercambiador de calor en el que el refrigerante, tras ser comprimido, cede su calor al ambiente exterior y cambia de fase de gas caliente a líquido. Normalmente está ubicado en la unidad exterior de un aire acondicionado o en la parte trasera de un refrigerador.

El calor eliminado en el condensador es el que previamente se extrajo del espacio refrigerado más el calor equivalente al trabajo del compresor.

Conducción (térmica): Mecanismo de transferencia de calor a través de un material sólido o entre cuerpos en contacto directo, debido a la difusión de energía cinética entre moléculas. El calor fluye por conducción desde las regiones de mayor temperatura hacia las de menor temperatura. Este modo de transferencia es importante en la evaluación de pérdidas térmicas a través de muros, techos, tuberías, etc., y su eficacia depende de las propiedades conductivas del material (por ejemplo, los metales son buenos conductores, los aislantes lo son pobres).

Confort térmico: Estado de bienestar en el que una persona se siente satisfecha con el ambiente térmico que la rodea, sin experimentar ni frío ni calor excesivo. Se logra cuando las condiciones de temperatura del aire, humedad relativa, temperatura radiante media y movimiento del aire se combinan dentro de rangos adecuados para la actividad realizada y la vestimenta, conforme a los parámetros de confort establecidos (por ejemplo, normas ASHRAE). El confort térmico es un objetivo clave del diseño de sistemas HVAC.

Consumo energético de un edificio: Cantidad total de energía final efectivamente utilizada por todos los sistemas del edificio (calefacción, refrigeración, ventilación, ACS, iluminación, equipos auxiliares, etc.) para mantener condiciones de uso y confort. Se expresa habitualmente en kWh/m²·año y puede desglosarse por vectores energéticos (electricidad, gas, biomasa, etc.).

A diferencia de la demanda energética, que representa la necesidad teórica de energía, el consumo depende también del rendimiento real de las instalaciones, los sistemas de control, el comportamiento del usuario y las pérdidas del sistema. El Código Técnico de la Edificación (CTE), en su Documento Básico HE0, establece límites al consumo energético total del edificio para asegurar su eficiencia global.

Contaminación lumínica: Efecto adverso producido por la dispersión de luz artificial nocturna hacia el cielo o áreas no deseadas, reduciendo la oscuridad natural. En el contexto de rehabilitación de alumbrado, se describe mediante conceptos como

resplandor luminoso nocturno, y su mitigación (por ejemplo, evitando emitir luz por encima del plano horizontal de las luminarias) mejora la eficiencia y el impacto ambiental de la iluminación.

Convección: Mecanismo de transferencia de calor en fluidos (líquidos o gases) mediante el movimiento masivo del propio fluido. Puede ser convección natural, originada por variaciones de densidad (el fluido caliente asciende y el frío desciende, estableciendo corrientes de convección), o convección forzada, cuando un ventilador, bomba u otro dispositivo induce el movimiento del fluido. En climatización, la convección está presente en radiadores (convección natural del aire calentado) y en unidades de aire forzado (convección forzada).

Daylight harvesting: Estrategia de control de iluminación que ajusta automáticamente el nivel de luz artificial en función de la luz natural disponible en el espacio. Se basa en sensores de luz (fotocélulas o luxómetros) que miden la iluminancia cerca de las ventanas o en zonas representativas, y regulan el flujo de las luminarias (encendido/apagado o regulación continua) para mantener un nivel de iluminación objetivo con el mínimo consumo eléctrico posible.

Declaración Ambiental de Producto (DAP / EPD - Environmental Product Declaration): Documento normalizado que informa de los impactos ambientales asociados al ciclo de vida de un producto, basado en una evaluación técnica objetiva según la norma ISO 14025. Una DAP incluye datos cuantificados sobre consumo de recursos, emisiones de gases de efecto invernadero, generación de residuos, acidificación, etc., desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida (análisis de ciclo de vida – ACV).

En edificación, las DAP permiten comparar materiales y sistemas constructivos desde el punto de vista ambiental y son una herramienta clave en el diseño sostenible, las estrategias de economía circular y las certificaciones ambientales de edificios (como VERDE, LEED o BREEAM).

Demanda energética de un edificio: Cantidad de energía térmica que un edificio necesita (sin considerar aún la eficiencia de los sistemas) para mantener condiciones de confort en su interior durante un periodo determinado, en respuesta a las condiciones climáticas exteriores. Se expresa habitualmente en kWh/m²·año, desglosada en demanda de calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria (ACS) e incluso ventilación.

En el marco del Código Técnico de la Edificación (CTE), especialmente en el Documento Básico HE1, la demanda energética se calcula considerando las características de la envolvente térmica, la orientación, la inercia térmica, la estanqueidad al aire y los factores solares, entre otros. Reducir la demanda mediante estrategias pasivas (aislamiento, control solar, ventilación natural…) es el primer paso para lograr edificios energéticamente eficientes.

Desfase térmico: Retardo con el que una onda térmica atraviesa un material desde el exterior al interior. Representa el tiempo que tarda el calor en cruzar un elemento constructivo (p. ej. Un muro) desde que la temperatura exterior sube hasta que esa variación se percibe en la cara interior. En edificios con alta inercia térmica (muros con masa térmica), un gran desfase térmico ayuda a mantener estable la temperatura interior, desplazando las ganancias de calor a horas más tardías del día.

Deslumbramiento: Fenómeno por el cual una fuente de luz intensa en el campo visual causa malestar o disminución de la capacidad de ver claramente. Un alumbrado inadecuado puede provocar deslumbramientos que generan fatiga visual, irritación ocular y dolores de cabeza, afectando el confort de los ocupantes. En iluminación eficiente, se deben controlar los niveles y la distribución de luminancia para evitar este problema.

Dimmable: Se refiere a una luminaria o fuente de luz que admite regulación de flujo luminoso, es decir, que puede aumentar o reducir su nivel de iluminación de forma controlada (normalmente mediante regulación electrónica). Un equipo "dimmable" permite el control continuo o por pasos de la intensidad (por ejemplo, 0–100 %), ya sea desde un regulador manual, un sistema de control (DALI, 1–10 V, KNX, etc.) o estrategias automáticas como el daylight harvesting o escenas de iluminación.

Dimming: Término en iluminación que describe la acción de reducir o aumentar el nivel de luz emitido por una luminaria mediante un sistema de regulación. Implica variar el flujo luminoso (y normalmente la potencia consumida) de forma continua o por pasos, usando drivers o balastos regulables y protocolos de control (1–10 V, DALI, PWM, etc.). El dimming permite adaptar la iluminación a distintas necesidades (confort, escenas, ahorro energético, daylight harvesting, etc.).

Diseño solar pasivo: Estrategia de diseño arquitectónico que aprovecha los recursos solares y las propiedades térmicas de los materiales de la edificación para climatizar de forma natural, reduciendo la dependencia de sistemas mecánicos. Incluye la adecuada orientación y distribución de ventanas, uso de masa térmica (paredes, suelos que almacenan calor), aislamiento térmico, sombreado y ventilación natural. Por ejemplo, en invierno el diseño pasivo busca capturar y retener la radiación solar para calefacción, mientras que en verano la bloquea y favorece la ventilación para enfriamiento.

Economía circular en edificación: Enfoque sostenible que busca cerrar los ciclos de materiales, energía y recursos a lo largo de todo el ciclo de vida de los edificios, minimizando la generación de residuos y el consumo de recursos vírgenes. Se basa en principios como la reutilización de componentes existentes, la recuperación de materiales, el reciclaje al final de la vida útil y el diseño para la deconstrucción y el mantenimiento, priorizando soluciones duraderas, reparables y desmontables. En rehabilitación energética, la economía circular implica aprovechar al máximo la estructura y elementos del edificio existente, reducir la huella ambiental mediante el uso de materiales de bajo impacto, y considerar desde el diseño el destino final de los materiales empleados, contribuyendo a la descarbonización y a la eficiencia de recursos en el entorno construido.

Edificio de Energía Casi Nula (EECN) / Nearly Zero Energy Building (NZEB): Edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto, cuya demanda energética muy baja (calefacción, refrigeración, ACS, iluminación, etc.) se cubre en gran parte con energía procedente de fuentes renovables, preferentemente generada en el propio edificio o en su entorno cercano.

Según el Código Técnico de la Edificación (CTE) vigente en España, los EECN son aquellos que cumplen con los requisitos del Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) en su versión actualizada, especialmente en cuanto a limitación de la demanda energética, rendimiento de instalaciones y contribución mínima de energías renovables (HE0, HE1 y HE4) conforme a los umbrales fijados para cada uso y zona climática.

La revisión de la EPBD (Directiva Europea 2010/31/UE, pendiente de transposición) prevé que todos los nuevos edificios sean Cero Emisiones a partir de 2030, y los edificios públicos a partir de 2028. Para ello, los EECN deberán no solo tener un consumo casi nulo, sino también utilizar exclusivamente energía renovable, eliminar combustibles fósiles y estar preparados para responder a señales digitales y de red ("smart-ready"), reforzando el papel de la eficiencia energética en la descarbonización del parque edificatorio europeo.

Eficiencia energética: uso eficiente de la energía para obtener el mismo servicio (calefacción, iluminación, etc.) con menos consumo. Es la relación entre la energía útil obtenida y la energía utilizada, buscando reducir pérdidas y optimizar sistemas.

EER (Coeficiente de eficiencia energética de refrigeración): Coeficiente de rendimiento en condiciones fijas de un equipo de aire acondicionado o refrigeración. En unidades anglosajonas se define como la relación entre la capacidad de enfriamiento y la potencia eléctrica consumida bajo una temperatura exterior de referencia (habitualmente 35°C).

Emisividad: Propiedad de la superficie de un material que indica su capacidad de emitir o radiar energía térmica. Se mide de 0 a 1 (siendo 1 la de un cuerpo negro ideal). Cuanto más baja es la emisividad de una superficie, menor es la transferencia de calor por radiación. Por ejemplo, el vidrio común tiene emisividad ~0,89, mientras que un vidrio con capa baja emisiva puede tenerla <0,10, reduciendo así la pérdida de calor radiante a través de la ventana.

Energía solar fotovoltaica: Fuente de energía renovable que convierte directamente la radiación solar en electricidad mediante células fotovoltaicas. Los captadores solares fotovoltaicos generan corriente continua cuando incide la luz del sol. Esta energía eléctrica puede consumirse en el edificio, almacenarse o inyectarse a la red. Es una de las tecnologías renovables clave en rehabilitación, ya que permite generar energía limpia en el mismo edificio o comunidad.

Energía solar térmica: fuente de energía renovable que aprovecha la radiación solar para producir calor útil, típicamente para agua caliente sanitaria y calefacción. En la práctica, colectores solares absorben el calor del sol y lo transfieren a un fluido (agua o refrigerante), elevando su temperatura. Se emplea en cubiertas o fachadas para precalentar agua, reduciendo la demanda de combustible o electricidad en sistemas de calentamiento de agua y climatización.

Envolvente térmica (del edificio): Conjunto de elementos constructivos que separan el interior habitable del ambiente exterior, actuando como piel del edificio (muros, cubiertas, suelos, ventanas, etc.). La rehabilitación de la envolvente –mejorando aislamiento en fachadas y cubiertas, ventanas con rotura de puente térmico, etc.– reduce drásticamente las demandas de calefacción y refrigeración. Una envolvente bien aislada y estanca minimiza las infiltraciones de aire y pérdidas térmicas.

Entalpía: Propiedad termodinámica que representa el contenido total de energía de un sistema, sumando la energía interna más el trabajo de presión (energía necesaria para "hacer espacio" al sistema). En el contexto del aire húmedo, la entalpía específica (por unidad de masa de aire seco) incluye tanto el calor sensible del aire como el calor latente contenido en el vapor de agua.

Se mide típicamente en kJ/kg o kcal/kg. En la carta psicrométrica, la entalpía del aire húmedo se utiliza para calcular cargas térmicas y eficiencia de procesos de humidificación/deshumidificación.

Enfriamiento evaporativo: Técnica de enfriamiento del aire que aprovecha la evaporación del agua para extraer calor. Cuando el agua se evapora, absorbe calor del aire circundante disminuyendo su temperatura (en un proceso prácticamente adiabático). Este principio se utiliza en los climatizadores evaporativos o coolers, donde el aire caliente pasa a través de un medio húmedo (paneles de celulosa u otro) y sale más fresco al ambiente. El enfriamiento evaporativo es muy eficiente en climas secos, ya que añade humedad al aire a la vez que lo enfría, y no requiere compresores como el aire acondicionado convencional.

EPBD (Energy Performance of Buildings Directive): Directiva europea sobre la eficiencia energética de los edificios, que establece el marco normativo común para reducir el consumo energético del parque inmobiliario en la Unión Europea. Su versión original es la Directiva 2002/91/CE, posteriormente refundida como Directiva 2010/31/UE, y revisada en 2018 y 2024. La EPBD obliga a los Estados miembros a establecer requisitos mínimos de eficiencia para edificios nuevos y existentes, sistemas técnicos (como calefacción y refrigeración), y a implementar estrategias de rehabilitación a largo plazo. Introduce conceptos clave como el Edificio de Energía Casi Nula (EECN/NZEB), la certificación energética y la renovación profunda, y marca el camino hacia un parque edificatorio descarbonizado y de cero emisiones en 2050.

Estanqueidad: Capacidad de la envolvente del edificio para impedir el paso incontrolado de aire entre exterior e interior. Una envolvente estanca (hermética) evita infiltraciones indeseadas a través de juntas, fisuras o huecos, reduciendo pérdidas de calor y garantizando el confort sin corrientes de aire. La estanqueidad es un factor clave en la eficiencia energética y se verifica mediante ensayos como el Blower Door en estándares pasivos.

Evaporador: Intercambiador de calor en el cual el refrigerante líquido a baja presión se evapora al absorber calor del medio que se desea enfriar. Es la parte fría del ciclo frigorífico: al evaporarse, el refrigerante reduce la temperatura del aire (en un aire acondicionado) o del agua/glicol (en uns enfriadora) que pasa por el evaporador. El calor absorbido por el refrigerante en esta etapa es llevado luego al condensador para ser expulsado al exterior.

Fachada ventilada: Sistema constructivo de aislamiento por el exterior que consiste en colocar una capa de aislamiento térmico sobre la fachada existente, cubierta por una hoja de revestimiento exterior separada por una cámara de aire ventilada. Esta cámara permite la circulación de aire por efecto chimenea, manteniendo seco el aislamiento y mejorando el comportamiento térmico del cerramiento. Una fachada ventilada típica está compuesta por el muro interior existente, el aislante adosado a éste, y una hoja exterior no estanca anclada mediante una subestructura, dejando una cámara ventilada intermedia. El resultado es una mejora del aislamiento térmico sin condensaciones, eliminación de puentes térmicos y una protección adicional de la fachada original.

Factor solar (g): Fracción de la energía solar incidente sobre un acristalamiento que efectivamente entra al interior. Incluye tanto la porción transmitida directamente como el calor re-emitido hacia adentro tras la absorción en el vidrio. Un factor solar bajo indica que el vidrio deja pasar menos calor solar total. Por ejemplo, los vidrios de control solar tienen g más bajos para reducir el calentamiento interior en verano.

Fan-coil (Ventiloconvector): Equipo terminal de climatización de tipo todo-agua, constituido por un intercambiador de calor (batería de agua fría/caliente) y un ventilador. El ventiloconvector toma agua caliente de la caldera o fría del sistema de frío y fuerza el aire de la habitación a pasar por la batería, calentándolo o enfriándolo según el caso. Es común en sistemas centralizados, y puede proporcionar calefacción en invierno y refrigeración en verano de manera flexible en cada estancia.

Fuente de energía renovable: Recurso energético que se regenera de forma natural y continua a escala humana, y cuya explotación no implica la reducción de su disponibilidad futura. En edificación, las fuentes renovables más utilizadas son la energía solar (térmica y fotovoltaica), la aerotermia, la geotermia, la biomasa y, en algunos casos, la mini-eólica, la hidráulica o el biogás. Estas fuentes permiten reducir el consumo de energía fósil, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y mejorar la calificación energética del edificio rehabilitado. El Código Técnico de la Edificación (CTE) y la Directiva EPBD promueven su integración obligatoria en edificios nuevos y rehabilitados.

Ganancia de calor: Aporte de calor hacia un espacio climatizado que provoca un aumento de su carga térmica de refrigeración. Las ganancias de calor pueden ser externas (por ejemplo, radiación solar a través de ventanas, transmisión de calor por paredes/techos desde el exterior, infiltración de aire caliente) o internas (calor liberado por ocupantes, iluminación, equipos eléctricos, maquinaria, etc.). Este calor "ganado" por la zona en verano debe ser extraído mediante climatización para mantener la temperatura de confort. La suma de todas las ganancias de calor determina la carga de enfriamiento que el equipo de acondicionamiento climático debe contrarrestar.

Gases de Efecto Invernadero (GEI): Compuestos gaseosos presentes en la atmósfera que retienen parte de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, contribuyendo al calentamiento del planeta. Entre los principales GEI se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (N_2O), ozono (O_3) y gases fluorados. En el sector de la edificación, las emisiones de GEI provienen principalmente del consumo de energía fósil para calefacción, refrigeración, ACS e iluminación. La rehabilitación energética reduce estas emisiones al mejorar la eficiencia y promover el uso de fuentes de energía renovables. La reducción de GEI es un objetivo clave de los compromisos internacionales sobre cambio climático (como el Acuerdo de París).

Histéresis: Fenómeno por el cual la respuesta de un sistema no depende solo de la condición actual, sino también de su estado previo. En control y regulación (termostatos, fotocélulas, detectores de presencia, etc.), la histéresis se utiliza como una "banda" entre dos umbrales (de conexión y desconexión) para evitar conmutaciones muy frecuentes: por ejemplo, una luminaria que se enciende por debajo de 300 lx y no se apaga hasta superar los 400 lx. Esto aporta estabilidad al sistema y alarga la vida útil de los equipos.

Huella de carbono: indicador ambiental que cuantifica todas las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) —expresadas en toneladas de CO_2 equivalente— asociadas a una actividad, producto, edificio u organización. Refleja el impacto climático global (emisiones directas e indirectas) de un edificio a lo largo de su ciclo de vida. Conocer la huella de carbono permite tomar medidas de reducción (mejoras en eficiencia, uso de energías limpias, compensaciones, etc.).

Humedad relativa: Proporción de vapor de agua presente en el aire en comparación con la cantidad máxima que el aire podría contener a esa misma temperatura antes de saturarse (punto de rocío). Se expresa en porcentaje (%). Una humedad relativa de 50 % significa que el aire contiene la mitad del vapor de agua que podría retener a esa temperatura. El 100 % indica aire saturado (punto en el cual se inicia la condensación). La humedad relativa influye en la sensación térmica de confort y en los procesos de evaporación/condensación en climatización.

HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning): Siglas en inglés que designan los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado de un edificio. El término engloba todas las instalaciones destinadas a mantener condiciones adecuadas de temperatura, humedad y calidad del aire interior. En rehabilitación energética, los sistemas HVAC son clave, ya que representan gran parte del consumo energético, y su modernización (mejora de eficiencia, control, regulación e integración con energías renovables) permite reducir significativamente la demanda energética y las emisiones de GEI.

Infiltración de aire: Entrada no intencionada de aire exterior no acondicionado al interior de un edificio a través de aberturas, fisuras o sellos imperfectos en la envolvente (por ejemplo, rendijas en puertas y ventanas, juntas de muros). La infiltración aumenta las cargas térmicas: en invierno permite la salida de aire caliente interior y la entrada de aire frío, y en verano introduce aire cálido y húmedo del exterior, obligando al sistema HVAC a trabajar más para mantener la temperatura. Se suele cuantificar en renovaciones de aire por hora o mediante coeficientes de infiltración, y puede mitigarse con sellado y barreras cortaviento.

Inercia térmica: Capacidad de acumulación de calor de un elemento constructivo debido a su masa térmica (calor específico × masa). Un material con alta inercia (ej.:

muro de ladrillo macizo, forjado de hormigón) puede almacenar calor y liberarlo lentamente, lo que ayuda a estabilizar la temperatura interior. Aprovechar la inercia térmica de los muros y forjados permite atenuar las oscilaciones de temperatura y reducir el consumo de climatización (calefacción + refrigeración) del edificio. En rehabilitación, esto se potencia aislando por el exterior (manteniendo la masa en el lado interior), de modo que las estructuras internas absorban picos de calor/frío sin pérdidas hacia afuera.

Kilocaloría (kcal): Unidad de energía ampliamente utilizada en contextos térmicos (sistema técnico métrico). Equivale a 1000 calorías. Una kilocaloría se define como el calor necesario para elevar en 1 °C la temperatura de 1 kg de agua a presión atmosférica estándar. En unidades del SI corresponde a aproximadamente 4,186 kJ. En climatización, a veces se usan "calorías" o "kilocalorías por hora" para expresar capacidades de equipos (1 kcal/h ≈ 1.163 W). Por ejemplo, 3024 kcal/h corresponden aproximadamente a 3,516 W, que es 1 tonelada de refrigeración.

kWh (kilovatio-hora): Unidad de energía equivalente a la energía consumida por un dispositivo de 1 kilovatio de potencia funcionando durante 1 hora. Es la unidad habitual para medir el consumo energético en climatización, iluminación, electrodomésticos y facturación eléctrica. En rehabilitación energética se utiliza para expresar tanto el consumo antes y después de la intervención como el ahorro conseguido (ej. reducción de 25 kWh/m²·año en demanda de calefacción).

Masa térmica: Capacidad de ciertos materiales o elementos constructivos para almacenar calor cuando la temperatura ambiente es superior a la de ellos, y cederlo posteriormente cuando la temperatura ambiente desciende. Los materiales con alta inercia o masa térmica (ej.: hormigón, ladrillo, adobe, agua) absorben lentamente el calor, actuando como acumuladores que suavizan las fluctuaciones de temperatura interior. En diseño bioclimático, la masa térmica bien ubicada e integrada con ganancias solares pasivas contribuye a mantener espacios más frescos en horas cálidas y más cálidos en horas frías, reduciendo la demanda pico de los sistemas HVAC.

Máquina de absorción: Máquina frigorífica que produce refrigeración mediante un ciclo de absorción en lugar de un compresor mecánico. Utiliza una fuente de calor (por ejemplo, calor solar o residual) para desorber un refrigerante de una solución absorbente, generando frío con muy poco consumo eléctrico. En otras palabras, emplea un "compresor térmico" en vez de uno eléctrico. Las máquinas de absorción típicas (agua-bromuro de litio o amoniaco-agua) tienen COP ~0,6–0,8, inferiores a los de compresión, pero son útiles cuando se dispone de calor sobrante o renovable (como en refrigeración solar planteada en la guía).

Offseason: Periodo "fuera de temporada" en el que la actividad principal se reduce significativamente. Se refiere a los meses en los que no se requiere el uso intensivo de ciertas instalaciones (por ejemplo, temporada sin calefacción o sin refrigeración), lo que permite programar mantenimientos, paradas y ajustes con menor impacto en el usuario.

Override manual: Acción de anular temporalmente el funcionamiento automático de un sistema (climatización, iluminación, ventilación, persianas, etc.) para imponer un estado fijado por el usuario: encendido, apagado, consigna distinta, posición concreta, etc. El override manual suele hacerse desde un botón, interruptor, BMS o pantalla local y, en buen diseño de control, tiene duración limitada o condiciones de retorno al modo automático para evitar que el sistema quede indefinidamente fuera de la estrategia de ahorro y confort prevista.

Pobreza energética: situación en la que un hogar no puede atender adecuadamente sus necesidades energéticas básicas (mantener temperatura confortable, cubrir necesidades de iluminación y aparatos domésticos) por falta de recursos económicos. Se considera pobreza energética cuando una parte excesiva del presupuesto familiar se destina a pagar la factura energética o cuando las condiciones de confort no se pueden mantener (temperaturas mínimas en invierno). La rehabilitación energética de edificios contribuye a aliviar la pobreza energética mejorando la eficiencia y rebajando facturas.

Potencial de Calentamiento Global (PCG / GWP - Global Warming Potential): Indicador que mide la capacidad relativa de un gas de efecto invernadero (GEI) para atrapar calor en la atmósfera en comparación con el dióxido de carbono (CO_2), considerado como referencia con un valor de 1. El PCG se expresa como un valor adimensional para un horizonte temporal, habitualmente 100 años. Por ejemplo, el metano (CH_4) tiene un PCG ≈ 28–36, lo que significa que 1 kg de CH_4 calienta tanto como 28–36 kg de CO_2 en 100 años. Se utiliza en el Análisis de Ciclo de Vida para estimar el impacto climático de materiales, productos o sistemas constructivos.

Proxy (ventilación controlada por CO_2): Uso de la concentración de CO_2 como variable indirecta (proxy) para estimar la ocupación y la calidad del aire interior y así regular el caudal de ventilación. El CO_2 no es el contaminante principal que se quiere limitar, pero su nivel en el aire interior se correlaciona con la presencia de personas y, por tanto, con otros contaminantes asociados a la ocupación (bioefluentes, olores, etc.).

En los sistemas demand controlled ventilation (DCV), los sensores de CO_2 actúan como proxy: cuando aumenta el CO_2 por encima de un umbral, el sistema incrementa la ventilación; cuando disminuye, reduce el caudal para ahorrar energía.

Psicrometría: Rama de la termodinámica aplicada que estudia las propiedades del aire húmedo (mezcla de aire seco y vapor de agua) y los procesos de intercambio de calor y masa entre el aire y el vapor de agua. Analiza variables como la temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, humedad específica, humedad relativa, entalpía y volumen específico del aire húmedo. La psicrometría proporciona las bases para calcular procesos de acondicionamiento de aire, como enfriamiento con deshumidificación, calentamiento con humidificación, mezclas de corrientes de aire, etc., fundamentales para el diseño de sistemas de climatización.

Puente térmico: Zona puntual o lineal de la envolvente del edificio donde la transmisión de calor es más fácil que en las áreas adyacentes, debido a un cambio en el material o espesor (estructura atravesando el aislante, encuentros de fachada-forjado, marcos de ventana, etc.). En esas zonas la resistencia térmica disminuye, produciendo fugas de calor localizadas. Los puentes térmicos aumentan las pérdidas energéticas y pueden generar condensaciones superficiales; por ello,

en rehabilitación se buscan soluciones para eliminarlos o mitigarlos (mediante aislamiento envolvente continuo, baldosas aislantes en cantos de forjado, carpinterías con RPT, etc.).

Radiación (térmica): Mecanismo de transferencia de calor mediante ondas electromagnéticas, principalmente en la banda del infrarrojo, que emite cualquier cuerpo cuya temperatura esté por encima del cero absoluto. La radiación no requiere medio material (puede propagarse en el vacío) y permite que el calor se transmita desde una fuente caliente a objetos más fríos a distancia. En climatización, la radiación interviene en el balance térmico (por ejemplo, la radiación solar a través de ventanas, o la emisión de calor de radiadores y suelos radiantes hacia las personas). El confort térmico se ve influido por las temperaturas radiante de las superficies circundantes, no solo por la temperatura del aire, debido a este intercambio por radiación.

Recuperador de calor: Sistema de ventilación mecánica que, al extraer el aire viciado interior, aprovecha la energía térmica de ese aire para precalentar (o preenfriar) el aire fresco que ingresa, reduciendo así la carga térmica de ventilación. Mediante un intercambiador, el aire de extracción cede calor (y en recuperadores entálpicos, también humedad) al aire entrante sin mezclarse directamente. Un recuperador de calor bien dimensionado puede recuperar típicamente un 50–90% de la energía, permitiendo ventilación continua con mínima penalización energética y garantizando a la vez la salubridad del ambiente interior.

Refrigerante: Fluido de trabajo empleado en los ciclos frigoríficos para transportar calor. Tiene la propiedad de cambiar de fase dentro de rangos de temperatura y presión convenientes: se evapora absorbiendo calor (efecto refrigerante en el evaporador) y se condensa liberando calor (en el condensador). Un buen refrigerante presenta evaporación a baja temperatura bajo presión moderada, y condensación a alta temperatura bajo presión relativamente elevada, además de ser químicamente estable e inofensivo para el equipo. Ejemplos: refrigerantes sintéticos halogenados (CFC, HCFC como el R-22; HFC como R-410A, R-134a), refrigerantes naturales como amoníaco (R-717), dióxido de carbono (R-744) e hidrocarburos (propano R-290, isobutano R-600a). (El manejo de refrigerantes está sujeto a normativas ambientales debido a su impacto en capa de ozono o efecto invernadero).

Rendimiento estacional: Eficiencia promedio de un sistema a lo largo de una temporada completa de uso (invierno para calefacción, verano para refrigeración), considerando las variaciones de carga y condiciones reales de funcionamiento. Por ejemplo, en una caldera de condensación el rendimiento estacional puede superar el 100% respecto al poder calorífico inferior del combustible, porque recupera calor latente que las calderas estándar desaprovechan. Este indicador permite comparar tecnologías en base a su comportamiento

anual integrado, en lugar del rendimiento instantáneo a carga nominal.

Rehabilitación energética: proceso de renovación o mejora del parque edificado existente con el objetivo de aumentar su eficiencia energética y reducir consumos y emisiones. Se centra en actuaciones sobre la envolvente térmica (muros, cubierta, huecos) y sistemas para reducir la demanda de calefacción y refrigeración.

Rehabilitación integral energética: Intervención global, planificada y coordinada sobre un edificio existente que mejora de forma sustancial su comportamiento energético, actuando de forma conjunta sobre la envolvente térmica (fachadas, cubiertas, ventanas), las instalaciones térmicas (calefacción, refrigeración, ACS, ventilación) y la integración de energías renovables. Su objetivo es reducir significativamente el consumo de energía final, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y mejorar el confort térmico, alineándose con los objetivos de descarbonización del parque edificatorio.

Actualmente, este tipo de intervención también abarca el resto de los elementos del edificio que requieren mantenimiento o mejora, como la estructura, las instalaciones de saneamiento, fontanería o electricidad, así como la corrección de patologías constructivas. Todo ello permite alargar la vida útil del edificio y adaptar sus características técnicas, funcionales y normativas a los estándares actuales.

Además, la rehabilitación integral energética incorpora principios de economía circular, como la reutilización, recuperación o reciclaje de elementos constructivos existentes, y la selección de materiales en función de su impacto ambiental y comportamiento al final de la vida útil del edificio. Es, por tanto, una actuación plenamente sostenible, que puede incluir también la reestructuración del programa arquitectónico para adaptar el edificio a las necesidades sociales actuales y futuras (por ejemplo, accesibilidad, flexibilidad de uso, cambios en la ocupación o integración de nuevos usos).

Resistencia térmica (R): Parámetro que mide la capacidad aislante de un material o elemento constructivo. Se define como la inversa de la transmitancia térmica ($R = 1/U$) y se expresa en $m^2 \cdot K/W$. Un valor R elevado indica que el material ofrece una gran resistencia al paso del calor, es decir, actúa como un buen aislante térmico. En rehabilitación energética, se busca incrementar la resistencia térmica de fachadas, cubiertas y suelos para reducir las pérdidas o ganancias de calor, mejorando así la eficiencia energética del edificio.

Resplandor luminoso nocturno: Halo de luz visible sobre las ciudades o grandes instalaciones de iluminación durante la noche, causado por la dispersión de la luz artificial en la atmósfera. Es un componente de la contaminación lumínica y consta de luz directa emitida hacia el cielo y luz reflejada desde el suelo que vuelve a la atmósfera. La rehabilitación de alumbrado exterior busca minimizar este resplandor (mediante luminarias con cortes de luz superiores, LED dirigidos, etc.), para recuperar cielos nocturnos oscuros y evitar derroche de energía iluminando el cielo.

ROI (Return on Investment / Retorno de la inversión): Indicador económico que mide la rentabilidad de una inversión relacionando el beneficio obtenido con el coste inicial. Habitualmente se expresa en porcentaje:

$$\text{ROI} = \frac{\text{Beneficio neto}}{\text{Inversión inicial}} \times 100$$

En proyectos de eficiencia energética (rehabilitación, cambio de equipos, fotovoltaica, etc.) el ROI permite comparar alternativas y priorizar aquellas que recuperan antes la inversión y generan mayor beneficio económico a lo largo de su vida útil.

Rotura de puente térmico (RPT): Técnica constructiva para eliminar o reducir un puente térmico, usualmente en los marcos metálicos de ventanas. Consiste en separar las partes interior y exterior del marco con un material de muy baja conductividad térmica, de modo que el calor no pueda fluir directamente de un lado al otro. La RPT en carpinterías metálicas (intercalando un perfil separador plástico entre los perfiles de aluminio) mejora notablemente la transmitancia térmica del marco, reduciendo pérdidas y condensaciones. Las carpinterías con RPT son recomendables en rehabilitación para alcanzar un buen aislamiento de los huecos

SATE (Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior): Solución de aislamiento consistente en fijar paneles aislantes por la cara exterior de los muros de la fachada y cubrirlos con un revestimiento protector. Es conocido internacionalmente como ETICS (External Thermal Insulation Composite System). El SATE típicamente emplea placas de poliestireno expandido (EPS) o lana mineral adheridas o ancladas al muro, luego recubiertas de mortero con malla y acabado final. Este sistema, muy utilizado en rehabilitación, mejora la eficiencia térmica eliminando puentes térmicos y sin reducir espacio interior.

SEER (Rendimiento estacional de refrigeración): Medida de la eficiencia global de un equipo de aire acondicionado o bomba de calor en modo refrigeración a lo largo de toda la temporada de enfriamiento. Se calcula como la relación entre la cantidad total de frío entregado) durante la temporada y la energía eléctrica total consumida en ese período, considerando un perfil estándar de cargas parciales y temperaturas exteriores variables. En otras palabras, promedia la eficiencia del equipo en condiciones reales de uso estacional. Un SEER alto significa un menor consumo para una misma demanda anual de refrigeración.

SCOP (Rendimiento Estacional en calefacción): Indicador de eficiencia energética estacional de una bomba de calor en modo calefacción. Representa la relación entre la energía térmica total aportada (en kWh) durante toda la temporada de calefacción y la energía eléctrica consumida en ese mismo período. Se expresa en unidades sin dimensión (W/W o kWh/kWh). Un valor alto de SCOP indica una bomba de calor más eficiente estacionalmente. Por ejemplo, un SCOP = 4 significa que por cada kWh eléctrico consumido se suministran 4 kWh térmicos de calefacción en promedio. En normativa europea suele utilizarse el término SCOP (Seasonal Coefficient of Performance).

Sellado: En ventanas y acristalamientos, se refiere al cierre hermético de las juntas para impedir entrada de aire o agua. Existen dos tipos principales: (1) Sellado perimetral de la UVA (unidad de vidrio aislante), que sella la cámara de aire entre vidrios –garantizando la estanqueidad y durabilidad del doble acristalamiento–, y (2) Sellado marco-acristalamiento, que consiste en la unión sellada entre el borde del vidrio y el marco, realizada tanto por el interior como por el exterior del cerramiento.

Un buen sellado asegura la estanqueidad al aire y al agua de la ventana, evitando filtraciones, condensaciones y pérdidas de eficiencia energética.

Simulación energética de edificios: Proceso de modelado digital que permite predecir el comportamiento energético de un edificio a lo largo del tiempo, en función de sus características arquitectónicas, constructivas, climáticas y de uso. A través de herramientas informáticas especializadas, como LIDER-CALENER, CYPETHERM HE Plus, DesignBuilder o EnergyPlus, se evalúan aspectos como la demanda de calefacción y refrigeración, el consumo de energía final, el confort térmico y el impacto de mejoras en la envolvente o en los sistemas térmicos. Es una herramienta clave en la rehabilitación energética, ya que permite comparar alternativas de intervención y justificar el cumplimiento de los requisitos del CTE y de programas de ayudas públicas. También se utiliza en certificación energética y análisis de ciclo de vida (ACV).

Sistema de distribución térmica por agua: Sistema de calefacción en el cual el medio para transportar el calor es un fluido (generalmente agua, a veces mezclada con anticongelante) que circula por una red de tuberías. Una caldera u otra fuente calienta el agua, y ésta es impulsada a radiadores, convectores o circuitos de suelo radiante que emiten el calor al ambiente. Tras ceder calor, el agua más fría retorna a la caldera para ser recalentada, cerrando el circuito. Los sistemas hidrónicos permiten un calor uniforme y confortable, y pueden zonificarse fácilmente; su inercia térmica es mayor que la de sistemas de aire.

Sostenibilidad: Desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Esta definición, formulada por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de las Naciones Unidas (Informe Our Common Future, 1987), establece las bases para el equilibrio entre desarrollo económico, inclusión social y protección ambiental a largo plazo. En edificación implica respetar el medio ambiente reduciendo impactos (consumo energético, emisiones, uso de materiales) y atendiendo criterios sociales y económicos. Engloba los tres pilares (ambiental, social, económico) y promueve prácticas como el uso de energías renovables y la rehabilitación eficiente.

Suelo radiante: Sistema de calefacción por baja temperatura que distribuye el calor mediante un circuito de tuberías con agua caliente embebidas bajo el pavimento del suelo (o cables eléctricos calefactores, en la variante eléctrica). El calor se emite de forma uniforme desde el suelo hacia arriba principalmente por radiación, proporcionando alto confort con temperatura de agua relativamente baja (~30–45 °C). En rehabilitación energética, el suelo radiante combinado con calderas de condensación o bombas de calor permite mejorar la eficiencia global, ya que dichas fuentes trabajan óptimamente con retornos fríos. Además, este sistema reduce estratificación de calor y mejora el reparto térmico en la estancia.

Suelo refrescante: Sistema de refrigeración radiante que consiste en hacer circular agua fría por un circuito de tuberías embebido bajo el pavimento, absorbiendo el calor del ambiente interior. Actúa como un sumidero de calor, ya que reduce

la temperatura del aire interior mediante intercambio térmico por radiación y convección natural. Aunque es una solución eficiente y silenciosa, su diseño requiere especial precaución para evitar condensaciones superficiales: si la temperatura del suelo baja por debajo del punto de rocío del aire, se produce humedad en la superficie, lo que puede generar riesgos para el confort y la integridad de los materiales. Por ello, debe combinarse con sistemas de control higrométrico (deshumidificación activa o ventilación con control de humedad).

Sumidero de calor: Medio o sistema que absorbe y evacua energía térmica procedente de otro cuerpo o del ambiente, reduciendo su temperatura. En climatización, un sumidero de calor puede ser el suelo refrescante, el aire exterior (en una bomba de calor aire-aire en modo refrigeración), o el agua de un sistema geotérmico. El concepto es clave en refrigeración: todo sistema necesita transferir el calor extraído del interior hacia un sumidero externo. En rehabilitación energética, el correcto dimensionado y control del sumidero (por ejemplo, evitando que la temperatura del suelo baje del punto de rocío) es fundamental para garantizar la eficiencia y evitar problemas como la condensación superficial.

Termostato: Dispositivo de control automático que detecta la temperatura de un espacio o de un equipo y actúa sobre el sistema de climatización para mantener la temperatura deseada (setpoint). En calefacción, un termostato ambiente enciende o apaga la caldera, el horno o la bomba de calor cuando la temperatura ambiente cae por debajo o sube por encima del valor programado. En refrigeración/aire acondicionado hace lo propio con el compresor o el sistema de control. Existen termostatos mecánicos sencillos (de mercurio o bimetálicos) y electrónicos programables o inteligentes. Un correcto ajuste y ubicación del termostato es importante para el ahorro energético y el confort.

Tonelada de refrigeración: Unidad de potencia frigorífica tradicional, usada especialmente en América del Norte, equivalente a 12 000 BTU/h (aprox. 3.516 kW). Corresponde al calor absorbido al derretir una tonelada corta de hielo (907 kg) en 24 horas. Se utiliza para expresar capacidades de enfriamiento de grandes sistemas de climatización; por ejemplo, un chiller de 100 toneladas equivale a 1.200.000 BTU/h (~351,6 kW). La abreviatura habitual es "TR" o simplemente "ton" en contextos HVAC.

Transmitancia térmica (U): También llamado coeficiente de transmisión térmica, o transmitancia térmica, representa la cantidad de calor (energía) que atraviesa un elemento constructivo por unidad de superficie y por cada grado de diferencia de temperatura entre sus dos caras. Se expresa en W/ $m^2 \cdot K$; valores menores de U indican mejor aislamiento. Por ejemplo, el U de un doble acristalamiento es menor que el de un vidrio sencillo, lo que reduce las pérdidas de calor. Técnicamente en el ámbito de la ingeniería, la física y la simulación energética, se conoce como U_{value}.

Válvula de expansión: Dispositivo de control del flujo de refrigerante líquido entre la parte de alta presión y la parte de baja presión de un sistema frigorífico. Al forzar el paso del líquido a través de un orificio calibrado, produce una caída brusca de presión y temperatura en el refrigerante, preparándolo para evaporarse en el evaporador. Hay varios tipos (tubo capilar, válvula de expansión termostática, válvula de expansión electrónica, flotador, etc.), pero todas cumplen la función de dosificar el refrigerante al evaporador asegurando que se vaporice completamente. Un ajuste adecuado de la válvula de expansión permite un rendimiento óptimo del evaporador sin retorno de líquido al compresor.

Ventilación: Proceso de intercambio de aire en un recinto, mediante el cual se extrae el aire viciado interior y se reemplaza por aire fresco exterior. La ventilación natural ocurre por diferencias de presión (viento, convección térmica) a través de aberturas como ventanas, rejillas o chimeneas de ventilación. La ventilación mecánica emplea ventiladores o unidades de tratamiento de aire para forzar la renovación del aire, pudiendo incluir recuperación de calor.

Una ventilación adecuada mantiene la calidad del aire interior diluyendo contaminantes, controlando olores y nivel de CO_2, y gestionando la humedad. En normativas se suelen especificar caudales mínimos de ventilación por ocupante o por metro cuadrado para distintos espacios.

Ventilación Mecánica Controlada (VMC): sistema mecánico de renovación de aire en edificios que introduce aire exterior fresco y extrae aire interior viciado de forma continua y eficiente. La VMC fuerza la renovación de aire garantizando calidad del aire interior y control de humedad, recuperando a menudo parte del calor del aire extraído. Permite ventilar sin pérdidas energéticas excesivas, al contrario de ventilar abriendo ventanas. Es fundamental en envolventes muy aisladas, pues asegura la renovación del aire sin comprometer la eficiencia.

Hay sistemas de doble flujo con recuperador de calor que precalientan el aire nuevo con el calor del aire extraído.

Vidrio de baja emisividad: Acristalamiento al que se le ha aplicado una fina capa metálica casi invisible que reduce drásticamente su emisividad térmica. Este vidrio bajo emisivo pierde menos calor por radiación que un vidrio común, contribuyendo a un menor coeficiente U del hueco. En invierno mantiene el calor interior (reflejando la radiación infrarroja de onda larga de vuelta al ambiente) y en verano puede ayudar a bloquear parte de la radiación solar de onda larga. En la guía se recomienda instalar vidrios bajo emisivos antes que aumentar solo la cámara de aire, pues reducen mucho más la transmitancia térmica. Estos vidrios, combinados con carpinterías con RPT y buenos sellados, mejoran significativamente la eficiencia energética de las ventanas rehabilitadas.

Zona térmica: Espacio o conjunto de espacios dentro de un edificio que, en una simulación energética, se consideran con condiciones térmicas interiores homogéneas y que comparten un mismo perfil de uso, horarios de ocupación, temperaturas de consigna y sistema de climatización. Cada zona térmica se modela como una unidad independiente de cálculo en los programas de simulación energética (como CYPETHERM, EnergyPlus o DesignBuilder) y permite evaluar de forma diferenciada la demanda y el consumo energético según el uso y comportamiento de cada área del edificio.

Una correcta zonificación térmica mejora la precisión del modelo energético y permite aplicar estrategias específicas de diseño o rehabilitación.

Zonificación: División de un edificio o vivienda en varias zonas independientes de control térmico, de modo que cada zona se climatiza según su propia demanda o programación. En la práctica, la zonificación puede implementarse con múltiples sistemas HVAC dedicados (por ejemplo, varios equipos más pequeños atendiendo distintas áreas) o con un solo sistema centralizado que regula el flujo de aire mediante compuertas motorizadas y termostatos en cada zona. La zonificación mejora el confort al adecuar la temperatura de cada espacio a su uso (por ejemplo, separando zona de día y de noche) y ahorra energía al evitar sobre-climatizar áreas no ocupadas. Cada zona suele contar con su propio termostato, y el sistema ajusta la distribución de calor/frío según la demanda individual.

ANEXO II

REFERENCIAS ÚTILES

European Commission – Renovation Wave: Estrategia europea para duplicar la tasa anual de renovaciones de edificios y rehabilitar 35 millones de edificios antes de 2030. Incluye plan de acción, financiación (fondos UE) y objetivos de eficiencia y economía verde en rehabilitación.

https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/renovation-wave_en

Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (España): Componente destinado a la rehabilitación energética de edificios (PREE, Agenda Urbana, etc.), con casi 15.400 M€ de inversión (10.820 M€ NextGeneration) para acelerar la renovación y alcanzar objetivos del PNIEC/ ERESEE. Detalla programas de ayudas, "oficinas de rehabilitación" y planes piloto en zonas rurales.

https://planderecuperacion.gob.es/documentos-y-enlaces

RENOVATE Europe – Campaña Renovate Europe (Orcasitas, Madrid): Ejemplo de éxito de rehabilitación energética colectiva. El conjunto de Orcasitas (Usera, Madrid) ha rehabilitado ya 50 edificios, con 107 bloques y 62 casas en proceso, mejorando aislamiento, climatización y eliminando amianto gracias a subvenciones europeas y municipales. La CE destaca Orcasitas como modelo en jornadas internacionales. *(*www.renovate-europe.eu*).*

https://eumeps.eu/eumeps-newsroom-sie/news/orcasitas-community-renovation-with-eps-in-madrid-spain

Proyecto CITYnvest: Iniciativa europea (2015-2018) para capacitar autoridades locales y lanzar ahorros energéticos en edificios públicos. Actuó en regiones piloto (Lieja, Ródope, Murcia), promoviendo modelos de financiación innovadores y buenas prácticas replicables en Europa. CITYnvest difundió casos de éxito y formó a gestores públicos para facilitar grandes renovaciones energéticas.

https://www.citynvest.eu/?q=content/sunshine-0

Proyecto Rehabilite: Proyecto SUDOE (2016-2018) para identificar instrumentos financieros que superen la barrera de inversión en rehabilitación energética de viviendas y edificios públicos. Mobiliza fondos europeos y brinda asistencia técnica y formación, mejorando políticas de eficiencia energética en el entorno público y privado. Un ejemplo de cooperación transfronteriza (España, Francia, Portugal) enfocado a instrumentos de financiación innovadores.

https://mui.carm.es/presentacion

Proyecto E4R (European Energy Retrofit): Iniciativa Interreg SUDOE (2011-2012) para impulsar y promover la rehabilitación energética en el suroeste europeo. Dirigido a administraciones, promotores y usuarios, buscó conocer el estado energético del parque existente y cuantificar mejoras posibles. Se creó un portal sectorial y eventos técnicos para compartir soluciones de ahorro energético en rehabilitación. Resalta la colaboración transnacional y la elaboración de herramientas prácticas (aplicación de evaluación, catálogo de medidas, etc.) para el sector.

https://interreg-sudoe.eu/proyectos-sudoe-2007-2013/

Proyecto EMC3 (Enabling Massive Change for Climate-neutral Cities): Iniciado en 2025, impulsado por el programa NetZeroCities de la CE. Enfocado en renovar energéticamente y rehabilitar el entorno urbano en España, con 7 ciudades españolas (Vitoria, Madrid, Barcelona, Valencia, Sevilla, Zaragoza, Valladolid) dentro de la Misión de Ciudades Climáticamente Neutras 2030 . Trabaja en planificación estratégica, adaptación normativa, gobernanza y financiación, con objetivos de eficiencia energética y descarbonización urbana.

https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/eu-missions-horizon-europe/climate-neutral-and-smart-cities_en

https://www.construible.es/2025/05/20/proyecto-europeo-emc3-impulsara-rehabilitacion-energetica-entorno-construido-espana

Estrategia Long-Term Renovation Strategy (ERESEE, España): Plan nacional de largo plazo para la rehabilitación energética (no citado directamente, pero recogido en planeamiento español) que, junto al PNIEC, establece metas de eficiencia en edificios para 2050. Incluye la agenda urbana española, oficinas de rehabilitación, líneas de financiación (PREE, PIREP) y objetivos de reducción de emisiones en edificación.

https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/eresee_2020.pdf

Build Up/BUILD UP Skills: Iniciativas de la UE para difusión de buenas prácticas y capacitación en eficiencia de edificios. (Por ejemplo, la web BUILD UP reúne guías, casos de éxito y noticias sobre eficiencia energética en edificación – vea la sección de estudios y publicaciones de la Comisión Europea).

https://build-up.ec.europa.eu/en/home

ARCE 2050 – Arquitectura Cero Emisiones: El objetivo principal del proyecto es alcanzar la neutralidad climática en 2050 en el sector de la edificación, como reclama el Pacto Verde Europeo, incluyendo para ello objetivos nacionales intermedios para 2030, 2035 y 2040.

https://www.mivau.gob.es/arquitectura-edificacion/arce-2050/que-es-arce-2050

HIBERATLAS by **eurac** research (**Hi**storic **B**uilding **E**nergy **R**etrofit Atlas): Catálogo de rehabilitación energética de edificios en Europa.

https://hiberatlas.eurac.edu/en/welcome-1.html

IDAE - Guías de rehabilitación energética

https://www.idae.es/publicaciones

Fenercom - Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid

https://www.fenercom.com/publicaciones/libros-guias/

MITECO - Ministerio para la Transición Ecológica

https://www.miteco.gob.es

GBCe – Guía VERDE

https://gbce.es/metodologia-verde/

BREEAM ES

https://breeam.es

DGNB – Certificación sostenible

https://gbce.es/gbcesl/certifica-dgnb/

Level(s) - Marco europeo para edificios sostenibles

https://green-forum.ec.europa.eu/green-business/levels_en

PassiveHaus Institute

https://passivehouse.com

VIVE COAM

https://www.coam.org/en/servicios/visado/marca-vive-coam

ANEXO III

ASOCIACIONES PROFESIONALES DE REFERENCIA

ASA (Asociación Sostenibilidad y Arquitectura) – Asociación independiente, sin ánimo de lucro, de participación libre y carácter neutral, formada por arquitectos interesados en la sostenibilidad en la edificación. ASA promueve la investigación, la divulgación y la formación en temas de eficiencia energética, bioconstrucción, economía circular y arquitectura sostenible.

Está ubicada en la sede del CSCAE en Madrid (P.º de la Castellana 12, 4ª planta, 28046 Madrid) y atiende consultas de lunes a viernes, ofreciendo además recursos en su web (www.sostenibilidadyarquitectura.com).

Datos de contacto: Teléfono +34 914 352 200 (ext. 220), correo electrónico info@sostenibilidadyarquitectura.com.

Observatorio 2030 (Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España, CSCAE) – Iniciativa estratégica del CSCAE orientada a promover espacios urbanos más inclusivos, seguros y sostenibles. El Observatorio 2030 agrupa a administraciones públicas, industria, fundaciones y universidades para impulsar la rehabilitación urbana y la innovación en la edificación sostenible.

Opera desde el CSCAE, cuya sede está en P.º de la Castellana 12, 4ª planta, 28046 Madrid; el teléfono general del CSCAE es +34 914 352 200.

En la web del CSCAE (cscae.com) se publican informes, estudios y noticias relacionados con la sostenibilidad arquitectónica y la rehabilitación.

Oficina de Rehabilitación del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid - Apoyo técnico y tramitación de ayudas para la rehabilitación energética de edificios. Se ubica en la calle Hortaleza 63, 1ª planta, 28004 Madrid.

Datos de contacto: Teléfono: +34 91 595 15 64 (L, X, V – 11:00–14:00), correo electrónico: oficinaderehabilitacion@coam.org, web: oficinarehabilitacion.coam.org

Green Building Council España (GBCe) – Consejo para la edificación sostenible en España, es la principal asociación que agrupa a profesionales (arquitectos, ingenieros, promotores, instaladores, etc.) comprometidos con la construcción verde. GBCe desarrolla metodologías de certificación (VERDE, DGNB), materiales divulgativos y formación para promover la eficiencia energética en edificios.

Tiene su sede en Madrid (C/ Moreto 15, 6º izda., 28014 Madrid).

Datos de contacto: Teléfono +34 914 119 855, correo info@gbce.es , web: gbce.es.

AECIM – Asociación de Empresas del Metal de Madrid - Representa y defiende los intereses de empresas del metal en Madrid.

Actúa como enlace entre la industria y la administración.

Datos de contacto: web: aecim.org

AEFHOP (ANEFHOP) – Asociación Nacional de Fabricantes de Hormigón Preparado - Agrupa a fabricantes de hormigón preparado en España (más de 300 empresas), ofreciendo asesoría técnica, formación, normativa y representación profesional desde 1968. Está ubicada en la calle Bretón de los Herreros, 43, bajo, 28003 Madrid.

Datos de Contacto: Teléfono: +34 91 441 66 34, correo electrónico: anefhop@anefhop.com, web oficial: anefhop.com

AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación (Marca N Sostenible) - Entidad líder en España dedicada a la certificación, normalización, formación y proyectos ambientales. La Marca AENOR N Sostenible es la primera certificación nacional específica para la sostenibilidad de productos, basada en criterios europeos LEVEL(s) y la evaluación de múltiples indicadores ambientales, económicos y sociales. Especialización destacada en certificación ambiental de productos y edificios (Edificio Sostenible AENOR, Marca N, huella de carbono, economía circular). Apoyo normativo (UNE), consultoría ESG, formación especializada y servicios técnicos en gestión de sostenibilidad.

Se encuentra en la calle Génova, 6, 28004 Madrid.

Datos de contacto: Teléfono: +34 91 529 49 20 / +34 91 432 60 00, correo electrónico: info@aenor.com, web oficial: aenor.com

AFEC – Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización - Organización sin ánimo de lucro fundada en 1977, que representa a fabricantes de equipos HVAC&R (calefacción, ventilación, aire acondicionado y refrigeración). Entre sus áreas de actuación está la Ventilación Mecánica Controlada (VMC) y unidades de tratamiento de aire, defendiendo el sector ante normativas y promoviendo soluciones eficientes y de calidad del aire interior.

Tiene su sede en la calle Francisco Silvela, 69, 1.º D, 28028 Madrid.

Datos de contacto: Teléfono: +34 91 402 7383, correo electrónico: afec@afec.es, web: https://www.afec.es

AFELMA – Asociación de Fabricantes Españoles de Lanas Minerales Aislantes - Agrupa a fabricantes de aislamientos de lana mineral (vidrio y roca).

Está ubicada en la calle María de Molina 54, 5.º, 28006 Madrid

Datos de contacto: Teléfono: +34 91 028 79 40, correo electrónico: info@afelma.org, web: afelma.org

AFML – Asociación de Fabricantes de Madera Laminada de España - Representa a fabricantes de madera laminada, promoviendo calidad del producto, investigación técnica y buenas prácticas. Con sede en Madrid y operativa desde 2004, está integrada en la Federación Española de Industrias de la Madera (FEIM).

Se ubica en la calle Flora, 3, 2º Dcha, 28013 Madrid.

Datos de contacto: Teléfono: +34 915 478 943, correo electrónico: afml@feim.org, web oficial: https://www.feim.org/asociaciones/afml

ANDECE – Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón - Representa a la industria del prefabricado de hormigón, organizando formación, eventos, guías técnicas y promoviendo la sostenibilidad de los productos de hormigón.

Tiene su sede en la calle Diego de León, 47 – Edificio Melior, 28006 Madrid

Datos de contacto: Teléfono: +34 91 323 82 75, web oficial: andece.org

ANDIMAT – Asociación Nacional de Fabricantes de Materiales Aislantes - Representa a fabricantes de aislamiento térmico; promueve calidad, formación e impacto ambiental.

Se encuentra en el Paseo de la Castellana 203, 1º Izda., 28046 Madrid.

Datos de contacto: Teléfono: +34 915 755 426, web: andimat.es

ANFALUM – Asociación Española de Fabricantes de Iluminación - Representa a unos 50 fabricantes de luminarias (interior, exterior, emergencias), fuentes de luz, componentes, regulación y control. Defiende los intereses del sector ante administraciones (CEOE, LightingEurope). Ofrece asesoramiento técnico, formación y apoyo en normativa (Marcado CE, UNE).

Se encuentra en la calle Príncipe de Vergara 74, 5ª planta, 28006 Madrid.

Datos de Contacto: Teléfono: +34 914 353 223, correo electrónico: anfalum@anfalum.com, web: anfalum.com

ASCEM – Asociación para la Construcción de Estructuras Metálicas - Agrupa empresas dedicadas a la fabricación y montaje de estructuras de acero en España, impulsando formación y representación técnica.

Datos de contacto: web: ascem.org

ASEFAVE – Asociación Española de Fabricantes de Fachadas Ligeras y Ventanas - Agrupa fabricantes de ventanas, fachadas ligeras, persianas y componentes.

Se ubica en la calle Príncipe de Vergara, 74, 28006 Madrid.

Datos de contacto: Teléfono: +34 91 561 45 47, web: asefave.org

ATECYR – Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración - Asociación profesional de técnicos y especialistas en climatización, ventilación y frío industrial. Actividades: Formación, normativa, asesoría técnica y participación en AENOR.

Datos de contacto: web: atecyr.org

Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) - Instituto técnico privado dedicado al estudio, asesoramiento, difusión y normalización de conocimientos sobre cemento, hormigón, morteros y otras aplicaciones constructivas, con especial atención a la sostenibilidad y eficiencia energética. Ofrece servicios de formación, consultoría técnica, documentación, desarrollo de normas UNE, y organización de jornadas y congresos.

Tiene su sede en la calle José Abascal, 53 – 1º, 28003 Madrid.

Datos de contacto: Teléfono: +34 91 441 16 88, correo electrónico: info@ieca.es, web oficial: ieca.es