

BENEFICIOS PARA LA SALUD DE LA VIVIENDA PASSIVHAUS

ANÁLISIS INTEGRAL DESDE LAS PERSPECTIVAS
FÍSICA, MENTAL, AMBIENTAL, MICROBIOLÓGICA,
NEUROCIÉNTIFICA Y SOCIOECONÓMICA



BENEFICIOS PARA LA SALUD DE LA VIVIENDA PASSIVHAUS

ANÁLISIS INTEGRAL DESDE LAS PERSPECTIVAS
FÍSICA, MENTAL, AMBIENTAL, MICROBIOLÓGICA,
NEUROCIÉNTIFICA Y SOCIOECONÓMICA

Resumen ejecutivo	4
1. Introducción	5
1.1. Contexto actual: salud, vivienda y calidad de vida	5
1.2. Problemas de la edificación tradicional: una patología sistémica	6
1.3. Justificación del modelo Passivhaus como respuesta integral	8
1.4. Objetivos y alcance del presente informe.....	9
1.5. Metodología	10
1.6. Situación específica del parque edificatorio español.....	11
1.7. Limitaciones del estudio y declaración de conflicto de intereses	11
2. Marco teórico y conceptual.....	11
2.1. Determinantes ambientales de la salud.....	11
2.2. El paradigma del edificio como organismo	12
2.3. Salud y bienestar: definiciones operativas	12
2.4. Principio de precaución y carga de la prueba	13
3. Marco técnico del estándar Passivhaus.....	13
3.1. Historia y evolución del estándar	13
3.2. Los cinco principios fundamentales.....	14
3.3. Parámetros cuantitativos y certificaciones	17
3.4. El PHPP como herramienta de diseño integrado	18
4. Calidad del aire interior (IAQ)	18
4.1. La importancia crítica de la IAQ para la salud.....	18
4.2. Mecanismos de control de la IAQ en Passivhaus	18
4.3. Evidencia científica específica sobre IAQ en Passivhaus.....	21
5. Confort térmico y salud.....	21
5.1. Fundamentos fisiológicos del confort térmico	22
5.2. Temperatura operativa y estabilidad térmica.....	22
5.3. Eliminación de corrientes de aire y superficies frías	23
5.4. Impacto sobre la calidad del sueño	23
5.5. Confort térmico asimétrico y perspectiva de género	24
6. Materiales de construcción y salud	24
6.1. Filosofía de selección de materiales en Passivhaus.....	24
6.2. Categorías de materiales y sus implicaciones sanitarias	25
6.3. Certificaciones de materiales saludables	26
6.4. Impacto acumulativo a largo plazo	26

7. Calidad del agua y entorno interior.....	27
7.1. Sistemas de filtración integrados.....	27
7.2. Iluminación natural y ritmos circadianos.....	28
7.3. Diseño biofílico y neuroarquitectura.....	28
8. Confort acústico y protección frente al ruido	29
8.1. El ruido como factor de riesgo sanitario	29
8.2. Prestaciones acústicas de la envolvente Passivhaus.....	29
8.3. Ruido del sistema de VMC: mito vs. realidad	30
8.4. Impacto en el desarrollo cognitivo infantil.....	30
9. Eficiencia energética y bienestar psicológico	31
9.1. La pobreza energética como determinante de salud.....	31
9.2. Estrés financiero y salud mental.....	31
9.3. Sentido de agencia y coherencia vital.....	31
10. Impacto en poblaciones vulnerables.....	32
10.1. Salud infantil	32
10.2. Salud geriátrica	33
10.3. Mujeres embarazadas y salud perinatal.....	34
10.4. Personas con patologías respiratorias crónicas.....	35
10.5. Personas inmunodeprimidas.....	35
11. Microbioma interior y salud inmunológica.....	36
11.1. El concepto de microbioma del edificio.....	36
11.2. Implicaciones para la salud inmunológica.....	36
11.3. Hipótesis emergente: la vivienda Passivhaus como modulador del microbioma interior	37
12. Passivhaus y resiliencia ante pandemias respiratorias	37
12.1. Lecciones de la pandemia de COVID-19.....	37
12.2. La VMC Passivhaus como infraestructura de resiliencia frente a transmisión aérea.....	38
12.3. Preparación ante futuras pandemias	38
13. Análisis económico-sanitario	39
13.1. Costes sanitarios de la mala calidad del ambiente interior.....	39
13.2. Análisis coste-beneficio de la vivienda Passivhaus.....	40
13.3. Costes sanitarios evitados: metodología de estimación.....	40
13.4. Perspectiva macroeconómica: impacto en el sistema de salud pública.....	41

14. Comparativa con otros estándares de construcción saludable.....	41
14.1. WELL Building Standard.....	41
14.2. BREEAM y LEED.....	42
14.3. Fitwel.....	42
14.4. Tabla comparativa.....	43
15. Hipótesis originales y líneas de investigación futura.....	43
15.1. Hipótesis 1: Impacto epigenético y envejecimiento celular.....	44
15.2. Hipótesis 2: Neuroprotección y reserva cognitiva.....	44
15.3. Hipótesis 3: Programación inmunológica en la primera infancia.....	45
15.4. Hipótesis 4: Efecto sobre el microbioma intestinal vía eje intestino-pulmón.....	45
15.5. Hipótesis 5: Vivienda Passivhaus como intervención de longevidad.....	45
16. Evidencia empírica ampliada.....	46
16.1. Estudios clave y metaanálisis.....	46
16.2. Casos reales documentados.....	47
17. Enfoque holístico de la salud.....	48
17.1. La sinergia de factores: el efecto multiplicador.....	49
17.2. Biohabitabilidad: un concepto integrador.....	50
17.3. La vivienda como determinante social de la salud.....	50
18. Passivhaus en el contexto mediterráneo y español.....	51
18.1. El desafío del clima mediterráneo.....	51
18.2. Adaptaciones técnicas para el clima cálido.....	51
18.3. Estado del Passivhaus en España y Cataluña.....	53
18.4. Implicaciones sanitarias específicas del clima cálido.....	54
19. Salud mental y neurociencia del hábitat.....	55
19.1. La vivienda como determinante de salud mental.....	55
19.2. Mecanismos neurofisiológicos.....	56
19.3. Depresión y ansiedad.....	57
19.4. Rendimiento cognitivo y teletrabajo.....	58
19.5. Percepción de seguridad y control ambiental.....	58
19.6. Impacto en niños: neurodesarrollo y regulación emocional.....	58
20. Cambio climático, olas de calor y resiliencia habitacional.....	59
20.1. Escenarios climáticos para la península ibérica.....	59
20.2. La vivienda como refugio climático.....	59
20.3. Isla de calor urbana y edificación eficiente.....	60
20.4. Resiliencia energética y autonomía.....	60
20.5. Calidad del aire exterior y episodios de contaminación.....	61

21. Marco normativo y político.....	61
21.1. Directivas europeas.....	61
21.2. Normativa española	62
21.3. Normativa e incentivos en Cataluña	63
21.4. Hacia una integración de salud y política de vivienda.....	64
21.5. Materiales específicos del contexto mediterráneo.....	65
21.6. Paisaje sonoro interior: más allá del silencio.....	65
21.7. Independencia energética y autoconsumo fotovoltaico	66
21.8. La economía del bienestar aplicada a la vivienda	66
21.9. Personas con sensibilidad química múltiple (SQM)	67
21.10. Personas con enfermedades cardiovasculares	67
21.11. Diversidad microbiana y sistema inmunitario: un equilibrio delicado.....	67
21.12. Ventilación, aerosoles y modelos de transmisión	68
21.13. Costes de las pandemias y valor de la prevención.....	69
22. Conclusiones	69
22.1. Síntesis de hallazgos.....	69
22.2. Síntesis cuantitativa de beneficios.....	70
22.3. Valor diferencial de la vivienda pasiva.....	71
22.4. Recomendaciones	71
22.5. Propuesta de investigación: Estudio PASSIVHEALTH	73
22.6. Visión de futuro: hacia el edificio salutogénico.....	74
Referencias bibliográficas	74
Glosario técnico	80
Anexos técnicos.....	84
Anexo I: Parámetros comparativos Passivhaus vs. CTE (España).....	84
Anexo II: Niveles de referencia de contaminantes interiores	85
Anexo III: Protocolo de medición de IAQ post-ocupación.....	85
Anexo IV: Proyectos Passivhaus de referencia en España y Cataluña.....	86
Anexo V: Mensajes clave para difusión comercial	87

RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe analiza, con rigor científico y enfoque multidisciplinar, la relación entre el estándar constructivo Passivhaus y la salud humana. Tras más de tres décadas de implementación y monitorización en el orden de varias decenas de miles de unidades certificadas y un volumen sustancialmente mayor de proyectos diseñados según los principios del Passivhaus Institut en más de 40 países (Passivhaus Institut, 2024; PEP, 2024), la evidencia acumulada permite afirmar que la vivienda pasiva constituye uno de los estándares constructivos con mayor impacto positivo documentado sobre la salud de sus ocupantes.

Los cinco principios técnicos del estándar —superaislamiento, carpinterías de altas prestaciones, ausencia de puentes térmicos, hermeticidad al aire y ventilación mecánica con recuperación de calor (VMC)— generan, como consecuencia intrínseca de su aplicación, un entorno interior cualitativamente superior al de la construcción convencional en todas las dimensiones relevantes para la salud: calidad del aire, confort térmico, aislamiento acústico, control de la humedad y reducción de contaminantes químicos y biológicos.

Los hallazgos principales de este informe son: (a) la VMC con filtración F7+ reduce las concentraciones interiores de PM_{2.5} entre un 60-80 % (Langer et al., 2015; Bekö et al., 2010) y los niveles de CO₂ se mantienen permanentemente por debajo de 1.000 ppm, condición a la que la literatura científica asocia, mediante modelos de fracción atribuible, reducciones del orden del 20-40 % en síntomas asmáticos (Mendell et al., 2011) y del 11-23 % en deterioro cognitivo — esta última cifra extrapolada de estudios en oficinas (Allen et al., 2016; MacNaughton et al., 2015), pendiente de replicación residencial específica—; (b) la estabilidad térmica ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) y la eliminación de corrientes de aire se asocian a mejoras subjetivas de la calidad del sueño en una proporción mayoritaria de ocupantes en encuestas escandinavas (Zalejska-Jonsson, 2014; CEPHEUS, 2001); (c) el aislamiento acústico de 40-50 dB(A) reduce la exposición a ruido nocturno por debajo de 25 dB(A), por debajo del umbral de afectación cardiovascular descrito por la OMS (Basner et al., 2014); (d) el ahorro energético del 75-90 % protege frente a la pobreza energética y al estrés financiero asociado (Liddell & Morris, 2010; Thomson et al., 2013).

El informe presenta además, en el capítulo 15 y debidamente etiquetadas como tales, cinco hipótesis originales sobre el impacto de la vivienda Passivhaus en el microbioma interior y la salud inmunológica, su potencial efecto sobre mecanismos epigenéticos de envejecimiento, su papel como infraestructura de resiliencia ante pandemias respiratorias y su influencia en el neurodesarrollo infantil.

Estas hipótesis se proponen como líneas de investigación futura, no como hallazgos consolidados. Se incluye, por último, un análisis coste-beneficio sanitario que —cuando se internalizan los costes sanitarios evitados con los supuestos explicitados en el capítulo 13— sostiene un retorno positivo de la inversión.

Conclusión: la vivienda Passivhaus no es simplemente un edificio eficiente; es un dispositivo de salud pública cuya generalización podría reducir significativamente la carga de enfermedad atribuible al entorno construido.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto actual: salud, vivienda y calidad de vida

La relación entre el entorno construido y la salud humana constituye uno de los campos de investigación más relevantes y transversales del siglo XXI. Según datos de la Organización Mundial de la Salud y estudios epidemiológicos a gran escala, las personas en países industrializados pasan entre el 80% y el 93% de su tiempo en espacios interiores, cifra documentada por Klepeis et al. en el National Human Activity Pattern Survey (NHAPS)¹ y confirmada por Schweizer et al. para poblaciones europeas.²

Esta realidad transforma la calidad del ambiente interior en un determinante crítico —y frecuentemente subestimado— de la salud pública. Las enfermedades respiratorias crónicas afectan a más de 500 millones de personas en el mundo; las alergias se han triplicado en Europa en las últimas cuatro décadas; los trastornos del sueño afectan al 30-45% de la población adulta occidental; y el estrés crónico se ha convertido en la pandemia silenciosa del siglo XXI. Una proporción significativa de esta morbilidad puede atribuirse directamente a las condiciones de los edificios donde vivimos, dormimos y trabajamos.

El concepto de «salud ambiental» ha evolucionado considerablemente desde los primeros estudios de higienismo urbano del siglo XIX. Hoy sabemos que la salud no se determina exclusivamente por la genética o el acceso a servicios sanitarios, sino que los factores ambientales —calidad del aire, temperatura, humedad, ruido, iluminación, exposición a tóxicos— explican entre el 20% y el 30% de la carga global de enfermedad. La vivienda, como microentorno donde se concentra la mayor parte del tiempo de exposición, emerge como un vector de salud de primera magnitud.

En el contexto europeo, la Directiva de Eficiencia Energética de Edificios (EPBD, revisada en 2024) y las sucesivas normativas nacionales han impulsado la transición hacia edificios de consumo de energía casi nulo (NZEB, Nearly Zero Energy Buildings).

¹Klepeis, N.E. et al. (2001). The National Human Activity Pattern Survey. *J. Exposure Science*, 11(3), 231-252.

²Schweizer, C. et al. (2007). Indoor time–microenvironment–activity patterns in seven regions of Europe. *J. Exposure Science*, 17(2), 170-181.

Sin embargo, la eficiencia energética por sí sola no garantiza la calidad del ambiente interior; de hecho, la historia reciente de la construcción demuestra que ciertas estrategias de ahorro energético —como la reducción de la ventilación o el sellado de edificios sin provisión de aire fresco— han generado el fenómeno del «síndrome del edificio enfermo» (Sick Building Syndrome, SBS), ampliamente documentado desde los años 80.³

Es precisamente en la intersección entre eficiencia energética y calidad del ambiente interior donde el estándar Passivhaus ofrece una propuesta singular e integradora: un modelo constructivo que reduce drásticamente el consumo energético y, simultáneamente —por diseño, no como efecto colateral—, mejora sustancialmente las condiciones de habitabilidad y salud de sus ocupantes. Esta doble virtualidad es lo que convierte al Passivhaus en un objeto de estudio científico de extraordinario interés y en una herramienta de salud pública de primer orden.

1.2. Problemas de la edificación tradicional: una patología sistémica

La edificación convencional presenta una serie de deficiencias que no son excepciones o patologías puntuales, sino características inherentes a los métodos constructivos dominantes durante las últimas décadas. Estas deficiencias configuran un cuadro sistémico de impacto negativo sobre la salud:

1.2.1. Ventilación inadecuada y contaminación interior

La construcción convencional depende casi exclusivamente de la ventilación natural (apertura manual de ventanas) para la renovación del aire interior. Este sistema presenta limitaciones fundamentales: depende del comportamiento del ocupante, de las condiciones climáticas exteriores, del ruido ambiental y de la contaminación exterior. En la práctica, numerosos estudios demuestran que las tasas reales de ventilación en viviendas convencionales son insuficientes durante la mayor parte del año, especialmente en invierno y verano, cuando las ventanas permanecen cerradas por razones térmicas. Seppänen et al. (1999) documentaron que tasas de ventilación inferiores a 10 L/s por persona se asocian de forma estadísticamente significativa con un incremento del 30-200% en los síntomas de SBS.⁴

³Fisk, W.J. et al. (2011). Association of ventilation system type with SBS symptoms. *Indoor Air*, 21(2), 91-101.

⁴Seppänen, O.A. et al. (1999). Association of ventilation rates and CO₂ with health. *Indoor Air*, 9(4), 226-252.

Las consecuencias de esta ventilación deficiente son múltiples: acumulación de CO₂ hasta niveles de 2.000-5.000 ppm en dormitorios nocturnos (frente al límite recomendado de 1.000 ppm), concentración progresiva de compuestos orgánicos volátiles (COVs) emitidos por materiales, mobiliario y productos de limpieza, proliferación de bioaerosoles (esporas, bacterias, virus) y elevación de la humedad relativa por encima del rango óptimo (40-60%), creando condiciones propicias para el desarrollo de mohos y ácaros.

1.2.2. Puentes térmicos, condensaciones y patógenos

Los puentes térmicos —discontinuidades en la envolvente térmica causadas por encuentros constructivos deficientes, materiales de alta conductividad o falta de aislamiento— son prácticamente inevitables en la construcción convencional. Estos puntos fríos reducen la temperatura superficial interior por debajo del punto de rocío, generando condensación y creando el sustrato ideal para el desarrollo de colonias fúngicas (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Stachybotrys*). La exposición crónica a mohos en interiores se asocia, según la revisión sistemática de Mendell et al. (2011), con un incremento del 30-50% en el riesgo de síntomas respiratorios, un 40% más de riesgo de desarrollo de asma en niños, y exacerbación de patologías preexistentes.⁵

Las guías de la OMS sobre calidad del aire interior (2009) son inequívocas: la presencia visible de moho o la detección de olor a humedad en un edificio constituyen indicadores de riesgo sanitario que exigen intervención. Sin embargo, en el parque edificatorio europeo, se estima que entre el 10% y el 50% de las viviendas presentan problemas de humedad y moho, con prevalencias particularmente elevadas en el sur de Europa y en viviendas de alquiler social.

1.2.3. Infiltraciones incontroladas y contaminantes exteriores

Las envolventes de los edificios convencionales presentan permeabilidades al aire típicas de 4 a 15 renovaciones/hora (n50), lo que implica un flujo constante e incontrolado de aire exterior a través de grietas, juntas, cajas de persiana, encuentros constructivos y otras vías de fuga. Este aire de infiltración no pasa por ningún sistema de filtración, por lo que introduce directamente en el interior todos los contaminantes del aire exterior: partículas finas (PM2.5, PM10), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃), polen, esporas y otros bioaerosoles.

⁵Mendell, M.J. et al. (2011). Respiratory and allergic health effects of dampness, mold. *Environmental Health Perspectives*, 119(6), 748-756.

En zonas urbanas con alta densidad de tráfico, las concentraciones interiores de NO₂ y PM2.5 en viviendas convencionales pueden alcanzar el 60-90% de los niveles exteriores, valores que superan con frecuencia las directrices actualizadas de la OMS (2021), que establecen un límite anual de 5 µg/m³ para PM2.5 y 10 µg/m³ para NO₂.⁶

1.2.4. Asimetrías térmicas y estrés termorregulador

Las diferencias de temperatura entre superficies interiores (paredes, ventanas, suelos) y el aire ambiente generan gradientes térmicos que el cuerpo humano percibe como disconfort, incluso cuando la temperatura del aire se encuentra dentro del rango nominal de confort (20-25°C). En edificios convencionales, la temperatura superficial de una ventana de vidrio simple puede ser 8-12°C inferior a la del aire, creando corrientes convectivas frías que se perciben como «corrientes de aire» y que obligan al sistema termorregulador a trabajar de forma asimétrica.

Este estrés térmico crónico, a menudo subconsciente, se asocia con vasoconstricción periférica, tensión muscular refleja, fragmentación del sueño y deterioro de la función inmunitaria.

1.2.5. Materiales de construcción con emisiones nocivas

La industria de la construcción convencional emplea de forma generalizada materiales con contenidos significativos de sustancias volátiles perjudiciales para la salud. Los tableros aglomerados y contrachapados utilizan resinas de urea-formaldehído que emiten formaldehído durante años (clasificado como cancerígeno del Grupo 1 por la IARC).

Las pinturas plásticas convencionales emiten xileno, tolueno y otros disolventes. Los suelos de PVC flexible contienen plastificantes ftalatos con actividad endocrina disruptora. Los sellantes de poliuretano emiten isocianatos. Las espumas de aislamiento XPS/EPS pueden emitir estireno. La construcción convencional acepta estos materiales porque su coste es inferior al de las alternativas, transfiriendo el coste sanitario a los ocupantes y al sistema de salud pública.

⁶WHO (2021). WHO global air quality guidelines. World Health Organization.

1.3. Justificación del modelo Passivhaus como respuesta integral

El estándar Passivhaus, desarrollado por el Dr. Wolfgang Feist y el Prof. Bo Adamson en 1988 y formalizado tras la construcción del primer edificio Passivhaus en Darmstadt-Kranichstein en 1991, nació con el objetivo de crear edificios de consumo energético mínimo sin sacrificar el confort interior. Lo que la evidencia científica acumulada durante más de tres décadas ha demostrado es que los principios técnicos que hacen posible esta eficiencia energética extraordinaria —hermeticidad, superaislamiento, eliminación de puentes térmicos y ventilación mecánica controlada— producen, como consecuencia inherente e indisoluble, un entorno interior cualitativamente superior para la salud humana.⁷

Esta convergencia entre eficiencia energética y salud no es casual: responde a una lógica física profunda. Un edificio que minimiza las pérdidas energéticas necesita, por definición, una envolvente continua sin discontinuidades (eliminando puentes térmicos y condensaciones), una estanqueidad al aire rigurosa (eliminando infiltraciones incontroladas) y un sistema de ventilación que recupere la energía del aire de extracción (proporcionando ventilación constante y filtrada). Cada requisito energético se traduce en un beneficio sanitario.

1.4. Objetivos y alcance del presente informe

Este informe tiene como objetivo principal analizar de forma exhaustiva, con rigor científico y enfoque multidisciplinar, cómo la vivienda Passivhaus impacta positivamente en la salud humana. Los objetivos específicos incluyen:

- Documentar los mecanismos técnicos mediante los cuales los principios Passivhaus generan beneficios para la salud, apoyados en evidencia científica publicada en revistas indexadas.
- Cuantificar, cuando la evidencia lo permita, la magnitud de los beneficios sanitarios en comparación con la edificación convencional.
- Analizar el impacto diferencial en poblaciones vulnerables: niños, ancianos, personas con patologías crónicas y mujeres embarazadas.
- Explorar hipótesis originales sobre dimensiones emergentes de la relación vivienda-salud: microbioma interior, epigenética, neurociencia del hábitat y longevidad.
- Evaluar el papel de la vivienda Passivhaus como infraestructura de resiliencia ante pandemias respiratorias y cambio climático.

⁷Feist, W. (2012). Passive House Planning Package (PHPP). Passive House Institute, Darmstadt.

- Realizar un análisis coste-beneficio que integre los costes sanitarios evitados, demostrando el retorno de inversión desde una perspectiva de economía de la salud.
- Comparar el enfoque Passivhaus con otros estándares de construcción saludable (WELL, BREEAM, LEED, Fitwel) en términos de eficacia sanitaria.

1.5. Metodología

El presente informe se fundamenta en una revisión sistemática de la literatura científica disponible en las bases de datos PubMed, Scopus, Web of Science y Google Scholar, complementada con informes técnicos del Passivhaus Institut, publicaciones de la OMS, directrices europeas y estudios de caso documentados. Se aplicó una estrategia de búsqueda inspirada en la metodología PRISMA simplificada: ecuación principal de búsqueda combinando los descriptores «Passive house / Passivhaus», «indoor air quality», «health», «ventilation», «mould / dampness», «thermal comfort» y «cognitive performance», con filtros de fecha 1995-2025, idioma inglés/español/alemán/francés y tipo de publicación (preferencia por revisiones sistemáticas, metaanálisis y estudios de cohortes). Se priorizaron, por orden, metaanálisis y revisiones Cochrane, revisiones sistemáticas, ensayos controlados y estudios de cohortes con grupo de control, incluyendo estudios observacionales y de caso solo cuando aportaban información relevante no disponible en diseños de mayor nivel. Para la evaluación de la calidad de la evidencia se ha tomado como referencia el sistema GRADE; en este informe la calidad se reporta de forma cualitativa (Alta / Moderada / Baja / Muy baja) en el capítulo 16. Las hipótesis originales presentadas en el capítulo 15 se identifican expresamente como tales y se acompañan de propuestas de validación experimental.

Las hipótesis originales presentadas en el capítulo 15 se formulan sobre la base de la evidencia indirecta disponible y se presentan explícitamente como propuestas de investigación futura, diferenciándolas claramente de los hallazgos ya consolidados. PAPIK Group declara que es promotora inmobiliaria con interés comercial directo en la edificación bajo estándar Passivhaus; este informe se publica con esa transparencia para que el lector pueda contextualizarlo, y todas las afirmaciones cuantitativas remiten a literatura científica primaria o se etiquetan explícitamente como estimación de los autores.

1.6. Situación específica del parque edificatorio español

España presenta particularidades que hacen especialmente urgente la adopción de estándares constructivos de alta calidad. El parque residencial cuenta con aproximadamente 25,7 millones de viviendas, de las cuales el 55% fueron construidas antes de la primera normativa térmica (NBE-CT-79, 1979) y el 80% antes del CTE (2006). La calificación energética media del parque existente se sitúa en las letras E-G, las más bajas de la escala, indicando una envolvente térmica gravemente deficiente.

Las consecuencias se manifiestan en datos alarmantes. El exceso de mortalidad invernal en España alcanza el 20-30%, una de las tasas más altas de Europa y paradójicamente superior a la de países con inviernos mucho más rigurosos (Suecia: 10%, Finlandia: 12%). Esta «paradoja española» se explica por la combinación de viviendas mal aisladas, calefacción insuficiente o intermitente, y hábitos culturales que normalizan el frío interior («en España hace frío dentro de casa»). La pobreza energética afecta al 10-16% de los hogares, con prevalencias especialmente elevadas en Cataluña (11%), Andalucía (18%) y Extremadura (21%).

En verano, la situación es igualmente preocupante. La mortalidad atribuible al calor en España en 2022 superó las 4.700 personas, una cifra que las proyecciones climáticas prevén que se incremente un 100-200% antes de 2050. Las viviendas sin aislamiento ni protección solar, habituales en los barrios populares de las grandes ciudades, se convierten en trampas de calor donde las temperaturas interiores superan los 35°C durante días consecutivos, poniendo en riesgo la vida de las personas mayores que viven solas.

1.7. Limitaciones del estudio y declaración de conflicto de intereses

Este informe es una revisión narrativa con vocación sistemática, no una revisión sistemática Cochrane stricto sensu. Sus conclusiones deben interpretarse a la luz de las siguientes limitaciones explícitas, que el lector debe tener presentes en todo momento.

Primero, la mayor parte de la evidencia disponible procede de estudios realizados en climas centroeuropeos y escandinavos; la literatura específica sobre Passivhaus en clima mediterráneo es todavía escasa, y los estudios longitudinales españoles son pocos. Las inferencias para clima cálido se apoyan en una combinación de evidencia general sobre IAQ y confort térmico (extensible a Passivhaus por consistencia mecanicista) y en estudios técnicos específicos como Schnieders et al. (2020). Segundo, varios de los efectos cuantitativos descritos —en especial los relativos a cognición y sueño— se basan en extrapolaciones de estudios realizados en oficinas (Allen et al., 2016; MacNaughton et al., 2015) o en encuestas subjetivas (Zalejska-Jonsson, 2014; CEPHEUS, 2001), pendientes de replicación específica residencial mediante medidas objetivas (polisomnografía, pruebas neuropsicológicas) y diseños controlados.

Tercero, los modelos de Wells-Riley aplicados a transmisión aérea de patógenos y los modelos de fracción atribuible aplicados a salud respiratoria son herramientas teóricas reconocidas, pero su aplicación a casos concretos arroja estimaciones, no medidas. Cuarto, las cifras macroeconómicas (capítulo 13) son estimaciones derivadas que incluyen supuestos explicitados; cualquier modificación de los supuestos modificaría sustancialmente el resultado. Quinto, las hipótesis presentadas en el capítulo 15 son, por construcción, propuestas de investigación: la solidez de la cadena causal —por ejemplo, «Passivhaus → mejor IAQ → menor inflamación → longevidad incrementada™»— descansa en eslabones individualmente robustos pero no integralmente medidos. Sexto, los casos reales documentados en el capítulo 16 (Bahnstadt, EnerPHit Innsbruck, MONITOR, escuelas Passivhaus) son estudios de caso ecológicos: aportan plausibilidad y dirección, no causalidad estricta.

Declaración de conflicto de intereses. PAPIK Real Estate Group, S.L.U. es promotora inmobiliaria con interés comercial directo en la edificación bajo estándar Passivhaus. El Departamento de I+D que firma este informe asume esta condición de manera explícita y se ha esforzado por aplicar tres salvaguardas: (i) toda afirmación cuantitativa con repercusión comercial remite a literatura científica primaria, o se etiqueta expresamente como estimación de los autores; (ii) las hipótesis y especulaciones se identifican como tales en el cuerpo del texto y se aíslan en el capítulo 15; (iii) las limitaciones de la evidencia se reportan en este apartado. PAPIK Group recomienda al lector contrastar las cifras críticas con las fuentes citadas y, en caso de discrepancia, prevalecer las fuentes primarias sobre el contenido del informe.

2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. Determinantes ambientales de la salud

El modelo ecológico de la salud, desarrollado a partir de los trabajos seminales de Dahlgren y Whitehead (1991), sitúa el entorno físico como uno de los determinantes fundamentales del estado de salud de las poblaciones. La vivienda constituye el microentorno ambiental de mayor exposición temporal, superando ampliamente al lugar de trabajo, los espacios de transporte y los espacios exteriores. Esta prolongada exposición implica que incluso diferencias modestas en la calidad del ambiente interior pueden generar efectos acumulativos significativos sobre la salud a lo largo de la vida.

La relación dosis-respuesta entre exposición ambiental y efecto sanitario es un principio fundamental de la toxicología ambiental. En el contexto de la vivienda, este principio se manifiesta a través de múltiples vías de exposición: inhalación (contaminantes atmosféricos, bioaerosoles), contacto dérmico (materiales, humedad), ingestión (agua, polvo doméstico) y percepción sensorial (temperatura, ruido, iluminación). La vivienda Passivhaus interviene favorablemente en todas estas vías.

2.2. El paradigma del edificio como organismo

Una analogía conceptual fructífera para comprender el enfoque Passivhaus es la del edificio como organismo vivo. Al igual que un organismo biológico, un edificio Passivhaus posee una «piel» (la envolvente térmica continua) que lo protege del medio externo, un sistema «respiratorio» (la VMC con recuperación de calor) que garantiza el intercambio gaseoso controlado, y un sistema de «homeostasis» (el equilibrio térmico-higrométrico) que mantiene las condiciones interiores estables frente a las fluctuaciones externas.

Esta analogía no es meramente retórica: refleja una realidad física. Un edificio convencional, con su envolvente porosa y su dependencia de la ventilación natural, funciona como un organismo de «sangre fría» (poiquiloterma), cuyas condiciones interiores fluctúan en función del medio externo. Un edificio Passivhaus, gracias a su envolvente continua y su sistema de ventilación controlada, funciona como un organismo de «sangre caliente» (homeoterma), capaz de mantener condiciones interiores estables independientemente del clima exterior. Esta homeostasis ambiental es precisamente lo que el cuerpo humano necesita para funcionar de forma óptima.

2.3. Salud y bienestar: definiciones operativas

A efectos del presente informe, adoptamos la definición de salud de la OMS: «un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no solamente la ausencia de afecciones o enfermedades». Esta definición amplia nos permite analizar los efectos de la vivienda Passivhaus no solo en términos de reducción de patologías (enfoque patogénico), sino también en términos de promoción activa del bienestar (enfoque salutogénico, según el concepto desarrollado por Aaron Antonovsky).

El concepto de «biohabitabilidad» —la capacidad de un espacio construido para promover activamente la salud y el bienestar de sus ocupantes— constituye el marco integrativo de este análisis. La biohabitabilidad trasciende la mera ausencia de patologías para abrazar la optimización del entorno como vector de salud positiva.

2.4. Principio de precaución y carga de la prueba

Un aspecto fundamental del enfoque Passivhaus en relación con la salud es su alineamiento implícito con el principio de precaución. La construcción convencional acepta la presencia de contaminantes, condensaciones y fluctuaciones térmicas como «normales», exigiendo evidencia de daño antes de actuar. El enfoque Passivhaus invierte esta lógica: al eliminar proactivamente las fuentes de riesgo (filtrando el aire, eliminando puentes térmicos, controlando la humedad), previene los daños antes de que se manifiesten. Esta filosofía preventiva es coherente con los principios más avanzados de la salud pública contemporánea.

3. MARCO TÉCNICO DEL ESTÁNDAR PASSIVHAUS

3.1. Historia y evolución del estándar

Los orígenes del estándar Passivhaus se remontan a las conversaciones entre el físico alemán Wolfgang Feist y el profesor sueco Bo Adamson en mayo de 1988. Ambos investigadores, motivados por la crisis energética de los años 70 y los avances en física de la construcción, se propusieron definir un estándar constructivo que redujera la demanda de calefacción a niveles tan bajos que un sistema de distribución convencional de calor (radiadores, suelo radiante) resultara innecesario, bastando el postcalentamiento del aire de ventilación.

El primer edificio Passivhaus —un bloque de cuatro viviendas en Darmstadt-Kranichstein— fue construido en 1991. Monitorizado de forma continuada por el Passivhaus Institut desde su ocupación, ha demostrado un consumo de calefacción que cumple holgadamente el criterio Passivhaus de 15 kWh/(m²·a) treinta y cinco años después de su construcción (Feist et al., 2017; Passivhaus Institut, 2024), confirmando la viabilidad y la durabilidad del concepto. El Passivhaus Institut fue fundado en 1996 para formalizar, investigar y certificar el estándar.

Desde entonces, el estándar ha evolucionado significativamente. En 2015 se introdujeron las categorías Passivhaus Classic, Plus y Premium, que integran la generación de energía renovable. El estándar EnerPHit proporciona criterios adaptados para la rehabilitación de edificios existentes. A fecha de 2026, se han certificado más de 65.000 unidades Passivhaus en más de 40 países, desde climas árticos (Suecia, Noruega) hasta climas tropicales (México, Filipinas), demostrando la universalidad del enfoque.

3.2. Los cinco principios fundamentales

3.2.1. Superaislamiento térmico de la envolvente

La envolvente térmica de un edificio Passivhaus presenta valores de transmitancia térmica (valor U) entre 0,10 y 0,15 W/(m²·K) en muros, cubiertas y soleras, lo que equivale a espesores de aislamiento de 25 a 40 cm dependiendo del material utilizado. Para contextualizar, un muro convencional en España según el Código Técnico de la Edificación (CTE) presenta valores U de 0,35-0,60 W/(m²·K), es decir, entre 3 y 5 veces más transmisivos.

La consecuencia directa de este superaislamiento es doble. Primero, las temperaturas superficiales interiores se mantienen siempre próximas a la temperatura del aire (diferencia inferior a 3°C), eliminando el discomfort radiante y la sensación de «paredes frías». Segundo, al mantenerse siempre por encima del punto de rocío, se elimina virtualmente el riesgo de condensación superficial, privando a los mohos del sustrato húmedo que necesitan para proliferar. Este segundo efecto tiene implicaciones sanitarias profundas, dado el papel causal de los mohos en el desarrollo y exacerbación del asma, especialmente en población infantil.

3.2.2. Carpinterías de altas prestaciones

Las ventanas constituyen el elemento constructivo con mayor transmitancia térmica de la envolvente, y por tanto el punto más crítico para el confort y la salud. Las carpinterías Passivhaus utilizan vidrios triples con cámaras rellenas de argón o criptón y capas de baja emisividad (low-e), alcanzando valores U_g de 0,5-0,7 W/(m²·K). Los marcos, generalmente de PVC multicelda, madera o compuestos, presentan valores U_f de 0,7-1,0 W/(m²·K). El valor U de instalación (incluyendo marco, vidrio y unión con el muro) debe ser inferior a 0,85 W/(m²·K).

La consecuencia para la salud es directa: una ventana con U_w de 0,80 W/(m²·K) mantiene, en las condiciones más desfavorables de invierno (-10°C exterior, 20°C interior), una temperatura superficial interior del vidrio superior a 17°C. Una ventana convencional de vidrio doble (U_w 2,5-3,0 W/(m²·K)) alcanza solo 6-9°C en su superficie interior en las mismas condiciones, generando corrientes convectivas frías descendentes que son percibidas como corrientes de aire y que fragmentan el sueño cuando la cama se sitúa cerca de la ventana.

3.2.3. Eliminación de puentes térmicos

El estándar Passivhaus exige que todos los puentes térmicos lineales presenten valores de transmitancia térmica lineal (ψ) inferiores a 0,01 W/(m·K), lo que en la práctica equivale a su eliminación. Esto se logra mediante el principio de la «envolvente continua»: el aislamiento térmico debe rodear el edificio sin interrupciones, como una segunda piel. Los encuentros constructivos críticos —muro-forjado, muro-cubierta, jambas y antepechos de ventana, cimentación— se resuelven mediante diseños específicos que garantizan la continuidad del plano de aislamiento.

La eliminación de puentes térmicos tiene implicaciones sanitarias que van más allá de la prevención de condensaciones. Los puentes térmicos son responsables del 20-30% de las pérdidas energéticas en edificios convencionales; al eliminarlos, se reduce la demanda de calefacción, se homogeneiza la temperatura interior y se elimina la posibilidad de zonas frías localizadas que generen discomfort asimétrico.

3.2.4. Hermeticidad al aire

La estanqueidad al aire es, posiblemente, el principio más distintivo y crítico del estándar Passivhaus, y también el que mayor impacto directo tiene sobre la salud. Se exige un resultado en el ensayo de presurión (Blower Door Test, conforme a EN 13829/ISO 9972) de $n_{50} \leq 0,6$ renovaciones/hora a una diferencia de presión de 50 Pascal. Para contextualizar: un edificio convencional nuevo en España presenta típicamente valores n_{50} entre 4 y 10 ren/h, y un edificio antiguo puede superar las 15 ren/h.

Esta hermeticidad, que supone una reducción de las infiltraciones de aire de entre un 85% y un 96% respecto a la construcción convencional, tiene un triple beneficio sanitario: (1) impide la entrada no controlada de contaminantes exteriores (partículas, gases, polen, ruido), garantizando que todo el aire que entra al edificio pase por los filtros de la VMC; (2) evita las corrientes de aire frío por infiltración, que causan discomfort local y se asocian con patologías musculoesqueléticas; y (3) permite que el sistema de ventilación mecánica funcione de forma óptima, ya que su eficacia depende de que los caudales de aire sigan las trayectorias diseñadas (de locales secos a locales húmedos) sin cortocircuitos.

3.2.5. Ventilación mecánica con recuperación de calor (VMC-HR)

La VMC con recuperación de calor es el «pulmón» del edificio Passivhaus y, desde la perspectiva de la salud, el componente más transformador. El sistema opera de la siguiente manera:

- Captación: el aire exterior se toma a través de una rejilla situada en fachada o cubierta, preferiblemente en una orientación que minimice la captación de contaminantes (opuesta al tráfico, alejada de chimeneas y extracciones).
- Prefiltración: un filtro grueso (G4/ISO Coarse $\geq 50\%$) retiene insectos, hojas, pelusas y partículas gruesas, protegiendo al intercambiador.

- Filtración fina: un filtro de alta eficiencia (F7/ISO ePM1 $\geq 50\%$, o superior F9/ISO ePM1 $\geq 80\%$ en zonas de alta contaminación) captura la mayoría del polen (10-100 μm), esporas de moho (2-20 μm), PM10 y una fracción significativa de PM2.5.
- Intercambio térmico: el aire filtrado pasa por un intercambiador de calor de contraflujo (o entálpico en climas húmedos) donde absorbe el 75-95% de la energía térmica del aire de extracción, sin que ambas corrientes se mezclen físicamente.
- Distribución: el aire templado y filtrado se introduce en los locales secos (dormitorios, salón, despacho) a través de conductos con difusores de baja velocidad (< 2 m/s en boca).
- Extracción: el aire viciado, cargado de CO_2 , humedad, COVs y olores, se extrae de los locales húmedos (cocina, baños, aseo) y se conduce al intercambiador para ceder su energía térmica antes de ser expulsado al exterior.

El caudal de diseño típico es de $30 \text{ m}^3/\text{h}$ por persona, conforme a la categoría II de la norma EN 16798-1 (anteriormente EN 15251). Este caudal garantiza concentraciones de CO_2 inferiores a 1.000 ppm en régimen estacionario, valor que la literatura científica identifica como umbral para el mantenimiento óptimo de la función cognitiva.

3.3. Parámetros cuantitativos y certificaciones

El Passivhaus Institut establece criterios cuantitativos rigurosos cuyo cumplimiento debe verificarse mediante cálculo con la herramienta PHPP (Passive House Planning Package) y ensayos in situ. La siguiente tabla resume los parámetros principales y su relación con la salud:

Parámetro	Valor exigido	Mecanismo	Beneficio sanitario
Demanda de calefacción	$\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	Superaislamiento + hermeticidad	Temperatura estable, sin estrés térmico
Demanda de refrigeración	$\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	Protección solar + ventilación nocturna	Prevención sobrecalentamiento
Hermeticidad n50	$\leq 0,6 \text{ ren/h}$	Barrera continua al aire	Control total de contaminantes exteriores
Eficiencia VMC-HR	$\geq 75\%$	Intercambiador contraflujo	Aire fresco filtrado 24/7
Carga de calefacción	$\leq 10 \text{ W}/\text{m}^2$	Baja demanda punta	Calefacción vía aire de ventilación
Energía primaria renovable	$\leq 60 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (Classic)	Eficiencia + renovables	Reducción huella ambiental y costes

3.4 EL PHPP como herramienta de diseño integrado

El Passive House Planning Package (PHPP) es una herramienta de cálculo basada en hojas de cálculo que permite al proyectista modelar el comportamiento energético e higrotérmico del edificio con una precisión validada empíricamente. A diferencia de las herramientas de simulación energética convencionales, el PHPP obliga al diseñador a considerar de forma explícita todos los puentes térmicos, las infiltraciones, la recuperación de calor, las ganancias solares y las cargas internas, generando un modelo integral que refleja fielmente el comportamiento real del edificio. Esta precisión de modelado tiene una consecuencia directa para la salud: garantiza que los parámetros de confort y calidad del aire previstos en el diseño se cumplan efectivamente en la realidad construida.⁸

4.1. La importancia crítica de la IAQ para la salud

La calidad del aire interior (Indoor Air Quality, IAQ) es considerada por la OMS como uno de los diez principales factores de riesgo ambiental para la salud humana. Dado que respiramos aproximadamente 15.000 litros de aire al día y pasamos el 85-93% del tiempo en espacios cerrados, la composición del aire interior tiene un impacto acumulativo sobre la salud que supera con frecuencia al de la contaminación atmosférica exterior. El proyecto europeo HEALTHVENT estimó que la mejora de la ventilación en edificios residenciales podría prevenir anualmente en Europa 38.000 DALYs (años de vida ajustados por discapacidad) perdidos, una cifra que pone de manifiesto la magnitud del problema.⁹

4.2. Mecanismos de control de la IAQ en Passivhaus

4.2.1. Filtración de partículas finas (PM2.5 y PM10)

Las partículas finas en suspensión constituyen el contaminante atmosférico con mayor impacto sanitario documentado. La OMS estima que la contaminación por partículas causa 4,2 millones de muertes prematuras anuales a nivel global. Las PM2.5 (partículas de diámetro aerodinámico inferior a 2,5 µm) son especialmente peligrosas porque penetran hasta los alveolos pulmonares y pueden traslocar al torrente sanguíneo, desencadenando respuestas inflamatorias sistémicas que afectan al sistema cardiovascular, nervioso y metabólico.¹⁰

Los sistemas de filtración de la VMC Passivhaus, equipados con filtros F7 (eficiencia ≥50% para partículas de 0,4 µm) o superiores (F9, eficiencia ≥80%), reducen la ratio de infiltración interior/exterior (I/O ratio) de PM2.5 a valores de 0,2-0,4, frente a ratios de 0,6-0,9 en viviendas convencionales. En términos absolutos, esto significa concentraciones interiores de PM2.5 de 3-8 µg/m³ en viviendas Passivhaus, frente a 10-25 µg/m³ en viviendas convencionales en la misma localización. Bekö et al. (2010) demostraron que la filtración mecánica del aire de ventilación es la estrategia más coste-efectiva para reducir la exposición interior a PM2.5, superando a los purificadores de aire portátiles.¹¹

⁹Asikainen, A. et al. (2016). Reducing burden of disease from residential indoor air (HEALTHVENT). Environmental Health, 15(61).

¹⁰OMS (2018). Ambient Air Pollution: Health Impacts. World Health Organization. Geneva.

¹¹Bekö, G. et al. (2010). Is the use of particle air filtration justified? Building and Environment, 45(6), 1508-1517.

La relevancia clínica de esta reducción es considerable. Meta-análisis recientes demuestran que cada incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la exposición a $\text{PM}_{2.5}$ se asocia con un aumento del 6-13% en la mortalidad cardiovascular, un 8-15% en la incidencia de ictus, un 4% en la mortalidad por cáncer de pulmón y un 2-3% en la incidencia de diabetes tipo 2.

La reducción de $10\text{--}15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la exposición interior que proporciona la filtración Passivhaus implica, por tanto, una reducción significativa del riesgo de estas patologías crónicas a lo largo de la vida.

4.2.2. Control de CO_2 y función cognitiva

El dióxido de carbono (CO_2) es el indicador más utilizado de la calidad de ventilación en espacios interiores. Producido por la respiración humana a un ritmo de aproximadamente 15-20 L/h por persona en reposo, su concentración interior depende directamente de la tasa de ventilación por persona. Allen et al. (2016) demostraron, en un ensayo controlado doble ciego en cámara experimental tipo oficina con sujetos profesionales del sector del conocimiento, que la exposición a 1.400 ppm de CO_2 —nivel característico de oficinas con ventilación deficiente— reduce hasta un 50 % el rendimiento cognitivo en tareas de toma de decisiones estratégicas (-50 %), uso de información (-31%) y respuesta a crisis (-17 %) frente a condiciones de 550 ppm. Es importante subrayar que el contexto experimental fue de oficina; la VMC Passivhaus mantiene niveles inferiores a 1.000 ppm de forma permanente en el ámbito residencial, evitando por diseño la degradación cognitiva documentada en entornos terciarios. La extrapolación al rendimiento cognitivo matutino tras el sueño en vivienda es plausible y consistente con la literatura (MacNaughton et al., 2015), pero requiere replicación específica en estudios controlados residenciales.¹²

La VMC Passivhaus mantiene los niveles de CO_2 permanentemente por debajo de 1.000 ppm, incluso durante la noche con dormitorios cerrados y múltiples ocupantes. En monitorizaciones realizadas en viviendas pasivas, los niveles nocturnos típicos se sitúan entre 600 y 900 ppm, frente a los 2.000-5.000 ppm registrados en dormitorios de viviendas convencionales sin ventilación mecánica. Esta diferencia no es trivial: implica que los ocupantes de viviendas Passivhaus inician cada día con una función cognitiva óptima, tras haber respirado aire limpio durante las 7-8 horas de sueño, mientras que los ocupantes de viviendas convencionales acumulan una deuda de oxígeno que afecta a su rendimiento matutino.

¹²Allen, J.G. et al. (2016). Associations of Cognitive Function Scores with CO_2 , Ventilation, and VOC Exposures. *Environmental Health Perspectives*, 124(6), 805-812.

4.2.3. Compuestos orgánicos volátiles (COVs) y formaldehído

Los compuestos orgánicos volátiles (COVs) constituyen un grupo heterogéneo de sustancias químicas que se evaporan a temperatura ambiente y que incluyen formaldehído, benceno, tolueno, xileno, limoneno, alfa-pineno, estireno y cientos de compuestos adicionales. Las fuentes interiores son múltiples: materiales de construcción (pinturas, adhesivos, sellantes, tableros aglomerados), mobiliario (tapizados, textiles, plásticos), productos de limpieza, ambientadores, cosméticos y actividades humanas (cocina, higiene). Wolkoff (2013) documentó que las concentraciones de TVOC en interiores superan típicamente en 2-5 veces las del aire exterior.¹³

La vivienda Passivhaus aborda los COVs mediante una estrategia dual: (1) selección de materiales de baja emisión (reduciendo la fuente) y (2) dilución continua mediante la VMC (reduciendo la concentración).

El efecto combinado produce concentraciones de TVOC inferiores a 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y de formaldehído inferiores a 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, frente a valores de 500-3.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 50-120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente en viviendas nuevas convencionales. Derbez et al. confirmaron reducciones del 30-50% en formaldehído en viviendas con VMC.¹⁴

4.2.4. Control de humedad relativa y prevención de mohos

La humedad relativa (HR) es un parámetro crítico que vincula la calidad del aire con la salud respiratoria. El rango óptimo se sitúa entre el 40% y el 60%; por debajo del 40%, las mucosas respiratorias se deshidratan, reduciendo su capacidad de defensa frente a patógenos; por encima del 60%, se favorece la proliferación de ácaros del polvo y mohos. La VMC Passivhaus contribuye al control de la HR mediante la extracción continua de vapor de agua de los locales húmedos (cocina, baños) y su sustitución por aire exterior más seco (en invierno). En climas húmedos, los intercambiadores entálpicos permiten también el control de la humedad en verano. La OMS (2009) establece que la prevención de la humedad y los mohos en interiores es una prioridad de salud pública.¹⁵

¹³Wolkoff, P. (2013). Indoor air pollutants in office environments. *Int. J. Hygiene and Environmental Health*, 216(4), 371-394.

¹⁴Derbez, M. et al. (2014). Indoor air quality and comfort in seven newly built, energy-efficient houses in France. *Building and Environment*, 72, 173-187.

¹⁵WHO (2009). WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Dampness and Mould.

4.2.5. Alérgenos: polen, ácaros y mascotas

La barrera hermética de la vivienda Passivhaus, combinada con la filtración mecánica, configura el hogar como un entorno de baja exposición alérgica —denominado en literatura comercial «refugio alérgico»— con eficacias de filtración comparables, en orden de magnitud, a las salas limpias hospitalarias de menor clasificación, a un coste muy inferior. El polen, con tamaños de partícula de 10-100 μm , es retenido prácticamente al 100 % por los filtros F7. Las esporas de moho (2-20 μm) se retienen en un 80-95 %. Los alérgenos de ácaros y mascotas, que se transportan adheridos a partículas de polvo de 5-40 μm , también se filtran de forma eficaz.

Para las personas con rinitis alérgica estacional (que afecta al 20-30% de la población europea), esto significa que la temporada de polinización deja de ser un periodo de sufrimiento constante dentro del hogar. La calidad del sueño durante la primavera mejora drásticamente, con una reducción documentada del uso de antihistamínicos y corticoides nasales del 25-40% en ocupantes de viviendas con VMC y filtración eficiente.

4.3. Evidencia científica específica sobre IAQ en Passivhaus

El estudio de Langer et al. (2015), realizado en Suecia con mediciones simultáneas en 20 viviendas pasivas y 21 viviendas convencionales de similar antigüedad y localización, constituye una de las comparaciones más rigurosas disponibles.

Los resultados mostraron reducciones estadísticamente significativas en todos los indicadores de IAQ en las viviendas pasivas: PM2.5 interior un 60% inferior (media 5,2 vs. 13,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), TVOC un 45% inferior (media 182 vs. 331 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), formaldehído un 28% inferior (media 22 vs. 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y CO₂ nocturno un 38% inferior (media 780 vs. 1.260 ppm).¹⁶

La revisión sistemática de Sundell et al. (2011), que analizó más de 30 estudios epidemiológicos con datos de más de 50.000 sujetos, estableció relaciones dosis-respuesta entre tasas de ventilación y prevalencia de síntomas: cada incremento de 10 L/s por persona en la tasa de ventilación se asoció con una reducción del 15-35% en la prevalencia de síntomas respiratorios, del 10-20% en el absentismo escolar y laboral, y de una mejora significativa en la percepción subjetiva de la calidad del aire.¹⁷

¹⁶Langer, S. et al. (2015). Indoor air quality in passive and conventional new houses in Sweden. *Building and Environment*, 93, 92-100.

¹⁷Sundell, J. et al. (2011). Ventilation rates and health: multidisciplinary review. *Indoor Air*, 21(3), 191-204.

5. CONFORT TÉRMICO Y SALUD

5.1. Fundamentos fisiológicos del confort térmico

El confort térmico, definido por Fanger (1970) como «la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico», es un estado fisiológico que depende de seis variables: temperatura del aire, temperatura media radiante, velocidad del aire, humedad relativa, tasa metabólica y aislamiento de la vestimenta. El modelo de Fanger (PMV/PPD) predice que en condiciones de confort óptimo ($PMV = 0$), menos del 5% de los ocupantes expresarán insatisfacción.¹⁸

La vivienda Passivhaus optimiza simultáneamente las cuatro variables ambientales del confort: mantiene la temperatura del aire estable (20-25°C), la temperatura media radiante elevada y uniforme (diferencia inferior a 3°C respecto al aire), la velocidad del aire baja (<0,1 m/s) y la humedad relativa controlada (40-60%). Esta optimización multivariable produce valores PMV consistentemente dentro del rango $\pm 0,2$, lo que equivale a un porcentaje de insatisfechos (PPD) inferior al 6%.

5.2. Temperatura operativa y estabilidad térmica

La temperatura operativa —media ponderada entre la temperatura del aire y la temperatura media radiante— es el indicador más representativo de la experiencia térmica real del ocupante. En una vivienda Passivhaus, la temperatura operativa presenta fluctuaciones diarias típicas de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ (y nunca superiores a $\pm 1^\circ\text{C}$), frente a fluctuaciones de $\pm 2-5^\circ\text{C}$ en viviendas convencionales dependientes de sistemas de calefacción intermitente.

Esta estabilidad tiene implicaciones fisiológicas profundas. El sistema termorregulador humano (controlado por el hipotálamo) consume entre el 5% y el 15% del gasto metabólico basal en mantener la homeostasis térmica. Cuando el entorno es térmicamente estable y se sitúa en la zona de termoneutralidad, el organismo puede redirigir esta energía metabólica hacia funciones de reparación celular, síntesis proteica, vigilancia inmunológica y procesos cognitivos.

¹⁸Fanger, P.O. (1970). Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. Danish Technical Press.

En términos clínicos, esto se traduce en:

- Mejor respuesta inmunitaria: la producción de linfocitos T y citoquinas proinflamatorias se optimiza en condiciones de termoneutralidad.
- Mayor capacidad de reparación tisular: los procesos de cicatrización, regeneración epitelial y remodelación ósea se aceleran en ausencia de estrés térmico.
- Menor carga alostática: el concepto de «carga alostática» (McEwen, 1998) describe el desgaste acumulativo de los sistemas adaptativos del organismo; un entorno térmicamente estable reduce esta carga, preservando la capacidad de respuesta ante otros estresores.

5.3. Eliminación de corrientes de aire y superficies frías

Las corrientes de aire indeseadas representan una de las causas más frecuentes de discomfort en edificios convencionales. Se originan por dos mecanismos: (1) infiltraciones a través de la envolvente (juntas de ventanas, cajas de persiana, pasatubos) y (2) convección natural junto a superficies frías (ventanas de baja calidad, puentes térmicos). La norma ISO 7730 establece que velocidades del aire superiores a 0,15 m/s en la zona de ocupación son percibidas como corrientes molestas, especialmente cuando el aire es más frío que la temperatura ambiente.

En una vivienda Passivhaus, ambos mecanismos quedan eliminados: la envolvente es estanca ($n_{50} \leq 0,6$ ren/h) y las superficies interiores se mantienen cálidas. La velocidad del aire residual —generada por el sistema de VMC— se mantiene típicamente por debajo de 0,08 m/s en la zona de ocupación, un valor imperceptible. Esta ausencia de corrientes tiene especial relevancia durante el sueño, cuando el cuerpo reduce su tasa metabólica un 10-15% y su temperatura central desciende 0,5-1°C, haciéndolo más vulnerable a las perturbaciones térmicas externas.

5.4. Impacto sobre la calidad del sueño

La calidad del sueño es, posiblemente, el ámbito donde los beneficios de la vivienda Passivhaus resultan más transformadores y donde la evidencia es más robusta. Un meta-análisis de la relación entre sueño y sistema inmunitario (Irwin, 2015) demostró que la privación de sueño o su fragmentación se asocia con: aumento de marcadores inflamatorios (IL-6, TNF- α , PCR), reducción de la actividad de células NK (Natural Killer), menor respuesta a vacunas y mayor susceptibilidad a infecciones virales.¹⁹

¹⁹Irwin, M.R. (2015). Why sleep is important for health: a psychoneuroimmunology perspective. *Annual Review of Psychology*, 66, 143-172.

La vivienda Passivhaus proporciona las condiciones que la literatura describe como óptimas para el sueño reparador: temperatura estable entre 16 y 19°C (rango óptimo según la National Sleep Foundation), aire fresco con CO₂ bajo, ausencia de corrientes de aire, aislamiento acústico y control de la humedad. El estudio de Zalejska-Jonsson (2014), basado en una encuesta de satisfacción a residentes de viviendas suecas con eficiencia mejorada (n ≈ 520, Building and Environment 82:134-144), documenta que una proporción mayoritaria de los ocupantes — cercana al 78 % en el subgrupo Passivhaus— reportó mejoras subjetivas en la calidad del sueño respecto a su vivienda anterior, dato coherente con los resultados de CEPHEUS Final Report (2001) y con Schnieders & Hermelink (2006). Conviene insistir en que se trata de evidencia subjetiva (autorreporte en encuesta), no medida polisomnográfica.²⁰

5.5. Confort térmico asimétrico y perspectiva de género

Un aspecto frecuentemente ignorado del confort térmico es su dimensión de género. Kingma y van Marken Lichtenbelt (2015) demostraron que los modelos de confort térmico estándar (basados en el metabolismo de un varón adulto de 70 kg) sobreestiman la temperatura de confort para los varones e infraestiman la de las mujeres, cuya tasa metabólica basal es un 20-35% inferior. La vivienda Passivhaus, al mantener temperaturas operativas estables y uniformes en el rango 20-24°C con mínimas asimetrías, acomoda mejor las necesidades térmicas de ambos géneros que los sistemas convencionales de calefacción puntual.²¹

²⁰Zalejska-Jonsson, A. (2014). Impact of energy and indoor environment quality on satisfaction. Building and Environment, 82, 134-144.

²¹Kingma, B. & van Marken Lichtenbelt, W. (2015). Energy consumption in buildings and female thermal demand. Nature Climate Change, 5, 1054-1056.

6. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y SALUD

6.1. Filosofía de selección de materiales en Passivhaus

Aunque el estándar Passivhaus no prescribe explícitamente materiales específicos —a diferencia de estándares como Cradle to Cradle o Living Building Challenge que sí lo hacen—, la práctica constructiva Passivhaus ha desarrollado una cultura de selección rigurosa de materiales que prioriza la baja emisión de contaminantes. Esta práctica responde a una lógica técnica irrefutable: un sistema de ventilación diseñado para garantizar la calidad del aire pierde eficacia si las fuentes internas de contaminación son elevadas. El enfoque óptimo combina la reducción en la fuente (materiales de baja emisión) con la dilución del contaminante residual (VMC).

6.2. Categorías de materiales y sus implicaciones sanitarias

6.2.1. Aislamientos térmicos

Los aislamientos utilizados en Passivhaus abarcan un amplio espectro, desde minerales (lana de roca, lana de vidrio) hasta sintéticos (EPS, XPS, PUR) y naturales (celulosa insuflada, fibra de madera, cáñamo, corcho, lana de oveja). Desde la perspectiva de la salud interior, los aislamientos quedan típicamente encapsulados dentro de la envolvente y no tienen contacto directo con el aire interior, por lo que su impacto en la IAQ es limitado. Sin embargo, los aislamientos naturales presentan ventajas adicionales: regulación higrométrica (absorción y liberación de humedad que amortigua picos de HR interior), ausencia de fibras minerales irritantes y menor energía gris (impacto ambiental del ciclo de vida).

6.2.2. Revestimientos interiores y pinturas

Los revestimientos interiores son la categoría de material con mayor impacto directo en la IAQ, dado que presentan la mayor superficie de contacto con el aire interior. Las opciones preferentes en Passivhaus incluyen: pinturas minerales de silicato (clasificación A+ en el sistema francés, COVs < 1 g/L), pinturas a la cal (sin COVs, con propiedades bacteriostáticas naturales gracias a su pH alcalino de 12-13), enlucidos de arcilla (regulación higrométrica excepcional, con capacidad de absorber y liberar hasta 90 g/m² de humedad en 24 horas) y pinturas de base acuosa certificadas GREENGUARD Gold o Blauer Engel.

6.2.3. Pavimentos

Los pavimentos merecen atención especial por su extensión superficial y su proximidad a las vías respiratorias, especialmente en el caso de niños que juegan y gatean en el suelo. Los suelos de PVC flexible, ampliamente utilizados en construcción convencional por su bajo coste, contienen plastificantes ftalatos (DEHP, DINP, DBP) con actividad endocrina disruptora documentada. Estudios epidemiológicos han asociado la presencia de suelos de PVC en dormitorios infantiles con un incremento del 50-100% en el riesgo de asma y eccema. Las alternativas preferidas en Passivhaus incluyen: madera maciza o multicapa con acabados de aceite natural, cerámica, piedra natural, linóleo natural (fabricado con aceite de linaza, harina de madera y yute) y corcho natural.

6.2.4. Tableros derivados de la madera

Los tableros aglomerados y MDF constituyen la principal fuente de formaldehído en interiores. El formaldehído, clasificado como cancerígeno del Grupo 1 por la IARC desde 2004, se emite durante años desde las resinas de urea-formaldehído utilizadas como adhesivo. En proyectos Passivhaus se priorizan tableros con clasificación E1 ($\leq 0,1 \text{ mg/m}^3$ de emisión) o superior (EO.5, $\leq 0,05 \text{ mg/m}^3$), o tableros encolados con resinas PMDI o PVAc libres de formaldehído. El sobre coste de estos tableros es modesto (5-15%) y se justifica plenamente por la reducción de la exposición a un cancerígeno probado.

6.3. Certificaciones de materiales saludables

El ecosistema de certificaciones de materiales de baja emisión ha crecido significativamente en las últimas décadas, proporcionando herramientas verificables para la selección informada:

Certificación	Alcance	Criterio principal
Blauer Engel (DE)	Pinturas, barnices, adhesivos, tableros	Límites de COVs, formaldehído y sustancias CMR
A+ France (FR)	Todos los productos de construcción	Clasificación por emisión de COVs en cámara de ensayo
GREENGUARD Gold	Mobiliario, materiales, electrónica	Límites para 360+ COVs individuales y TVOC
Cradle to Cradle	Ciclo de vida completo	Salud material, reutilización, energía, agua, justicia social
natureplus	Materiales de construcción naturales	Origen natural, baja emisión, aptitud técnica

6.4. Impacto acumulativo a largo plazo

La exposición crónica a bajas concentraciones de múltiples contaminantes químicos —lo que la toxicología ambiental denomina «efecto cóctel»— es un área de investigación emergente con implicaciones profundas.

Aunque cada sustancia individual puede encontrarse por debajo de su umbral regulatorio, la exposición simultánea a decenas de compuestos puede generar efectos aditivos o sinérgicos que el marco regulatorio actual no contempla adecuadamente. La sensibilidad química múltiple (SQM), la fatiga crónica de origen ambiental y ciertos trastornos neurológicos se atribuyen a este efecto acumulativo.

La vivienda Passivhaus, al reducir drásticamente tanto la concentración de cada contaminante individual como la carga total de exposición, ofrece una protección integral frente al efecto cóctel que ningún otro enfoque constructivo iguala. Es, en esencia, un entorno de «mínima carga química».

7. CALIDAD DEL AGUA Y ENTORNO INTERIOR

7.1. Sistemas de filtración integrados

Aunque el estándar Passivhaus no incluye requisitos específicos sobre la calidad del agua, el enfoque holístico que caracteriza a los proyectos de alta calidad conduce frecuentemente a la integración de sistemas de tratamiento de agua como complemento natural de la estrategia de salud integral. Los sistemas más habituales incluyen:

- Filtros de carbón activado: eliminan cloro, trihalometanos (THMs), pesticidas y compuestos orgánicos. Los THMs, subproductos de la cloración del agua, se han asociado en estudios epidemiológicos con un incremento del 15-20% en el riesgo de cáncer de vejiga en exposiciones crónicas superiores a 80 µg/L.
- Ósmosis inversa: elimina sales, metales pesados, nitratos y microcontaminantes emergentes (fármacos, disruptores endocrinos). Especialmente indicada en zonas con aguas de alta mineralización o contaminación agrícola.
- Sistemas de ultravioleta (UV): inactivación de microorganismos sin adición de químicos. Eficaz contra Legionella, Cryptosporidium y virus.

7.2. Iluminación natural y ritmos circadianos

El diseño Passivhaus, al optimizar las superficies acristaladas para maximizar las ganancias solares pasivas, genera típicamente viviendas con excelente iluminación natural. Los grandes ventanales orientados al sur (en el hemisferio norte) permiten la entrada de luz natural profunda, con niveles de iluminancia de 300-500 lux en las zonas de estar durante las horas centrales del día.

La luz natural es el principal sincronizador del reloj circadiano (zeitgeber), regulando la producción de melatonina, cortisol, serotonina y otras hormonas con profundas implicaciones para la salud. La exposición insuficiente a luz natural se asocia con trastornos del ritmo circadiano, depresión estacional (SAD), insomnio, déficit de vitamina D y deterioro cognitivo.

Una vivienda bien diseñada según principios Passivhaus, con amplias superficies acristaladas de alta calidad (sin sensación de frío radiante), promueve la exposición diaria a luz natural que la fisiología humana requiere.

7.3. Diseño biofílico y neuroarquitectura

El diseño biofílico —que incorpora elementos naturales en el entorno construido— ha demostrado beneficios robustos para la salud. El estudio seminal de Ulrich (1984) demostró que los pacientes hospitalizados con vistas a un jardín se recuperaban más rápido, requerían menos analgésicos y presentaban menos complicaciones que aquellos cuyas ventanas daban a un muro de ladrillo. Los proyectos Passivhaus, al incorporar grandes ventanales con vistas al exterior, materiales naturales (madera, piedra, cal) y espacios de transición interior-exterior, alinean la estrategia energética con los principios del diseño biofílico, generando un beneficio psicológico sinérgico.²²

²²Ulrich, R.S. (1984). View through a window may influence recovery from surgery. *Science*, 224(4647), 420–421.

8. CONFORT ACÚSTICO Y PROTECCIÓN FRENTE AL RUIDO

8.1. El ruido como factor de riesgo sanitario

La contaminación acústica es reconocida por la OMS como el segundo factor de riesgo ambiental más dañino en Europa, solo por detrás de la contaminación atmosférica. Se estima que causa 12.000 muertes prematuras y 48.000 nuevos casos de cardiopatía isquémica anuales en Europa, además de 22 millones de personas con molestias crónicas y 6,5 millones con trastornos crónicos del sueño. Basner et al. (2014) documentaron en The Lancet que los efectos del ruido sobre la salud incluyen hipertensión arterial (OR 1,03-1,06 por cada dB de incremento en Lden), enfermedad coronaria, ictus, diabetes tipo 2, obesidad, deterioro cognitivo infantil y trastornos psiquiátricos.²³

8.2. Prestaciones acústicas de la envolvente Passivhaus

La envolvente Passivhaus proporciona, como beneficio colateral de su diseño térmico y de hermeticidad, un aislamiento acústico significativamente superior al de la construcción convencional. Los espesores de aislamiento térmico de 25-40 cm en muros y cubiertas proporcionan una masa acústica considerable y, cuando se combinan con estrategias de masa-resorte-masa (muros multicapa), alcanzan índices de aislamiento a ruido aéreo (DnT,w) de 45-55 dB(A). Las carpinterías de triple vidrio ofrecen índices Rw de 33-38 dB, frente a los 25-30 dB de las ventanas de vidrio doble estándar. La hermeticidad al aire elimina las vías de transmisión sonora a través de grietas y juntas, que en edificios convencionales pueden reducir el aislamiento acústico real en 5-10 dB respecto al nominal.²⁴

En términos prácticos, esto significa que una vivienda Passivhaus situada en una calle urbana con un nivel de ruido exterior de 65-70 dB(A) puede mantener niveles interiores de 20-25 dB(A) con ventanas cerradas, cumpliendo holgadamente el límite de 30 dB(A) LAeq recomendado por la OMS para dormitorios durante la noche (y acercándose al nivel ideal de 25 dB(A)).

²³Basner, M. et al. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. The Lancet, 383(9925), 1325-1332.

²⁴Rojas, G. et al. (2015). Acoustic performance of buildings with MVHR systems. Energy and Buildings, 107, 89-98.

8.3. Ruido del sistema de VMC: mito vs. Realidad

Una preocupación frecuente sobre la VMC es el ruido generado por el propio sistema de ventilación. Los equipos Passivhaus certificados deben cumplir criterios estrictos de emisión sonora: nivel de presión sonora en boca de impulsión inferior a 25 dB(A) y nivel sonoro en el local inferior a 25 dB(A) en dormitorios y 30 dB(A) en estancias. Estos niveles se consiguen mediante silenciadores acústicos integrados, ventiladores EC (conmutación electrónica) de alta eficiencia y baja emisión sonora, y conductos con aislamiento acústico interior.

En la práctica, el ruido de la VMC es imperceptible en la mayoría de las situaciones y se sitúa por debajo del umbral de percepción consciente (25 dB(A)), comparable al silencio de un bosque.

8.4. Impacto en el desarrollo cognitivo infantil

El ruido ambiental tiene un impacto particularmente severo en el desarrollo cognitivo de los niños. El estudio RANCH (Road traffic noise and Aircraft Noise exposure and Children's cognition and Health), uno de los mayores estudios transnacionales sobre el tema, demostró que la exposición crónica a ruido de tráfico se asocia con un deterioro significativo de la comprensión lectora, la memoria de trabajo y la atención sostenida en niños de 9-10 años. Dadvand et al. (2015) establecieron que los espacios verdes (silenciosos) mejoran el desarrollo cognitivo, sugiriendo que la protección acústica es un mediador relevante.²⁵

El hogar Passivhaus, al proporcionar un entorno acústico comparable al de un espacio natural, ofrece a los niños las condiciones óptimas para el estudio, la concentración y el descanso, contribuyendo a un desarrollo cognitivo óptimo.

²⁵Dadvand, P. et al. (2015). Green spaces and cognitive development in primary schoolchildren. PNAS, 112(26), 7937-7942.

9. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y BIENESTAR PSICOLÓGICO

9.1. La pobreza energética como determinante de salud

La pobreza energética —definida como la incapacidad de un hogar para mantener su vivienda a una temperatura adecuada a un coste asequible— afecta a más de 50 millones de personas en la Unión Europea. Liddell y Morris (2010) realizaron una revisión exhaustiva de la evidencia que relaciona pobreza energética y salud, concluyendo que vivir en una vivienda fría se asocia con: un incremento del 20-50% en el riesgo de mortalidad invernal en personas mayores, mayor prevalencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, incremento de síntomas depresivos y ansiosos, y peor rendimiento académico en niños.²⁶

La vivienda Passivhaus elimina de raíz el problema de la pobreza energética al reducir la demanda de climatización en un 75-90%. Una vivienda Passivhaus de 100 m² en clima continental presenta un coste anual de calefacción de 100-200€, frente a los 800-1.500€ de una vivienda convencional equivalente. Esta diferencia, que se mantiene durante toda la vida útil del edificio (50-100 años), libera recursos económicos que pueden destinarse a alimentación, educación, ocio y salud.

9.2. Estrés financiero y salud mental

La preocupación por los costes energéticos genera un estrés crónico de bajo grado que afecta negativamente a la salud mental y física. El cortisol crónicamente elevado —biomarcador del estrés sostenido— se asocia con inmunosupresión, resistencia a la insulina, hipertensión, deterioro de la memoria hipocampal y aceleración del envejecimiento celular (acortamiento de telómeros). La seguridad energética que proporciona la vivienda Passivhaus —la certeza de que la vivienda mantendrá una temperatura confortable independientemente de las fluctuaciones del mercado energético— elimina esta fuente de estrés, contribuyendo a un estado mental más equilibrado.

²⁶Liddell, C. & Morris, C. (2010). Fuel poverty and human health: A review. *Energy Policy*, 38(6), 2987-2997.

9.3. Sentido de agencia y coherencia vital

La psicología positiva identifica el «sense of coherence» (sentido de coherencia, SOC) de Antonovsky como un predictor robusto de salud y bienestar. El SOC se compone de tres dimensiones: comprensibilidad (el entorno es predecible), manejabilidad (se dispone de recursos para afrontar desafíos) y significatividad (la vida tiene sentido y propósito). La vivienda Passivhaus contribuye a las tres dimensiones: su comportamiento térmico es predecible y estable (comprensibilidad), su bajo coste operativo garantiza recursos disponibles (manejabilidad), y su alineamiento con valores de sostenibilidad refuerza la significatividad existencial.

Habitar un espacio conscientemente diseñado para el bienestar y la sostenibilidad genera lo que los psicólogos ambientales denominan «apego al lugar» (place attachment) y «identidad de lugar» (place identity), constructos que se asocian positivamente con el bienestar subjetivo, la autoestima y el compromiso comunitario.

10. IMPACTO EN POBLACIONES VULNERABLES

10.1. Salud infantil

Los niños representan la población más vulnerable a los efectos del ambiente interior, por razones biológicas y conductuales: su sistema inmunitario está en proceso de maduración, su tasa respiratoria por kilogramo de peso es 2-3 veces superior a la de un adulto (lo que implica una mayor dosis de exposición por inhalación), su sistema nervioso central está en pleno desarrollo (mayor vulnerabilidad a neurotóxicos) y pasan más tiempo en el suelo (mayor exposición a polvo y contaminantes depositados).

Los beneficios de la vivienda Passivhaus para la salud infantil son múltiples y sinérgicos:

- Prevención del asma: la eliminación de mohos, la reducción de ácaros (HR controlada 40-60%) y la filtración de partículas reducen hasta un 40% la incidencia de asma de nueva aparición en niños, según modelos epidemiológicos basados en datos de Mendell et al.
- Desarrollo cognitivo: los niveles óptimos de CO₂, la ausencia de ruido y la buena iluminación natural crean un entorno idóneo para el aprendizaje, el juego creativo y la concentración. Estudios en escuelas con VMC documentan mejoras del 8-14% en el rendimiento académico.
- Protección neurológica: la reducción de la exposición a formaldehído, ftalatos y otros neurotóxicos protege el desarrollo del sistema nervioso central, especialmente crítico durante los primeros 1.000 días de vida.
- Sueño infantil: la temperatura estable, el silencio y el aire limpio favorecen un sueño profundo y reparador, esencial para la consolidación de la memoria, la regulación emocional y el crecimiento (la hormona del crecimiento GH se secreta mayoritariamente durante el sueño profundo N3).

10.2. Salud geriátrica

Las personas mayores son particularmente susceptibles a los efectos del ambiente interior por la convergencia de varios factores: disminución de la capacidad termorreguladora (mayor riesgo de hipotermia e hipertermia), reducción de la reserva cardíaca y respiratoria (menor tolerancia a la contaminación), mayor prevalencia de patologías crónicas (EPOC, asma, cardiopatía, diabetes) y mayor tiempo de permanencia en el domicilio (exposición prolongada).

La vivienda Passivhaus ofrece beneficios específicos para esta población:

- Protección térmica: la temperatura estable previene episodios de hipotermia doméstica, responsable de una fracción significativa del exceso de mortalidad invernal en personas mayores.
- Prevención de caídas: la ausencia de corrientes frías elimina la necesidad de desplazarse por la vivienda buscando zonas más cálidas; los suelos uniformemente templados reducen el riesgo de resbalón (no hay condensación superficial) y de rigidez muscular.
- Salud cardiovascular: la estabilidad térmica y la reducción de PM2.5 protegen el sistema cardiovascular, reduciendo el riesgo de eventos agudos (infarto, ictus) que se incrementan con las fluctuaciones térmicas y la contaminación.
- Salud cognitiva: la calidad del aire (bajo CO₂, ausencia de COVs) y el buen sueño contribuyen a preservar la función cognitiva, retardando potencialmente el deterioro cognitivo asociado al envejecimiento.
- Autonomía y envejecimiento en el hogar: el confort integral de la vivienda Passivhaus favorece la permanencia autónoma en el domicilio durante más tiempo, reduciendo la necesidad de institucionalización.

10.3. Mujeres embarazadas y salud perinatal

El período prenatal es una ventana de vulnerabilidad crítica en la que la exposición ambiental de la madre puede tener efectos permanentes sobre la salud del feto y del futuro adulto, conforme al paradigma de los «orígenes del desarrollo de la salud y la enfermedad» (DOHaD, Developmental Origins of Health and Disease). La exposición gestacional a PM2.5 se ha asociado con bajo peso al nacer, parto prematuro, preeclampsia y alteraciones del neurodesarrollo. Los ftalatos y el bisfenol A —presentes en ciertos materiales de construcción y mobiliario— actúan como disruptores endocrinos con efectos documentados sobre el desarrollo sexual, metabólico y neurológico del feto.

La vivienda Passivhaus, al reducir simultáneamente la exposición a partículas, COVs, formaldehído, plastificantes y otros contaminantes, ofrece el entorno más protector posible para la gestación y los primeros años de vida, un periodo en el que los efectos de la exposición ambiental se programan epigenéticamente para toda la vida.

10.4. Personas con patologías respiratorias crónicas

Para las personas que conviven con asma, EPOC, fibrosis pulmonar, bronquiectasias u otras patologías respiratorias crónicas, la calidad del aire interior es literalmente una cuestión de supervivencia. Cada exacerbación asmática supone un deterioro irreversible de la función pulmonar; cada episodio de EPOC agudizada reduce la esperanza de vida y la calidad de vida.

La vivienda Passivhaus, al mantener permanentemente un aire filtrado, con humedad controlada, sin mohos y sin picos de contaminación, reduce drásticamente la frecuencia y gravedad de estas exacerbaciones. En términos clínicos, esto equivale a vivir dentro de un entorno de «rehabilitación respiratoria permanente».

10.5. Personas inmunodeprimidas

Los pacientes con inmunodeficiencias (congénitas, adquiridas o iatrogénicas —por quimioterapia, trasplantes o terapia inmunosupresora—) son extremadamente vulnerables a las infecciones oportunistas, incluidas las provocadas por hongos ambientales como *Aspergillus fumigatus*. En el entorno hospitalario, estos pacientes se alojan en habitaciones con filtrado HEPA y presión positiva. La vivienda Passivhaus, con su filtración F7/F9 y su presión levemente positiva de impulsión, ofrece un nivel de protección intermedio entre la vivienda convencional y la habitación hospitalaria, permitiendo que estos pacientes mantengan una calidad de vida doméstica incomparablemente superior a la que les permite un edificio convencional.

11. MICROBIOMA INTERIOR Y SALUD INMUNOLÓGICA

11.1. El concepto de microbioma del edificio

El microbioma del entorno construido —el conjunto de microorganismos (bacterias, hongos, virus, arqueas) que habitan las superficies y el aire de los edificios— ha emergido en la última década como un campo de investigación fascinante con profundas implicaciones para la salud humana. Adams et al. (2015) publicaron un meta-análisis fundacional que demostró que cada edificio posee un microbioma característico, determinado por sus ocupantes, su diseño, sus materiales y, críticamente, su sistema de ventilación.²⁷

Meadow et al. (2014) demostraron que el tipo de ventilación es uno de los determinantes más potentes de la composición del microbioma aéreo interior. Los edificios con ventilación mecánica filtrada presentan comunidades microbianas significativamente diferentes a las de los edificios con ventilación natural: menor diversidad total (al filtrar esporas y bacterias exteriores), menor proporción de microorganismos ambientales (suelo, vegetación) y mayor proporción relativa de microorganismos de origen humano.²⁸

11.2. Implicaciones para la salud inmunológica

La relación entre microbioma ambiental y salud inmunológica es compleja y bidireccional. Por un lado, la exposición a ciertos microorganismos ambientales (la llamada «hipótesis de la higiene» o, más correctamente, «hipótesis de los viejos amigos», Hanski et al., 2012) parece ser necesaria para la maduración correcta del sistema inmunitario, especialmente en la primera infancia. Por otro lado, la exposición a patógenos ambientales (mohos, *Legionella*, *Mycobacterium*) es claramente perjudicial. Como marco hipotético emergente —no como evidencia consolidada—, Hoisington et al. (2019) han propuesto extender este planteamiento al ámbito de la salud mental, sugiriendo asociaciones aún no replicadas entre la composición microbiana interior y síntomas depresivos. Esta línea, prometedora, debe leerse como hipótesis de investigación y no como hallazgo establecido.²⁹

²⁷Adams, R.I. et al. (2015). Microbiota of the indoor environment: a meta-analysis. *Microbiome*, 3, 49.

²⁸Meadow, J.F. et al. (2014). Indoor airborne bacterial communities are influenced by ventilation. *Indoor Air*, 24(1), 41-48.

²⁹Hoisington, A.J. et al. (2019). The microbiome of the built environment and mental health. *Microbiome*, 7, 60.

La vivienda Passivhaus modifica el microbioma interior de forma específica: reduce drásticamente los patógenos (mohos, bacterias de suelo contaminado) al filtrar el aire y eliminar la humedad, pero no esteriliza el entorno.

Los ocupantes humanos continúan aportando su microbioma personal, y la ventilación mecánica permite una renovación parcial con microorganismos exteriores (los que atraviesan el filtro, generalmente de tamaño inferior a 1 μm). El resultado es un microbioma «editado»: libre de patógenos peligrosos pero no estéril, un equilibrio que la investigación emergente sugiere como óptimo para la salud inmunológica.

11.3. Hipótesis: la vivienda Passivhaus como «curador del microbioma»

Formulamos aquí una hipótesis original: la vivienda Passivhaus, al eliminar selectivamente los microorganismos patógenos del aire interior mientras permite la persistencia de una comunidad microbiana comensal de baja patogenicidad, crea un entorno que promueve la «tolerancia inmunológica» —la capacidad del sistema inmunitario de discriminar entre amenazas reales y estímulos inocuos—, reduciendo potencialmente la prevalencia de enfermedades autoinmunes y atopías.

Esta hipótesis se basa en la evidencia de que: (a) la exposición crónica a mohos promueve respuestas Th2 (alérgicas), (b) la reducción selectiva de patógenos (sin esterilización) se asocia con mejor regulación inmunológica en modelos animales, y (c) la composición del microbioma interior correlaciona con biomarcadores inmunológicos en estudios transversales. Su verificación requeriría estudios longitudinales con mediciones simultáneas de microbioma ambiental, microbioma humano (intestinal y respiratorio) y biomarcadores inmunológicos en cohortes de ocupantes de viviendas Passivhaus vs. convencionales.

12. PASSIVHAUS Y RESILIENCIA ANTE PANDEMIAS RESPIRATORIAS

12.1. Lecciones de la pandemia de COVID-19

La pandemia de SARS-CoV-2 puso de manifiesto de forma drástica la importancia de la ventilación en la transmisión de infecciones respiratorias. Morawska et al. (2020), en una publicación firmada por 239 científicos, establecieron inequívocamente que la transmisión aérea del SARS-CoV-2 es una vía de contagio principal y que la ventilación adecuada es la medida más eficaz para reducirla en espacios cerrados. Los edificios con ventilación mecánica y filtración mostraron consistentemente menores tasas de transmisión que los edificios con ventilación natural o sin ventilación.³⁰

12.2. La VMC Passivhaus como infraestructura de resiliencia frente a transmisión aérea

La VMC Passivhaus posee características que la convierten en una infraestructura de resiliencia ante pandemias respiratorias:

- Renovación constante: el caudal continuo de 30 m³/h por persona diluye la carga viral del aire, reduciendo la probabilidad de que un ocupante infectado transmita el virus a otros convivientes. Aplicaciones del modelo de Wells-Riley (Riley et al., 1978; versión moderna en Rudnick & Milton, 2003; Bazant & Bush, 2021) estiman que, para un caudal de ventilación de 30 m³/h por persona, la probabilidad de infección se reduce un 50-70 % respecto a un caudal de 5 m³/h (típico de ventilación natural invernal). Estas son estimaciones de modelo, no observaciones empíricas directas, y deben interpretarse como tales.
- Filtración: los filtros F7 capturan una proporción significativa de las gotas respiratorias (>5 µm) que portan la mayor carga viral. Filtros F9 o HEPA (incorporables en muchos equipos) alcanzan eficiencias del 95-99% para partículas de 0,3 µm, capturando también los aerosoles finos.
- Flujo unidireccional: la distribución del aire desde locales secos (dormitorios) hacia locales húmedos (baños) crea un flujo unidireccional que impide la migración de aerosoles entre habitaciones, funcionando como un sistema de «zona limpia / zona contaminada» análogo al utilizado en instalaciones sanitarias.

³⁰Morawska, L. et al. (2020). How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? Environment International, 142, 105832.

- Hermeticidad: la envolvente estanca impide que los aerosoles se transfieran entre viviendas adyacentes a través de grietas, shunts de instalaciones o espacios comunes, un mecanismo de contagio documentado en edificios de viviendas convencionales.

12.3. Preparación ante futuras pandemias

Los epidemiólogos coinciden en que la cuestión no es si habrá futuras pandemias respiratorias, sino cuándo. Las variantes emergentes de influenza, los coronavirus con potencial pandémico y otros patógenos respiratorios representan una amenaza permanente. Vardoulakis et al. (2015) advierten además que el cambio climático incrementará la frecuencia de olas de calor (que obligan a cerrar ventanas) y de episodios de contaminación atmosférica (incendios forestales), creando condiciones en las que la ventilación natural se vuelve impracticable precisamente cuando más se necesita.³¹

La vivienda Passivhaus, con su VMC filtrada que funciona independientemente de las condiciones exteriores, constituye una infraestructura de resiliencia ante este escenario. Generalizar el estándar Passivhaus en la nueva construcción sería una medida de preparación pandémica más coste-efectiva que el almacenamiento de mascarillas o la construcción de hospitales de emergencia, porque actúa en el origen del problema: la calidad del aire en el entorno donde las personas pasan el 85-93% de su tiempo.

³¹Vardoulakis, S. et al. (2015). Impact of climate change on the domestic indoor environment. *Environment International*, 85, 299-313.

13. ANÁLISIS ECONÓMICO-SANITARIO

13.1. Costes sanitarios de la mala calidad del ambiente interior

Los costes económicos de las enfermedades relacionadas con la calidad del ambiente interior son sustanciales, aunque difíciles de cuantificar con precisión debido a la multicausalidad de las patologías implicadas. El proyecto HEALTHVENT (Asikainen et al., 2016) cuantifica la carga sanitaria anual atribuible a la exposición residencial deficiente en Europa en términos de DALYs perdidos (años de vida ajustados por discapacidad), no en valor monetario directo. Diversas estimaciones nacionales de monetización de DALYs —aplicando valores estadísticos del año de vida (60.000–80.000 €/DALY, en la línea de NICE y de la mayoría de evaluaciones de tecnologías sanitarias europeas— sitúan el coste agregado europeo en un rango plausible de varias decenas de miles de millones de euros anuales, que incluiría costes directos (asistencia sanitaria, medicamentos) e indirectos (absentismo laboral, pérdida de productividad, cuidado informal). PAPIK Group considera prudente presentar estas cifras como estimación derivada y no como dato fuente; el lector interesado debe remitirse al artículo original.³²

Wyon (2004) estimó que la mejora de la calidad del aire interior en oficinas podría incrementar la productividad laboral entre un 6% y un 9%, lo que para una empresa con 100 empleados a un salario medio de 35.000€/año representa un beneficio de 210.000–315.000€/año, cifra que supera con creces el coste de instalación y operación de un sistema de VMC de alta calidad.

13.2. Análisis coste-beneficio de la vivienda Passivhaus

El sobrecoste de construcción de una vivienda Passivhaus respecto a una vivienda convencional que cumple la normativa vigente se sitúa entre el 5% y el 15%, dependiendo de la tipología (unifamiliar o plurifamiliar), el clima, la experiencia del equipo de proyecto y las condiciones del mercado local. Para una vivienda unifamiliar de 150 m² con un coste de construcción de 1.800 €/m², esto equivale a un sobrecoste de 13.500–40.500€.

El retorno de esta inversión se produce a través de múltiples vías:

Concepto	Ahorro anual estimado	Periodo análisis	Ahorro acumulado
Energía (calefacción + refrigeración)	800-1.200 €/año	30 años	24.000-36.000 €
Costes sanitarios evitados	300-800 €/año	30 años	9.000-24.000 €
Productividad (teletrabajo)	500-1.500 €/año	30 años	15.000-45.000 €
Mantenimiento reducido	100-300 €/año	30 años	3.000-9.000 €
Valor residual superior	N/A	Venta	10.000-30.000 €
TOTAL BENEFICIO ACUMULADO		30 años	61.000-144.000 €

Como se observa, el beneficio acumulado a 30 años (61.000-144.000€) supera ampliamente el sobre coste inicial (13.500-40.500€), con un periodo de retorno de 7-15 años según el escenario. Cuando se añaden los costes sanitarios evitados —que la contabilidad convencional ignora—, el caso económico a favor del Passivhaus se vuelve aún más contundente.

13.3. Costes sanitarios evitados: metodología de estimación

La estimación de costes sanitarios evitados se basa en un modelo que combina tres componentes: (1) reducción de la incidencia de patologías atribuibles al ambiente interior (asma, EPOC exacerbada, alergias, infecciones respiratorias), cuantificada a partir de la fracción atribuible poblacional (FAP) y las reducciones de exposición documentadas; (2) coste unitario de cada patología (consultas, medicamentos, hospitalizaciones, absentismo); y (3) reducción de la pérdida de productividad por síntomas subclínicos (fatiga, cefaleas, dificultad de concentración).

Thomson et al. (2013), en una revisión Cochrane sobre los efectos sanitarios de las mejoras de vivienda, encontraron evidencia robusta de que las intervenciones que mejoran la eficiencia energética y la calidad del aire producen mejoras estadísticamente significativas en la salud general, la salud respiratoria y la salud mental de los ocupantes, con una ratio coste-beneficio favorable.³³

³³Thomson, H. et al. (2013). Housing improvements for health. Cochrane Database of Systematic Reviews, (2).

13.4. Perspectiva macroeconómica: impacto en el sistema de salud pública

A escala macroeconómica, la generalización del estándar Passivhaus podría generar ahorros sustanciales para los sistemas de salud pública. La siguiente es una estimación PAPIK basada en supuestos explícitos: (i) la mejora del ambiente interior en Passivhaus reduciría en un 15-25 % la incidencia de enfermedades respiratorias atribuibles al ambiente interior, asunción conservadora derivada de Mendell et al. (2011), Sundell et al. (2011) y Asikainen et al. (2016); (ii) estas patologías representan aproximadamente el 6-8 % del gasto sanitario total en países europeos; (iii) la penetración Passivhaus en el parque edificatorio se asume al 100 % en un horizonte teórico. Bajo estas premisas, el ahorro potencial se sitúa en el 1-2 % del gasto sanitario total, equivalente a 2.000-4.000 millones de euros anuales solo en España (gasto sanitario total de ~85.000 M€ en 2024). La cifra, orientativa y derivada (no fuente externa), ilustra la magnitud del impacto potencial y justifica la inclusión de criterios de salud en las políticas de vivienda y construcción; en ningún caso debe presentarse como dato medido.

14. COMPARATIVA CON OTROS ESTÁNDARES DE CONSTRUCCIÓN SALUDABLE

14.1. WELL Building Standard

El WELL Building Standard, desarrollado por el International WELL Building Institute (IWBI), es el estándar más específicamente orientado a la salud y el bienestar en el entorno construido. Se estructura en diez conceptos: aire, agua, alimentación, luz, movimiento, confort térmico, sonido, materiales, mente y comunidad. Cada concepto incluye precondiciones obligatorias y optimizaciones opcionales.

WELL y Passivhaus se han diseñado con enfoques distintos pero técnicamente compatibles. WELL define requisitos de resultado en el ambiente interior (niveles máximos de contaminantes, rangos de temperatura, niveles de iluminación) y un sistema de auditoría documental, mientras que Passivhaus define requisitos de diseño constructivo y de prestaciones energéticas verificables in situ (PHPP, Blower Door). En la práctica, la envolvente y la VMC propias del estándar Passivhaus permiten cumplir con holgura buena parte de las precondiciones WELL en los conceptos de aire, confort térmico y sonido; la certificación conjunta Passivhaus + WELL es por ello una opción técnica habitual cuando el promotor desea documentar simultáneamente eficiencia y salud, y demuestra una complementariedad operativa entre ambos sistemas.

14.2. BREEAM y LEED

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) y LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) son los dos sistemas de certificación medioambiental de edificios más extendidos a escala global. Ambos incluyen categorías específicas relacionadas con la salud (Indoor Environmental Quality en LEED, Health and Wellbeing en BREEAM) y, junto a ellas, otras categorías centradas en eficiencia energética, materiales, gestión del agua y emisiones. Son sistemas explícitamente multicriterio, por lo que el alcance final de la certificación en términos de salud depende del peso que el equipo proyectista asigne a esas categorías concretas.

La principal diferencia con Passivhaus es que BREEAM y LEED funcionan como sistemas de puntuación: un edificio puede obtener una calificación alta compensando carencias en salud con excelencia en otras categorías (energía, materiales, emplazamiento). En Passivhaus, los criterios de confort y calidad del aire no son opcionales ni compensables: son requisitos de obligado cumplimiento.

BREEAM y LEED son sistemas multicriterio en los que el peso relativo de la categoría de salud y bienestar puede variar según los créditos elegidos por el equipo proyectista. En consecuencia, un edificio LEED Gold o BREEAM Excellent puede haber priorizado categorías energéticas, de gestión del agua o de materiales sin alcanzar el mismo nivel cuantitativo de prestaciones en calidad del aire interior y confort térmico que el estándar Passivhaus exige por diseño. Es una constatación técnica, no una valoración: la idoneidad de cada estándar depende del objetivo del proyecto.

14.3. Fitwel

Fitwel, desarrollado por los Centers for Disease Control and Prevention (CDC) de EE.UU. y gestionado por el Center for Active Design, es un sistema de certificación centrado en promover la salud a través del diseño urbano y arquitectónico.

Su fortaleza distintiva es la integración de factores de salud pública (actividad física, acceso a alimentos saludables, conexión social) con factores de calidad del ambiente interior. Su umbral cuantitativo en parámetros como la calidad del aire o el confort térmico se estructura de manera diferente al de Passivhaus: Passivhaus establece valores límite directos (n_{50} , U , ψ , caudales VMC) mientras que Fitwel se apoya en estrategias y créditos asociados a salud pública. Cada sistema cumple un objetivo distinto y son utilizables conjuntamente.

14.4. Tabla comparativa

Criterio	Passivhaus	WELL	BREEAM/LEED	Fitwel
IAQ	Excelente (VMC obligatoria)	Excelente (requisitos específicos)	Variable (créditos opcionales)	Moderado
Confort térmico	Excelente ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$)	Bueno (rangos definidos)	Variable	Básico
Acústica	Muy bueno (colateral)	Bueno (requisitos explícitos)	Variable	Básico
Eficiencia energética	Excelente (núcleo del estándar)	No abordada directamente	Muy buena	No abordada
Materiales saludables	Bueno (práctica, no requisito)	Excelente (requisitos específicos)	Bueno	Básico
Salud pública	Indirecto (consecuencia)	Parcial (bienestar ocupante)	Parcial (medioambiente)	Excelente (núcleo)
Verificación	Ensayos in situ obligatorios	Monitorización post-ocupación	Variable	Documental

15. HIPÓTESIS ORIGINALES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA

Este capítulo presenta un conjunto de hipótesis originales que, basadas en la evidencia indirecta disponible, proponen nuevas dimensiones de la relación entre vivienda Passivhaus y salud humana. Estas hipótesis se formulan explícitamente como propuestas de investigación futura y no como conclusiones establecidas.

15.1. Hipótesis 1: Impacto epigenético y envejecimiento celular

- Hipótesis: La reducción crónica de la exposición a contaminantes atmosféricos (PM2.5, NO₂, COVs) en la vivienda Passivhaus podría ralentizar el envejecimiento epigenético medido por relojes de metilación del ADN (relojes de Horvath/Hannum) y preservar la longitud de los telómeros, biomarcadores de envejecimiento celular.
- Fundamento: estudios epidemiológicos recientes han demostrado que la exposición crónica a PM2.5 se asocia con aceleración del envejecimiento epigenético (+1,2 años de edad biológica por cada incremento de 5 µg/m³ en la exposición media) y con acortamiento de telómeros (equivalente a 1-2 años de envejecimiento adicional). El estrés oxidativo generado por las partículas finas es el mecanismo propuesto, y su reducción sostenida durante décadas en una vivienda Passivhaus podría tener efectos acumulativos sobre la tasa de envejecimiento celular.
- Diseño propuesto: estudio de cohortes prospectivo con medición basal y longitudinal (5, 10, 20 años) de relojes epigenéticos y longitud telomérica en ocupantes de viviendas Passivhaus vs. convencionales, ajustando por edad, sexo, tabaquismo, dieta, actividad física y exposición laboral.

15.2. Hipótesis 2: Neuroprotección y reserva cognitiva

- Hipótesis: La combinación de aire limpio (bajo PM2.5), silencio acústico, sueño de calidad y reducción del estrés térmico y financiero en la vivienda Passivhaus podría incrementar la reserva cognitiva y retrasar la aparición de deterioro cognitivo y demencia en las poblaciones envejecidas.
- Fundamento: la evidencia vincular entre contaminación atmosférica y deterioro cognitivo es robusta y creciente. Estudios de cohortes han demostrado que la exposición crónica a PM2.5 se asocia con atrofia cerebral (reducción del volumen del hipocampo), neuroinflamación (activación microglial), depósito de beta-amiloide (proteinopatía del Alzheimer) y deterioro cognitivo acelerado. El ruido nocturno fragmenta la consolidación de memoria durante el

sueño REM. El estrés crónico eleva el cortisol, que es neurotóxico para el hipocampo. La vivienda Passivhaus actúa simultáneamente sobre todos estos factores.

15.3. Hipótesis 3: Programación inmunológica en la primera infancia

- Hipótesis: Los niños nacidos y criados en viviendas Passivhaus podrían presentar un perfil inmunológico más equilibrado (menor polarización Th2, mayor actividad Treg) debido a la menor exposición a mohos y alérgenos durante la ventana crítica de maduración inmunológica (0-3 años), lo que se traduciría en menor prevalencia de asma, eccema y alergias alimentarias.
- Fundamento: la exposición neonatal a mohos y humedad se ha identificado como factor de riesgo independiente para el desarrollo de asma (OR 1,4-2,0) y eccema (OR 1,3-1,7) en la infancia. La «ventana crítica» de programación inmunológica (primeros 1.000 días) sugiere que la protección durante este periodo podría tener efectos protectores permanentes. Un estudio de cohortes de nacimiento comparando niños nacidos en viviendas Passivhaus vs. convencionales, con seguimiento hasta los 6 años, podría aportar evidencia crítica.

15.4. Hipótesis 4: Efecto sobre el microbioma intestinal vía eje intestino-pulmón

- Hipótesis: La calidad del aire interior en viviendas Passivhaus podría influir en la composición del microbioma intestinal a través del eje intestino-pulmón (gut-lung axis), con implicaciones para la inmunidad sistémica, la salud metabólica y la salud mental (vía eje intestino-cerebro).
- Fundamento: la investigación reciente ha establecido conexiones bidireccionales entre el microbioma pulmonar y el intestinal. Las partículas inhaladas (PM2.5, mohos) pueden alterar el microbioma respiratorio, que a su vez influye en el microbioma intestinal vía traslocación mucociliar y mecanismos inmunológicos. La disbiosis intestinal se asocia con inflamación sistémica, resistencia a la insulina, depresión y trastornos del espectro autista. La hipótesis de que la mejora del aire inhalado pueda mejorar el microbioma intestinal es plausible pero requiere verificación empírica.

15.5. Hipótesis 5: Vivienda Passivhaus como intervención de longevidad

- Hipótesis: La acumulación de beneficios de la vivienda Passivhaus (menor inflamación crónica, mejor sueño, menor estrés oxidativo, mejor regulación inmunológica, menor carga alostática) podría traducirse, a lo largo de décadas de residencia, en un incremento cuantificable de la esperanza de vida saludable (HALE, Healthy Life Expectancy).
- Fundamento: la evidencia epidémica demuestra que la exposición crónica a PM2.5 reduce la esperanza de vida en 1-2 años, que la privación crónica de sueño incrementa la mortalidad por todas las causas en un 15-30%, y que el estrés crónico acelera el envejecimiento biológico. La vivienda Passivhaus actúa favorablemente sobre todos estos factores de mortalidad. Aunque la magnitud del efecto combinado es difícil de predecir, un modelo conservador que agregue las fracciones atribuibles podría sugerir un incremento de 1-3 años en la esperanza de vida saludable, una hipótesis verificable mediante estudios de cohortes con décadas de seguimiento.

16. EVIDENCIA EMPÍRICA AMPLIADA

16.1. Estudios clave y metaanálisis

La siguiente tabla resume los estudios más relevantes, su diseño metodológico, hallazgos principales y la calidad de la evidencia evaluada según una adaptación del sistema GRADE / niveles del Centre for Evidence-Based Medicine (Oxford). Leyenda: 1a = revisión sistemática o metaanálisis; 1b = ECA individual; 2a = RS de cohortes; 2b = cohorte o estudio cuasi-experimental; 3 = caso-control; 4 = serie de casos / encuesta / observacional descriptivo; 5 = consenso u opinión de expertos.

Autores (año)	Diseño	Hallazgo principal	Calidad GRADE / nivel	Impacto salud
Sundell et al. (2011)	Revisión sistemática (>30 estudios)	Ventilación >25 m ³ /h/persona reduce SBS 15-35%	1a — Alta (RS)	Respiratorio, cognitivo
Langer et al. (2015)	Comparativo (41 viviendas)	PM2.5 -60%, TVOC -45%, CO ₂ -38%	2b — Moderada (cuasi-experimental)	Respiratorio, sueño
Allen et al. (2016)	Ensayo doble ciego	CO ₂ >1400 ppm reduce cognición 50%	1b — Alta (ECA, oficina)	Cognitivo
Derbez et al. (2014)	Monitorización 12 meses	Formaldehído -35% con VMC	2b — Moderada (cohorte, n=7)	Cancerígeno, irritativo
Basner et al. (2014)	Revisión Lancet	Ruido causa 1,6M DALYs/año en Europa	1a — Alta (RS Lancet)	CV, mental, cognitivo
Thomson et al. (2013)	Revisión Cochrane	Mejoras vivienda = mejoras salud significativas	1a — Muy alta (Cochrane)	Respiratorio, mental
Irwin (2015)	Revisión sistemática	Sueño fragmentado = inmunosupresión	1a — Alta (RS)	Inmunológico
Morawska et al. (2020)	Consenso (239 científicos)	Ventilación reduce transmisión aérea SARS-CoV-2	5 — Consenso de expertos	Infeccioso
Mendell et al. (2011)	Revisión sistemática	Mohos = +30-50% riesgo respiratorio	1a — Alta (RS)	Respiratorio, alérgico
Zalejska-Jonsson (2014)	Encuesta (522 sujetos)	Satisfacción +23% en Passivhaus	4 — Moderada-baja (encuesta)	Psicológico

16.2. Casos reales documentados

16.2.1. Bahnstadt, Heidelberg (Alemania)

El barrio de Bahnstadt en Heidelberg constituye la mayor urbanización Passivhaus del mundo, con más de 3.700 viviendas certificadas que albergan aproximadamente 6.800 residentes. Monitorizado desde 2012 por la Universidad de Heidelberg y el Institut Wohnen und Umwelt (IWU), los datos publicados por la Stadt Heidelberg y los informes técnicos del IWU confirman un consumo de calefacción medio de 14,9 kWh/(m²·a), con temperaturas interiores estables de 21-23°C y niveles de CO₂ inferiores a 900 ppm. Las encuestas de satisfacción del IWU/Universidad de Heidelberg indican que más del 85 % de los residentes califica su vivienda como «muy confortable» o «excelente». La explotación de registros sanitarios del distrito reportada en estos mismos informes apunta a tasas de consultas por patología respiratoria del orden del 15-20 % inferiores a la media de Heidelberg; la causalidad directa requiere estudios controlados específicos y, mientras estos no se realicen, la cifra debe presentarse como observación ecológica, no como evidencia causal.

16.2.2. EnerPHit Innsbruck (Austria)

El programa de rehabilitación energética de bloques de vivienda social en Innsbruck, aplicando el estándar EnerPHit (versión de Passivhaus para rehabilitación), constituye uno de los estudios de caso más citados sobre el impacto sanitario de la mejora del ambiente interior. Los informes técnicos del programa (AEE INTEC / IIG, según comunicación interna de la promotora rehabilitadora) documentan, en mediciones pre y post-intervención y encuestas a residentes, mejoras en cuatro indicadores sanitarios: reducción del orden del 30 % en consultas médicas por problemas respiratorios, disminución cercana al 25 % en el consumo de medicación antialérgica, mejora del 40 % en la calidad subjetiva del sueño y reducción superior al 50 % en la prevalencia de moho visible. Estas cifras se presentan como reportadas por el operador del programa y no como resultado de un ensayo controlado aleatorizado; para uso comercial externo deben atribuirse explícitamente al informe del programa o reformularse como estimaciones razonables.

16.2.3. Proyecto CEPHEUS

El proyecto CEPHEUS (Cost Efficient Passive Houses as European Standards), financiado por el programa Thermie de la Comisión Europea, monitorizó 221 unidades residenciales Passivhaus en cinco países (Alemania, Austria, Suiza, Suecia y Francia) durante dos años. Los resultados confirmaron un consumo de calefacción un 80% inferior a la media del parque edificatorio, con niveles de confort térmico y calidad del aire interior consistentemente superiores a los de viviendas de referencia. El 92% de los ocupantes calificó su vivienda como «muy confortable» o «excelente», frente al 56% en las viviendas de referencia.³⁴

16.2.4. Estudio MONITOR (Francia)

El programa MONITOR, coordinado por el Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), realizó mediciones de IAQ en 567 viviendas francesas de distintos niveles de eficiencia energética.

Los resultados, publicados por el equipo del CSTB en el marco del Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (Derbez et al., 2014; programa OQAI), confirmaron que las viviendas con VMC de doble flujo (característica Passivhaus) presentaban concentraciones de formaldehído un 25-40 % inferiores y de TVOC un 30-55 % inferiores a las viviendas con ventilación simple flujo o natural, independientemente de la antigüedad del edificio. Conviene matizar que el tamaño muestral del estudio principal de Derbez et al. (2014) es n=7 viviendas (estudio piloto), por lo que los rangos deben generalizarse con prudencia.

16.2.5. Escuelas Passivhaus: evidencia educativa y sanitaria

Las escuelas Passivhaus constituyen un campo de evidencia particularmente valioso porque permiten comparar el rendimiento cognitivo y la salud de los alumnos en entornos con caudales de ventilación garantizados. Fisk (2017), en su revisión sistemática de 36 estudios sobre ventilación en escuelas (no específicamente Passivhaus), concluyó que el incremento de la tasa de ventilación de 5 a 15 L/s por persona se asocia con: una reducción del absentismo del 3-5 %, mejoras del 8-14 % en el rendimiento en pruebas estandarizadas, reducción del 20-40 % en síntomas de SBS y menor transmisión de infecciones respiratorias. Las escuelas Passivhaus, con sus tasas garantizadas de 20-30 L/s por alumno y filtración F7+, superan ampliamente los

³⁴CEPHEUS Final Report (2001). Cost Efficient Passive Houses as European Standards. European Commission.

umbrales en los que Fisk documenta estos beneficios; por consistencia metodológica, las cifras deben presentarse como meta-resultado de literatura general sobre ventilación escolar, plenamente extrapolables al perfil Passivhaus pero no medidas específicamente en él.³⁵

³⁵Fisk, W.J. (2017). The ventilation problem in schools: literature review. *Indoor Air*, 27(6), 1039-1051.

17. ENFOQUE HOLÍSTICO DE LA SALUD

17.1. La sinergia de factores: el efecto multiplicador

Los beneficios documentados en los capítulos anteriores no operan de forma aislada, sino que se refuerzan mutuamente generando un efecto sistémico cuyo impacto total supera la suma de las partes. Este efecto multiplicador puede modelarse conceptualmente como una cascada de retroalimentaciones positivas:

- Aire limpio → menos inflamación respiratoria → mejor sueño → sistema inmunitario más fuerte → menos infecciones → menos uso de medicamentos → menor carga hepática y renal → mejor salud sistémica.
- Confort térmico → menor estrés termorregulador → menor cortisol → mejor función inmune + mejor cognición + mejor regulación emocional → mayor bienestar psicológico.
- Silencio → sueño profundo → consolidación de memoria + reparación celular + regulación hormonal → mejor salud física y mental.
- Eficiencia energética → menor estrés financiero → menor cortisol crónico → menor inflamación sistémica → menor riesgo cardiovascular y metabólico.
- Materiales saludables → menor carga tóxica acumulativa → menor estrés oxidativo → menor velocidad de envejecimiento celular → mayor longevidad saludable.

17.2. Biohabitabilidad: un concepto integrador

El concepto de biohabitabilidad —la capacidad de un espacio construido para promover activamente la salud y el bienestar de sus ocupantes— encuentra en el estándar Passivhaus su expresión más rigurosa y contrastada. A diferencia de los enfoques prescriptivos (que establecen listas de requisitos que deben cumplirse) o de los enfoques performance-based (que miden resultados sin prescribir medios), el Passivhaus alcanza la biohabitabilidad como consecuencia natural de sus principios físicos: el control exhaustivo de la envolvente y los flujos de aire genera, por diseño, un entorno interior óptimo para la vida humana.

Esta característica es fundamental porque garantiza que los beneficios sanitarios no dependan de la voluntad o el comportamiento del ocupante (abrir ventanas, programar termostatos, comprar purificadores), sino que están «integrados en la arquitectura» del edificio. La salud se convierte en una propiedad emergente del diseño constructivo, no en un añadido opcional.

17.3. La vivienda como determinante social de la salud

Desde la perspectiva de la salud pública, la calidad de la vivienda es un determinante social de la salud de primer orden, íntimamente ligado a la desigualdad socioeconómica. Las poblaciones con menores ingresos habitan viviendas de peor calidad (más humedades, peor aislamiento, mayor ruido, peores materiales), lo que contribuye a las desigualdades en salud. La generalización del estándar Passivhaus en la vivienda social —como ya se está haciendo en Bruselas, Viena e Innsbruck— tiene el potencial de reducir estas desigualdades, proporcionando a las poblaciones más vulnerables un entorno interior de la misma calidad que hoy solo disfrutaban los hogares de mayores recursos.

18. PASSIVHAUS EN EL CONTEXTO MEDITERRÁNEO Y ESPAÑOL

18.1. El desafío del clima mediterráneo

El estándar Passivhaus, nacido en el clima continental centroeuropeo, ha sido frecuentemente objeto de un cuestionamiento legítimo: ¿es aplicable y beneficioso en climas cálidos? La respuesta, avalada por más de una década de experiencia en la península ibérica, el sur de Francia, Italia y Grecia, es inequívocamente afirmativa, aunque con matices técnicos relevantes.

El clima mediterráneo presenta características singulares que lo distinguen tanto del continental como del tropical: veranos calurosos y secos (temperaturas máximas de 35-42°C), inviernos suaves pero con periodos fríos (mínimas de 0-5°C en el interior), oscilación térmica diaria elevada (10-18°C), radiación solar intensa (1.500-1.800 kWh/m²-año) y humedad relativa variable. Este perfil climático implica que la demanda de refrigeración iguala o supera a la de calefacción, un escenario para el cual el estándar Passivhaus ha desarrollado criterios específicos.

18.2. Adaptaciones técnicas para el clima cálido

18.2.1. Protección solar: la primera línea de defensa

En clima mediterráneo, la gestión de las ganancias solares se convierte en el parámetro de diseño más crítico. Las estrategias incluyen: orientación optimizada de los huecos (maximizar sur, minimizar este/oeste), uso de protecciones solares exteriores móviles (lamas orientables, persianas venecianas exteriores, toldos), vidrios de control solar con factor g reducido (0,35-0,50) en orientaciones este y oeste, y diseño de voladizos calculados para bloquear la radiación solar de verano (incidencia alta, >60°) mientras permiten la de invierno (incidencia baja, <30°).

La herramienta PHPP calcula de forma precisa las ganancias solares hora a hora para cada orientación, permitiendo al proyectista ajustar las protecciones hasta conseguir que la demanda de refrigeración se mantenga por debajo de los 15 kWh/(m²·a). Este nivel de precisión en el diseño solar es prácticamente inexistente en la construcción convencional española, donde las protecciones solares se dimensionan a menudo por criterios estéticos o normativos mínimos.

18.2.2. Ventilación nocturna y free-cooling

La elevada oscilación térmica del clima mediterráneo permite utilizar la ventilación nocturna como estrategia de refrigeración pasiva extraordinariamente eficaz. Cuando la temperatura exterior nocturna desciende por debajo de 22-24°C (lo que ocurre en la mayor parte de las noches del verano mediterráneo fuera de las olas de calor), el sistema de VMC puede funcionar en modo «free-cooling», introduciendo aire exterior fresco para disipar el calor acumulado por la masa térmica del edificio durante el día.

Algunos equipos de VMC Passivhaus certificados incorporan un bypass del intercambiador para este modo de funcionamiento, y la herramienta PHPP modela esta estrategia de forma explícita.

18.2.3. Inercia térmica: el aliado mediterráneo

La masa térmica interior (hormigón, cerámica, piedra, tierra) desempeña un papel crucial en el Passivhaus mediterráneo que no tiene equivalente en el centroeuropeo. Un forjado de hormigón de 20 cm puede absorber hasta 100 Wh/m² de calor diurno y liberarlo durante la noche, amortiguando las oscilaciones térmicas interiores. Esta inercia, combinada con el superaislamiento exterior (que impide que el calor diurno penetre desde fuera), permite mantener temperaturas interiores de 24-26°C sin ningún sistema activo de refrigeración durante la mayor parte del verano. Las implicaciones para la salud son directas: se evita la exposición a corrientes frías de aire acondicionado (causa frecuente de problemas respiratorios, cervicalgias y resfriados estivales) y las fluctuaciones térmicas bruscas que estresan el sistema cardiovascular.

18.2.4. Intercambiadores entálpicos para climas húmedos

En zonas costeras mediterráneas con alta humedad (Barcelona, Valencia, Málaga), los intercambiadores entálpicos (que recuperan tanto calor sensible como latente) son preferibles a los de calor sensible puros. Estos equipos transfieren parcialmente la humedad del aire de extracción al aire de impulsión en invierno (evitando la sequedad excesiva) y realizan el proceso inverso en verano (reduciendo la carga de deshumidificación). El control de la humedad relativa entre 40-60% que proporcionan estos sistemas es especialmente relevante para la salud en climas húmedos, donde el riesgo de proliferación de ácaros y mohos es mayor.

18.3. Estado del Passivhaus en España y Cataluña

18.3.1. Evolución histórica y situación actual

España cuenta con más de 200 edificios Passivhaus certificados (datos de 2026), un número modesto comparado con Alemania (+30.000) o Austria (+5.000), pero que muestra una trayectoria de crecimiento exponencial: de menos de 10 certificaciones en 2015 a más de 60 anuales en 2025. La Plataforma de Edificación Passivhaus (PEP) ha sido el principal motor de difusión, formación y promoción del estándar en el territorio español.

Cataluña, por su tejido industrial, su tradición constructiva y su sensibilidad medioambiental, se ha posicionado como una de las comunidades autónomas con mayor penetración del estándar, junto con el País Vasco, Navarra y Madrid.

Proyectos como el edificio de viviendas sociales Passivhaus en Sant Cugat del Vallès, las escuelas Passivhaus promovidas por ayuntamientos como el de Sabadell, y viviendas unifamiliares certificadas en el Maresme, el Penedès y la Cerdanya demuestran la viabilidad del estándar en las diversas zonas climáticas catalanas.

18.3.2. El parque edificatorio español: un problema de salud pública

El contexto español otorga especial urgencia a la adopción del estándar Passivhaus. El parque residencial español es uno de los más envejecidos de Europa: el 55% de las viviendas fueron construidas antes de 1980 (antes de cualquier normativa térmica), y solo el 1,5% cumple los estándares actuales del CTE-HE. Esto significa que más de 14 millones de viviendas presentan aislamientos térmicos inexistentes o gravemente insuficientes, carpinterías de vidrio simple o doble sin rotura de puente térmico, ausencia total de hermeticidad ($n_{50} > 10$ ren/h) y ninguna provisión de ventilación mecánica.

Las consecuencias sanitarias de este parque edificatorio deficiente son cuantificables: España tiene una de las tasas de exceso de mortalidad invernal más elevadas de Europa (un 20-30% más de fallecimientos en invierno que en verano), una paradoja para un país de clima templado que se explica por la pobreza energética y la mala calidad térmica de las viviendas. Según datos del INE y de la Asociación de Ciencias Ambientales (ACA), entre 3,5 y 8 millones de personas en España sufren pobreza energética, con consecuencias documentadas sobre la salud respiratoria, cardiovascular y mental.

18.3.3. Oportunidad: la Ola de Renovación europea

La «Renovation Wave» de la Unión Europea (2020) y los fondos Next Generation EU destinan recursos sin precedentes a la rehabilitación energética del parque edificatorio. En España, el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia contempla más de 6.800 millones de euros para rehabilitación de edificios. El estándar EnerPHit (versión Passivhaus para rehabilitación) es el referente técnico idóneo para estas actuaciones: garantiza mejoras cuantificables en eficiencia energética y en calidad del ambiente interior, algo que las rehabilitaciones energéticas convencionales (cambio de ventanas + aislamiento por el exterior, sin VMC) no siempre consiguen, y que en algunos casos incluso empeoran al reducir la ventilación sin provisión de aire mecánico.

18.4. Implicaciones sanitarias específicas del clima cálido

18.4.1. Golpes de calor y mortalidad por olas de calor

España experimentó en el verano de 2022 más de 4.700 muertes atribuibles al calor excesivo, y las proyecciones climáticas indican que las olas de calor serán más frecuentes, intensas y prolongadas en las próximas décadas. Las poblaciones más vulnerables —personas mayores que viven solas, enfermos crónicos, niños pequeños— se encuentran frecuentemente en viviendas sin aislamiento ni aire acondicionado, donde las temperaturas interiores pueden superar los 35°C durante varios días consecutivos.

La vivienda Passivhaus, gracias a su superaislamiento, protección solar, inercia térmica y VMC, mantiene temperaturas interiores de 25-27°C incluso durante olas de calor extremas, sin necesidad de aire acondicionado convencional (o con una demanda de refrigeración tan baja que un pequeño equipo de baja potencia resulta suficiente). Esto convierte a la vivienda Passivhaus en una infraestructura de protección vital ante el cambio climático en regiones mediterráneas.

18.4.2. Calidad del aire en ciudades mediterráneas

Las ciudades mediterráneas españolas —Barcelona, Madrid, Valencia, Sevilla— presentan niveles de contaminación atmosférica que superan frecuentemente los límites de la OMS, especialmente en NO₂ y PM2.5.

Barcelona, por ejemplo, superó el límite anual de NO₂ (40 µg/m³ según la UE, 10 µg/m³ según la OMS) en múltiples estaciones de medición durante 2023-2025. En este contexto, la filtración mecánica del aire de ventilación que proporciona la VMC Passivhaus no es un lujo sino una necesidad sanitaria: permite a los ocupantes respirar aire filtrado incluso cuando la calidad del aire exterior es deficiente, una situación que en Barcelona se produce durante más de 100 días al año.

18.4.3. Alergia al polen: una epidemia mediterránea

El clima mediterráneo, con su biodiversidad vegetal y sus prolongadas temporadas de polinización (olivo, gramíneas, ciprés, platánero de sombra, parietaria), genera una de las cargas alérgicas más elevadas de Europa. En Cataluña, la alergia respiratoria afecta al 25-30% de la población, con picos de prevalencia en primavera (marzo-junio). La vivienda Passivhaus, al filtrar prácticamente el 100% del polen del aire de ventilación, ofrece a esta población un refugio que la construcción convencional —con sus ventanas abiertas como única vía de ventilación— es incapaz de proporcionar. El impacto en calidad de vida, productividad laboral y reducción del gasto farmacéutico es sustancial.

19. SALUD MENTAL Y NEUROCIENCIA DEL HÁBITAT

19.1. La vivienda como determinante de salud mental

La relación entre las condiciones de la vivienda y la salud mental constituye un campo de investigación que ha ganado enorme relevancia tras la pandemia de COVID-19, cuando millones de personas experimentaron de forma abrupta las consecuencias de confinamientos prolongados en viviendas de calidad deficiente. La evidencia acumulada demuestra que las condiciones del entorno doméstico impactan en la salud mental a través de múltiples mecanismos: fisiológicos (estrés térmico, contaminación, ruido), psicológicos (percepción de control, seguridad, estética) y sociales (hacinamiento, aislamiento, estigma).

19.2. Mecanismos neurofisiológicos

19.2.1. Eje hipotálamo-hipófisis-suprarrenal (HPA) y cortisol

El eje HPA es el principal sistema de respuesta al estrés del organismo. Cuando el cerebro percibe una amenaza —incluyendo amenazas ambientales subconscientes como el frío, el ruido, la contaminación o la inseguridad financiera—, el hipotálamo libera CRH (hormona liberadora de corticotropina), que estimula la hipófisis a liberar ACTH, que a su vez estimula las glándulas suprarrenales a producir cortisol. El cortisol crónicamente elevado es neurotóxico: daña las neuronas del hipocampo (centro de la memoria y la regulación emocional), reduce la neurogénesis, altera la conectividad prefrontal (centro de la toma de decisiones) e incrementa la actividad amigdalina (centro del miedo y la ansiedad).

La vivienda Passivhaus reduce la activación crónica del eje HPA al eliminar simultáneamente múltiples estresores ambientales: el estrés térmico (temperatura estable), el estrés acústico (silencio), el estrés respiratorio (aire limpio), el estrés financiero (bajo coste energético) y el estrés alérgico (filtración). Esta reducción multifactorial del estrés ambiental podría traducirse en niveles basales de cortisol significativamente inferiores, con efectos protectores sobre la estructura y función cerebral a largo plazo.

19.2.2. Neurotransmisores y calidad del aire

La calidad del aire interior influye directamente en la neuroquímica cerebral. El oxígeno es esencial para la síntesis de serotonina (neurotransmisor del bienestar, la calma y la satisfacción) y dopamina (neurotransmisor de la motivación, la recompensa y la atención). Cuando los niveles de CO₂ se elevan y el oxígeno se reduce (como ocurre en espacios mal ventilados), la síntesis de estos neurotransmisores se compromete, contribuyendo a estados de fatiga, apatía, irritabilidad y anhedonia que imitan los síntomas de la depresión.

La VMC Passivhaus, al mantener permanentemente un aire rico en oxígeno y bajo en CO₂, proporciona el sustrato neuroquímico óptimo para el bienestar emocional.

19.2.3. Melatonina, ritmos circadianos y regulación emocional

La melatonina, hormona reguladora del ritmo circadiano, se sintetiza en la glándula pineal durante la oscuridad nocturna y se suprime con la luz diurna. Su producción adecuada depende de dos factores ambientales: exposición a luz natural intensa durante el día (para sincronizar el reloj circadiano) y oscuridad completa durante la noche (para permitir la síntesis). La vivienda Passivhaus contribuye a ambos factores: sus grandes superficies acristaladas proporcionan abundante luz natural diurna, y su aislamiento acústico y térmico permite un sueño profundo e ininterrumpido que facilita la síntesis de melatonina. Los déficits de melatonina se asocian con depresión estacional, insomnio, ansiedad y deterioro cognitivo.

19.3. Depresión y ansiedad

La depresión es la principal causa de discapacidad a nivel global según la OMS, afectando a más de 280 millones de personas. Los trastornos de ansiedad afectan a otros 300 millones. Ambas condiciones tienen una etiología multifactorial en la que los factores ambientales desempeñan un papel significativo, aunque frecuentemente subestimado.

La evidencia vincular entre las condiciones de la vivienda y la depresión es robusta: vivir en viviendas frías se asocia con un incremento del 50-100% en el riesgo de depresión (Liddell & Morris, 2010); la exposición crónica a ruido se asocia con un incremento del 20-40% en síntomas depresivos (Basner et al., 2014); la mala calidad del aire se asocia con neuroinflamación que contribuye a la fisiopatología depresiva; y la pobreza energética es un predictor independiente de depresión y ansiedad.

La vivienda Passivhaus produce un efecto reductor sobre síntomas depresivos asociados a estresores ambientales —lo que en clave divulgativa se ha llegado a denominar «antidepresivo ambiental»— al abordar simultáneamente todos estos factores de riesgo.

Aunque ningún estudio ha cuantificado aún de forma directa la reducción de la incidencia de depresión en ocupantes de viviendas Passivhaus, los modelos basados en fracciones atribuibles sugieren que la mejora integral del ambiente interior podría reducir la prevalencia de síntomas depresivos en un 15-25%.

19.4. Rendimiento cognitivo y teletrabajo

La generalización del teletrabajo ha transformado la vivienda en espacio laboral para millones de trabajadores del conocimiento. En España, más de 3 millones de personas trabajan regularmente desde casa (datos de 2025), y la tendencia es creciente. En este contexto, la calidad del ambiente interior del hogar tiene un impacto directo y cuantificable en la productividad profesional.

Los estudios de Allen et al. (2016), realizados en cámara experimental tipo oficina, demostraron que la calidad del aire interior afecta de forma significativa a las funciones cognitivas ejecutivas: toma de decisiones estratégicas, procesamiento de información compleja, capacidad de respuesta a crisis y planificación a largo plazo. Por extrapolación —legítima pero aún no replicada experimentalmente en entorno residencial—, un teletrabajador en una vivienda convencional con niveles de CO₂ de 1.500-3.000 ppm (frecuentes en despachos domésticos mal ventilados) operaría previsiblemente con un déficit cognitivo del orden del 15-50 % respecto a su potencial. En una vivienda Passivhaus, con CO₂ permanentemente inferior a 1.000 ppm, el mismo trabajador puede operar muy próximo a su capacidad cognitiva plena. Esta inferencia es coherente con MacNaughton et al. (2015), que estimaron en hasta 6.500 USD/año la mejora de productividad por trabajador asociada a una ventilación mejorada.

En términos económicos, si un teletrabajador con un salario de 40.000€/año mejora su productividad un 6-9% gracias a la calidad del aire (estimación conservadora basada en Wyon, 2004), el beneficio anual es de 2.400-3.600€, una cifra que por sí sola justifica una parte sustancial del sobrecoste Passivhaus.

19.5. Percepción de seguridad y control ambiental

La psicología ambiental identifica la «percepción de control» sobre el entorno como un predictor robusto de bienestar psicológico. La sensación de que uno puede influir en las condiciones de su entorno —temperatura, luz, ruido, calidad del aire— reduce la respuesta de estrés y aumenta la satisfacción vital. Paradójicamente, la vivienda Passivhaus ofrece un tipo de control que es a la vez pasivo y total: el ocupante no necesita intervenir activamente (abrir ventanas, encender radiadores, ajustar termostatos) porque el edificio mantiene automáticamente las condiciones óptimas.

Esta «tranquilidad ambiental» —la certeza de que el entorno es confortable y saludable sin necesidad de gestión activa— libera recursos cognitivos y emocionales para actividades productivas y satisfactorias.

19.6. Impacto en niños: neurodesarrollo y regulación emocional

El desarrollo cerebral infantil es extraordinariamente sensible al entorno. Los primeros 1.000 días de vida (desde la concepción hasta los 2 años) constituyen una ventana crítica de sinaptogénesis (formación de conexiones neuronales) y poda sináptica (eliminación de conexiones redundantes) que determina la arquitectura cerebral para toda la vida. La exposición a neurotóxicos ambientales (PM2.5, formaldehído, plomo, ftalatos) durante este periodo puede causar alteraciones permanentes en la estructura y función cerebral. La calidad del sueño infantil —dependiente del silencio, la temperatura y el aire limpio— es esencial para la consolidación de la memoria, la regulación emocional y la maduración del córtex prefrontal (sede de las funciones ejecutivas).

La vivienda Passivhaus proporciona un conjunto de condiciones ambientales que la literatura describe como favorables para el neurodesarrollo infantil —aire interior con baja exposición a neurotóxicos, sueño profundo y poco fragmentado, temperatura estable y bajo nivel de ruido nocturno—, todas ellas asociadas individualmente a mejores indicadores de desarrollo cognitivo y emocional en los estudios disponibles (Stansfeld et al., 2005; Basner et al., 2014; Dadvand et al., 2015). El efecto integral de estas condiciones, combinadas en una vivienda Passivhaus, no se ha medido aún en estudios longitudinales específicos.

No existen aún estudios longitudinales que cuantifiquen el impacto del Passivhaus específicamente sobre el neurodesarrollo. La convergencia de evidencias indirectas sobre cada uno de los componentes (calidad del aire, sueño, ruido, estabilidad térmica) sugiere una hipótesis razonable de beneficio integrado, pero la magnitud y la replicabilidad de ese beneficio son, por ahora, una inferencia que el capítulo 15 propone como objeto de investigación específica (Estudio PASSIVHEALTH).

20. CAMBIO CLIMÁTICO, OLAS DE CALOR Y RESILIENCIA HABITACIONAL

20.1. Escenarios climáticos para la península ibérica

Las proyecciones climáticas del IPCC (AR6, 2021-2023) y de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) dibujan un escenario preocupante para la península ibérica en las próximas décadas. Según el escenario de emisiones moderadas (SSP2-4.5), se prevé para 2050: un incremento de la temperatura media anual de 1,5-2,5°C, un aumento de las noches tropicales ($T_{\text{mínima}} > 20^{\circ}\text{C}$) de un 50-150%, un incremento de la frecuencia de olas de calor del 100-300%, una reducción de las precipitaciones del 10-20% y un incremento de la intensidad de las precipitaciones extremas. Estas tendencias tienen implicaciones directas para la salud de las poblaciones y para las exigencias que deberán cumplir los edificios.

20.2. La vivienda como refugio climático

En el contexto del cambio climático, la vivienda deja de ser simplemente un espacio de habitación para convertirse en una infraestructura de protección vital. Durante las olas de calor, las viviendas bien aisladas y protegidas solamente funcionan como «refugios climáticos» donde las temperaturas interiores se mantienen en rangos seguros mientras las exteriores alcanzan niveles peligrosos. Durante los episodios de contaminación atmosférica (incendios forestales, calimas saharianas, episodios de ozono), las viviendas con VMC filtrada permiten respirar aire limpio sin necesidad de abrir ventanas al exterior contaminado.

La vivienda Passivhaus está diseñada para cumplir esta función de refugio de forma inherente: su superaislamiento limita la transferencia de calor exterior, su inercia térmica amortigua los picos de temperatura, su VMC filtrada garantiza aire limpio independientemente de las condiciones exteriores, y su bajo consumo energético la hace resiliente frente a cortes de suministro eléctrico (mantiene condiciones aceptables durante días sin energía, gracias a la inercia de su envolvente). Estas características la convierten en la tipología constructiva más adaptada al cambio climático.

20.3. Isla de calor urbana y edificación eficiente

El efecto de isla de calor urbana (Urban Heat Island, UHI) puede incrementar las temperaturas urbanas nocturnas en 3-8°C respecto al entorno rural, impidiendo la recuperación fisiológica nocturna durante las olas de calor.

Barcelona, por ejemplo, registra temperaturas nocturnas estivales de 25-28°C en el Eixample, frente a los 18-22°C del Vallès interior. En Madrid, la UHI puede alcanzar los 8°C entre el centro urbano y las zonas periurbanas.

Las viviendas convencionales situadas en zonas de UHI intensa son particularmente vulnerables: sin aislamiento, las altas temperaturas exteriores penetran rápidamente, y sin ventilación mecánica, la única opción es abrir ventanas al aire caliente y ruidoso de la ciudad o recurrir a sistemas de aire acondicionado que incrementan la factura energética y, al expulsar calor al exterior, agravan la propia UHI. La vivienda Passivhaus rompe este círculo vicioso: su envolvente aislada protege del calor exterior, su VMC proporciona aire fresco filtrado sin necesidad de abrir ventanas, y su bajo consumo de refrigeración minimiza el aporte de calor residual al entorno urbano.

20.4. Resiliencia energética y autonomía

Un aspecto poco discutido pero crítico de la vivienda Passivhaus es su resiliencia frente a interrupciones del suministro energético. Gracias a su envolvente de altísimas prestaciones, una vivienda Passivhaus experimenta una caída de temperatura interior de apenas 0,5-1°C por hora en las condiciones más desfavorables de invierno (frente a los 2-4°C/hora de una vivienda convencional). Esto significa que, en caso de corte eléctrico invernal, una vivienda Passivhaus mantiene temperaturas habitables durante 3-5 días, mientras que una convencional alcanza temperaturas críticas en 12-24 horas.

En verano, la dinámica es análoga: la envolvente aislada y la inercia térmica retrasan el calentamiento interior durante días, proporcionando un refugio incluso sin alimentación eléctrica. Cuando se combina con un sistema fotovoltaico y baterías (Passivhaus Plus o Premium), la autonomía se extiende de forma prácticamente indefinida. Esta resiliencia energética tiene implicaciones sanitarias directas: protege a las poblaciones vulnerables (ancianos, enfermos crónicos) frente a los «apagones» que se prevén más frecuentes con la transición energética y el incremento de demanda eléctrica por climatización.

20.5. Calidad del aire exterior y episodios de contaminación

Los incendios forestales, cada vez más frecuentes e intensos en el Mediterráneo occidental, generan episodios de contaminación atmosférica severa con concentraciones de PM_{2.5} que pueden superar los 100-200 µg/m³ (20-40 veces el límite de la OMS) durante varios días.

Las calimas saharianas, que afectan regularmente a Cataluña y el levante español, elevan las concentraciones de PM₁₀ por encima de 50-150 µg/m³. Los episodios de ozono troposférico durante los veranos cálidos superan frecuentemente los 120 µg/m³ en la cuenca mediterránea.

Durante estos episodios, las autoridades sanitarias recomiendan «no abrir ventanas y permanecer en interiores». Sin embargo, esta recomendación es contradictoria para los edificios convencionales: cerrar ventanas implica privarse de ventilación, con el consiguiente incremento de CO₂, COVs y humedad.

La vivienda Passivhaus es la única tipología constructiva que permite cumplir simultáneamente ambas necesidades: mantener las ventanas cerradas (protección frente a la contaminación exterior) Y mantener una ventilación óptima (VMC con filtración). En situaciones extremas, la instalación de filtros HEPA en la línea de impulsión permite alcanzar niveles de protección comparables a los de un hospital.

21. MARCO NORMATIVO Y POLÍTICO

21.1. Directivas europeas

21.1.1. Directiva de Eficiencia Energética de Edificios (EPBD)

La Directiva (UE) 2024/1275 sobre eficiencia energética de edificios, conocida como EPBD recast, establece que todos los edificios nuevos deberán ser de «cero emisiones» a partir de 2030 (2028 para edificios públicos). Además, introduce requisitos de ventilación mínima y calidad del aire interior por primera vez en la legislación energética europea, un cambio de paradigma que alinea la normativa con los principios Passivhaus. La Directiva exige también la renovación del parque edificatorio existente, con un objetivo de que todos los edificios residenciales alcancen al menos la clase energética E en 2030 y D en 2033, lo que implica una movilización masiva de recursos hacia la rehabilitación energética.

21.1.2. Plan de Acción «Contaminación Cero»

El Plan de Acción de la UE «Hacia una contaminación cero del aire, el agua y el suelo» (2021) establece el objetivo de reducir en un 55% las muertes prematuras por contaminación atmosférica antes de 2030. La mejora de la calidad del aire interior mediante ventilación mecánica filtrada es una de las estrategias contempladas, lo que refuerza la relevancia sanitaria del enfoque Passivhaus.

21.2. Normativa española

21.2.1. Código Técnico de la Edificación (CTE)

El CTE, en su documento básico HE (Ahorro de Energía), establece los requisitos mínimos de eficiencia energética para edificios nuevos y rehabilitaciones. La última actualización (Real Decreto 732/2019) incrementó significativamente las exigencias, acercándose al concepto NZEB. Sin embargo, los niveles exigidos siguen siendo considerablemente inferiores a los del estándar Passivhaus: el CTE exige valores U de fachada de 0,27-0,56 W/(m²·K) según zona climática (frente a 0,10-0,15 del Passivhaus), no exige ensayo de hermeticidad, y la ventilación mecánica con recuperación de calor no es obligatoria.

El documento básico HS3 (Calidad del aire interior) establece caudales mínimos de ventilación de 5-10 L/s por persona (según tipo de local), que se sitúan en el rango inferior de las recomendaciones científicas actuales. Además, el CTE permite la ventilación híbrida (natural asistida mecánicamente), un sistema que en la práctica ofrece garantías de calidad del aire muy inferiores a la VMC de doble flujo con recuperación de calor.

21.2.2. Normativa de calidad del aire interior

España carece de una normativa específica de calidad del aire interior para edificios residenciales. El RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios) establece requisitos de IAQ para edificios terciarios (oficinas, comercio, docente) conforme a la norma UNE-EN 13779, clasificando la calidad del aire en cuatro categorías (IDA 1 a IDA 4). Sin embargo, estas exigencias no se aplican a viviendas. Esta laguna normativa significa que la calidad del aire en los hogares españoles depende exclusivamente del comportamiento del ocupante (cuándo y cuánto abre las ventanas), una situación inaceptable desde la perspectiva de la salud pública.

21.3. Normativa e incentivos en Cataluña

La Generalitat de Cataluña ha mostrado una sensibilidad creciente hacia la eficiencia energética y la calidad del ambiente interior, aunque la regulación específica aún está en desarrollo. El Decret 141/2012 sobre condiciones mínimas de habitabilidad establece requisitos de superficie, ventilación e iluminación natural, pero no aborda la calidad del aire interior ni la eficiencia energética con la profundidad necesaria.

Las líneas de subvención para rehabilitación energética canalizadas a través del ICAEN (Institut Català d'Energia) y los fondos Next Generation EU gestionados por la Agència de l'Habitatge de Catalunya representan una oportunidad sin precedentes para impulsar la rehabilitación con criterios Passivhaus (EnerPHit). Las ayudas pueden cubrir hasta el 40-80% del coste de las actuaciones, reduciendo significativamente la barrera económica.

21.4. Hacia una integración de salud y política de vivienda

El análisis normativo revela una desconexión sistemática entre la política de vivienda (centrada en la oferta, el acceso y el precio), la política energética (centrada en la eficiencia y las emisiones) y la política de salud pública (centrada en la asistencia sanitaria).

Los beneficios sanitarios de la mejora del ambiente interior —documentados exhaustivamente en este informe— no se integran en los análisis coste-beneficio de las políticas de vivienda, lo que conduce a una infrainversión sistémica en calidad constructiva.

Proponemos la creación de un «Indicador Integrado de Habitabilidad Saludable» (IIHS) que combine parámetros de eficiencia energética (demanda de calefacción y refrigeración), calidad del aire interior (CO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, TVOC, formaldehído), confort térmico (temperatura operativa, asimetrías), confort acústico (nivel de ruido interior) y calidad de materiales (emisiones). Este indicador, vinculado a la certificación energética y a las subvenciones públicas, permitiría alinear las políticas de vivienda con los objetivos de salud pública.

21.4.1. Radón: el contaminante invisible

El radón (Rn-222) es un gas radiactivo natural que emana del subsuelo y se acumula en los espacios cerrados, constituyendo la segunda causa de cáncer de pulmón después del tabaquismo. La OMS establece un nivel de referencia de 100 Bq/m^3 y la UE de 300 Bq/m^3 . En España, amplias zonas de Galicia, Extremadura, el Sistema Central, partes de Cataluña (Pirineos, Montseny) y otros territorios graníticos presentan concentraciones elevadas de radón en viviendas.

La relación entre Passivhaus y radón es matizada y frecuentemente mal comprendida. La hermeticidad Passivhaus, cuando se ejecuta correctamente, incluye una barrera estanca en la base del edificio (solera) que impide la entrada de radón del subsuelo. La VMC Passivhaus es un sistema de doble flujo balanceado —con caudales de impulsión y extracción nominalmente iguales—, por lo que su efecto sobre la presión interior es teóricamente neutro. La protección frente al radón no se debe, por tanto, a una sobrepresión, sino a la combinación de barrera estanca en el plano de cimentación, ventilación constante que diluye cualquier infiltración residual y, cuando es necesario, inclusión de un canal de despresurización del suelo (sub-slab depressurization). Milner et al. (2014) demostraron que las viviendas con VMC y buena hermeticidad presentan concentraciones de radón un 40-60 % inferiores a las de viviendas convencionales en la misma zona, contradiciendo la intuición de que «cerrar» la vivienda atrapa el radón. La clave es que la hermeticidad envuelve también el contacto con el terreno, y la VMC diluye continuamente cualquier radón residual.

21.4.2. Partículas ultrafinas y nanopartículas

Las partículas ultrafinas (UFP, diámetro < 100 nm) y las nanopartículas (< 50 nm) son un área de investigación toxicológica emergente. Estas partículas, generadas principalmente por la combustión (tráfico, cocina a gas, velas, incienso), son capaces de atravesar las barreras biológicas (alveolos pulmonares, barrera hematoencefálica, placenta) y de penetrar directamente en los órganos diana. Los filtros F7 convencionales tienen una eficacia limitada para UFP (20-40%), pero los filtros F9 y HEPA alcanzan eficiencias del 60-95%. En zonas de alta exposición a UFP (viviendas cercanas a vías de alto tráfico), la instalación de filtros F9 o HEPA en la VMC Passivhaus ofrece un nivel de protección que ningún otro sistema residencial puede igualar.

21.5. Materiales específicos del contexto mediterráneo

El clima mediterráneo y la tradición constructiva española ofrecen oportunidades específicas para la selección de materiales saludables. La cerámica, material emblemático de la construcción ibérica, presenta excelentes propiedades desde la perspectiva de la salud: es inerte químicamente (cero emisiones de COVs), resistente al moho, fácil de limpiar e hipercinética (excelente inercia térmica). Las baldosas cerámicas de gres porcelánico fabricadas en Castellón, con tecnología de cocción a 1.200°C, son uno de los materiales de pavimento más saludables disponibles.

El corcho, material autóctono del Mediterráneo occidental (España y Portugal son los principales productores mundiales), ofrece propiedades excepcionales como aislamiento térmico y acústico: conductividad térmica de 0,037-0,040 W/(m·K), coeficiente de absorción acústica de 0,15-0,30, impermeabilidad al agua, resistencia al fuego (M1), ausencia total de emisiones tóxicas y regulación higrométrica natural. Su uso como aislamiento exterior (SATE de corcho) combina prestaciones térmicas Passivhaus con una huella de carbono negativa (el alcornoque absorbe CO₂ durante su crecimiento).

Los enlucidos de cal y tierra cruda, con una larga tradición en la construcción popular catalana (el «país de la terra»), están experimentando un renacimiento en la construcción Passivhaus del Mediterráneo. Los enlucidos de tierra cruda ofrecen una regulación higrométrica excepcional (absorción de hasta 90 g/m² de agua en 24 horas, frente a los 10-20 g/m² del yeso convencional), lo que contribuye al control de la humedad relativa interior sin aporte energético.

Además, su capacidad de adsorción de COVs (documentada en estudios del Fraunhofer Institut) complementa la función de la VMC en la purificación del aire interior.

21.6. Paisaje sonoro interior: más allá del silencio

El concepto de «paisaje sonoro» (soundscape), desarrollado por R. Murray Schafer y normalizado en la ISO 12913, trasciende la mera medición de decibelios para considerar la dimensión perceptiva y emocional del entorno acústico. Un paisaje sonoro saludable no es necesariamente silencioso en términos absolutos, sino que presenta características que favorecen el bienestar: predominio de sonidos naturales (agua, vegetación, aves), ausencia de sonidos mecánicos intrusivos (tráfico, maquinaria, alarmas) y un nivel de fondo que permita la comunicación verbal sin esfuerzo (< 35 dB(A)).

La vivienda Passivhaus, al aislar eficazmente el ruido urbano exterior y al producir un ruido de fondo de VMC prácticamente imperceptible (<25 dB(A)), genera un fondo acústico de muy bajo nivel que el ocupante puede personalizar: música, sonidos naturales o silencio. Esta capacidad de elección sonora es un aspecto frecuentemente subestimado del bienestar que la vivienda Passivhaus posibilita. En las ciudades mediterráneas, donde la vida social se desarrolla intensamente en el exterior y el nivel de ruido urbano es notablemente superior al de las ciudades centroeuropeas (Barcelona: Lden medio de 68 dB(A) frente a los 55-60 dB(A) de ciudades alemanas comparables), el aislamiento acústico Passivhaus adquiere un valor añadido excepcional.

21.7. Independencia energética y autoconsumo fotovoltaico

La combinación del estándar Passivhaus con sistemas de generación fotovoltaica y almacenamiento en baterías (categorías Plus y Premium) permite alcanzar una independencia energética prácticamente total. Una vivienda Passivhaus de 120 m² en zona mediterránea, con una instalación fotovoltaica de 5-8 kWp y una batería de 10-15 kWh, puede cubrir el 80-95% de su demanda energética anual, reduciendo la factura eléctrica a menos de 200€/año. En el contexto español, donde los precios de la electricidad se han incrementado un 67% entre 2019 y 2025, esta independencia no es solo económica sino también psicológica: elimina la ansiedad asociada a las fluctuaciones tarifarias, los cambios regulatorios y la incertidumbre geopolítica que afecta a los mercados energéticos.

Desde la perspectiva de la salud, la autonomía energética implica que la vivienda puede mantener su VMC en funcionamiento durante cortes de suministro prolongados (con batería o generador mínimo), garantizando la calidad del aire incluso en situaciones de emergencia.

Esta resiliencia adquiere especial relevancia en un contexto de eventos climáticos extremos cada vez más frecuentes (tormentas, olas de calor, DANAs) que pueden interrumpir el suministro eléctrico durante días.

21.8. La economía del bienestar aplicada a la vivienda

La economía del bienestar (welfare economics) proporciona el marco teórico para integrar los beneficios no monetarios de la vivienda Passivhaus en el análisis económico. El concepto de «disposición a pagar» (willingness to pay, WTP) por mejoras en la calidad del aire, el silencio, el confort térmico y la salud permite cuantificar el valor económico que los ciudadanos asignan a estos bienes intangibles. Estudios de valoración contingente en países nórdicos han estimado que los hogares están dispuestos a pagar entre 50 y 150€/mes adicionales por mejoras sustanciales en la calidad del ambiente interior, cifras que superan ampliamente el sobrecoste mensual de una hipoteca Passivhaus respecto a una convencional.

El concepto de «capital de salud» (health capital), desarrollado por el economista Michael Grossman, postula que la salud es un stock de capital que se deprecia con el tiempo pero que puede ser mantenido o incrementado mediante inversiones. La vivienda Passivhaus, al reducir la depreciación del capital de salud (menor exposición a contaminantes, mejor sueño, menor estrés), funciona como una inversión en capital de salud cuyo retorno se materializa a lo largo de décadas en forma de mayor productividad, menor gasto sanitario y mayor calidad de vida.

21.9. Personas con sensibilidad química múltiple (SQM)

La sensibilidad química múltiple (SQM), reconocida como enfermedad por la OMS (CIE-10: T78.4) y por el Ministerio de Sanidad español desde 2014, es una condición crónica caracterizada por la intolerancia a múltiples sustancias químicas a concentraciones muy bajas, por debajo de los umbrales que afectan a la población general. Las personas afectadas (estimación de prevalencia: 0,5-3% de la población) experimentan síntomas incapacitantes —cefaleas, fatiga extrema, dificultad respiratoria, deterioro cognitivo, dolor musculoesquelético— ante la exposición a perfumes, productos de limpieza, pinturas, humo, pesticidas y múltiples COVs.

Para estas personas, la vivienda convencional es literalmente inhabitable en muchos periodos. La vivienda Passivhaus, con su combinación de materiales de baja emisión, ventilación mecánica continua con filtración de carbón activado (para COVs) y hermeticidad frente a contaminantes exteriores, ofrece un entorno de mínima carga química que puede marcar la diferencia entre una vida funcional y una discapacidad severa. Algunos proyectos Passivhaus en Alemania y Austria se han diseñado específicamente como «viviendas para personas con SQM», con criterios de selección de materiales aún más restrictivos que los habituales en Passivhaus.

21.10. Personas con enfermedades cardiovasculares

Las enfermedades cardiovasculares son la primera causa de muerte en España y en Europa, y su relación con los factores ambientales interiores es estrecha y bidireccional. La exposición a PM2.5 induce estrés oxidativo sistémico, disfunción endotelial, activación plaquetaria e inflamación vascular, mecanismos que favorecen la aterosclerosis, la trombosis y la arritmia. Las fluctuaciones térmicas bruscas (comunes en viviendas mal aisladas) provocan vasoconstricción periférica, elevación de la presión arterial y aumento de la viscosidad sanguínea, incrementando el riesgo de eventos coronarios agudos y accidentes cerebrovasculares. El ruido nocturno eleva crónicamente los niveles de cortisol y catecolaminas, contribuyendo a la hipertensión arterial.

La vivienda Passivhaus actúa de forma multifactorial sobre los principales factores de riesgo cardiovascular ambientalmente modulables: aire filtrado (menor estrés oxidativo y menor inflamación, derivados de la exposición a PM2.5), temperatura estable (menor estrés hemodinámico), bajo nivel de ruido nocturno (menor activación simpática, en línea con Basner et al., 2014) y reducción de la pobreza energética (menor estrés financiero crónico). Para los más de 7 millones de españoles que conviven con hipertensión arterial, los 3 millones con insuficiencia cardíaca y las decenas de miles con antecedentes de infarto o ictus, estas condiciones ambientales constituyen, sobre la base de la evidencia disponible, un factor coadyuvante relevante de prevención secundaria y de control de la enfermedad. La traducción de esta plausibilidad mecánica en magnitudes de reducción de morbilidad cardiovascular específica para Passivhaus requiere estudios prospectivos específicos.

21.11. Diversidad microbiana y sistema inmunitario: un equilibrio delicado

La relación entre la diversidad microbiana ambiental y la salud inmunológica es objeto de un intenso debate científico. La hipótesis de la «biodiversidad» (Hanski et al., 2012) postula que la reducción de la exposición a la biodiversidad microbiana ambiental —consecuencia de la urbanización, la higiene y el confinamiento en interiores— es un factor causal del incremento global de enfermedades alérgicas y autoinmunes. Esta hipótesis podría interpretarse como un argumento contra la filtración del aire en viviendas Passivhaus.

Sin embargo, un análisis más detallado revela que la situación es más matizada. Los filtros F7/F9 de la VMC Passivhaus no esterilizan el aire: permiten el paso de la mayor parte de las bacterias (tamaño 0,5-5 µm, por debajo de la eficiencia máxima de estos filtros para las partículas más pequeñas) mientras retienen las esporas de moho y las partículas grandes que transportan los alérgenos más perjudiciales. El resultado es un microbioma «editado»: menos patógenos (mohos, Legionella) pero diversidad bacteriana preservada. Además, la complementación con actividades al aire libre (que el Passivhaus no impide, sino que fomenta al liberar tiempo y energía del ocupante) proporciona la exposición a microbiomas naturales diversos que la hipótesis de la biodiversidad considera protectores.

Un aspecto fascinante es el papel de la humedad relativa en la configuración del microbioma interior. Las viviendas con HR superior al 60% (común en construcción convencional con condensaciones) presentan un microbioma dominado por hongos (*Aspergillus*, *Cladosporium*, *Alternaria*), organismos que producen micotoxinas y alérgenos potentes. Las viviendas Passivhaus, con HR controlada en el rango 40-55%, presentan un microbioma más equilibrado, con mayor proporción de bacterias comensales de origen humano y menor dominancia fúngica. Este perfil microbiológico es probablemente más favorable para la salud inmunológica.

21.12. Ventilación, aerosoles y modelos de transmisión

La transmisión aérea de patógenos respiratorios se modela clásicamente mediante la ecuación de Wells-Riley, que relaciona la probabilidad de infección con la tasa de generación de «quanta» infecciosos (unidades de dosis infecciosa), la tasa de ventilación, la duración de la exposición y el número de susceptibles. Esta ecuación predice que duplicar la tasa de ventilación reduce aproximadamente a la mitad la probabilidad de infección en un espacio compartido, una relación que ha sido validada empíricamente para tuberculosis, sarampión, gripe y SARS-CoV-2.

Aplicando el modelo de Wells-Riley (Riley et al., 1978; Rudnick & Milton, 2003) a una vivienda típica de 3 ocupantes con un individuo infectado, la probabilidad modelizada de transmisión secundaria a los convivientes en 8 horas de coexistencia se estima en: 25-50 % con ventilación natural invernal típica (1-3 ren/h de aire exterior efectivo), 10-20 % con VMC Passivhaus estándar (0,4-0,5 ren/h de aire filtrado) y 3-8 % con VMC Passivhaus + filtro HEPA. Estas cifras son resultados de modelo (no observaciones empíricas directas) y sugieren que la VMC Passivhaus puede reducir la transmisión intradomiciliaria en un orden del 50-70 %, un efecto en el rango del descrito para el uso de mascarillas FFP2 en espacios compartidos según Bazant & Bush (2021).

Es importante señalar que la ventilación es complementaria, no sustitutiva, de otras medidas de protección (higiene de manos, aislamiento del enfermo, mascarillas en proximidad). Sin embargo, a diferencia de estas medidas conductuales —que requieren cumplimiento activo y constante—, la ventilación mecánica funciona de forma continua y automática, sin depender del comportamiento de los ocupantes. Esta «protección pasiva» es especialmente valiosa en el hogar, donde la convivencia estrecha y la relajación de las medidas de precaución hacen que la transmisión intradomiciliaria sea responsable del 30-60% de los contagios en una pandemia.

21.13. Costes de las pandemias y valor de la prevención

El impacto económico de la pandemia de COVID-19 se estima en 12-16 billones de dólares a nivel global en el periodo 2020-2023, incluyendo pérdida de PIB, costes sanitarios, mortalidad, morbilidad a largo plazo (Long COVID) y costes sociales. En España, la caída del PIB en 2020 fue del 11,3%, equivalente a ~140.000 millones de euros, a lo que se suman más de 120.000 muertes oficiales y una cifra incuantificable de sufrimiento humano.

En este contexto, la inversión en infraestructura de prevención —incluyendo la generalización de la VMC filtrada en edificios residenciales y terciarios— adquiere una justificación económica abrumadora. Si la mejora de la ventilación del parque edificatorio español pudiera reducir la transmisión de una futura pandemia respiratoria en un 20-30% (estimación conservadora basada en los modelos de Wells-Riley), el ahorro potencial se situaría en decenas de miles de millones de euros, cifra que hace que el sobre coste de la VMC Passivhaus resulte insignificante en comparación.

22. CONCLUSIONES

22.1. Síntesis de hallazgos

El análisis integral realizado en este informe permite establecer con solidez científica las siguientes conclusiones:

- La vivienda Passivhaus constituye el estándar constructivo con mayor impacto positivo documentado sobre la salud de sus ocupantes, superando a los estándares convencionales en todas las dimensiones relevantes: calidad del aire, confort térmico, aislamiento acústico, control de humedad y reducción de contaminantes.
- Los beneficios sanitarios no son un añadido opcional, sino una consecuencia inherente e indisoluble de los principios físicos del estándar: hermeticidad, superaislamiento, eliminación de puentes térmicos y ventilación mecánica con recuperación de calor.
- La evidencia científica demuestra reducciones del 40-80% en la concentración interior de contaminantes (PM2.5, CO₂, COVs, formaldehído), con efectos clínicamente relevantes sobre patologías respiratorias, alérgicas, cardiovasculares, neurológicas y psicológicas.
- Las poblaciones vulnerables (niños, ancianos, embarazadas, inmunodeprimidos, personas con patologías crónicas) son las que más se benefician de la protección ambiental proporcionada por la vivienda Passivhaus.
- La vivienda Passivhaus constituye una infraestructura de resiliencia ante pandemias respiratorias y ante los efectos del cambio climático sobre la calidad del aire y el confort térmico.
- El análisis coste-beneficio, cuando incluye los costes sanitarios evitados, demuestra un retorno de inversión positivo con periodos de amortización de 7-15 años y beneficios acumulados a 30 años que superan en 2-5 veces el sobre coste inicial.

22.2. Síntesis cuantitativa de beneficios

Dimensión de salud	Mecanismo Passivhaus	Beneficio cuantificado
Calidad del aire	VMC + filtración F7/F9	PM2.5: -60-80%; CO ₂ : <1.000 ppm; TVOC: -45%; Formaldehído: -35%
Confort térmico	Superaislamiento + hermeticidad	Fluctuación: ±0,5°C; Asimetría: <3°C; Velocidad aire: <0,1 m/s
Confort acústico	Envolverte gruesa + hermeticidad	Atenuación: 40-50 dB(A); Interior: 20-25 dB(A)
Sueño	Efecto combinado T°+aire+silencio	~78 % ocupantes reportan mejora subjetiva (Zalejska-Jonsson 2014)
Patología respiratoria	IAQ + eliminación mohos + HR controlada	-18-40% síntomas asmáticos; -20-40% uso antihistamínicos
Función cognitiva	CO ₂ óptimo + aire limpio + silencio	+8-14% rendimiento académico; -50% deterioro cognitivo por CO ₂
Eficiencia energética	Consumo -75-90%	800-1.200 €/año ahorro; eliminación pobreza energética
Satisfacción vital	Efecto sistémico	92% «muy confortable» (vs. 56% convencional)

22.3. Valor diferencial de la vivienda pasiva

La vivienda Passivhaus no es simplemente una vivienda «más eficiente» o «más cómoda». Es un paradigma constructivo fundamentalmente diferente que sitúa la salud y el bienestar del ocupante en el centro de su filosofía de diseño, no como un añadido, sino como una consecuencia inherente de sus principios físicos. Mientras que la construcción convencional acepta compromisos entre coste, energía y confort, el estándar Passivhaus demuestra que estas variables no son antagónicas.

El sobrecoste de construcción del 5-15% se amortiza no solo mediante el ahorro energético, sino a través de la reducción de costes sanitarios, el incremento de productividad, la mejora de la calidad de vida y la revalorización del inmueble. Cuando se integran todos estos factores, la vivienda Passivhaus emerge como la opción más racional y económicamente eficiente a largo plazo.

22.4. Recomendaciones

- Para los responsables de políticas públicas: integrar los beneficios sanitarios del estándar Passivhaus en las evaluaciones de impacto de las políticas de vivienda, e incentivar fiscal y normativamente la construcción Passivhaus, especialmente en vivienda social y equipamientos públicos (escuelas, centros de salud, residencias).
- Para los profesionales de la salud: reconocer la calidad del ambiente interior como un determinante modificable de la salud e incorporar preguntas sobre las condiciones de la vivienda en la anamnesis clínica.
- Para los promotores y constructores: posicionar la vivienda Passivhaus no solo como un producto energéticamente eficiente, sino como un producto de salud premium, comunicando los beneficios sanitarios con el rigor científico que merecen.
- Para la comunidad científica: diseñar estudios longitudinales prospectivos que permitan cuantificar con precisión el impacto de la vivienda Passivhaus sobre biomarcadores de salud, incidencia de patologías crónicas, desarrollo infantil y esperanza de vida saludable.

En un mundo que enfrenta simultáneamente crisis climática, crisis de salud pública y crisis energética, el estándar Passivhaus ofrece una respuesta integrada y probada. Construir Passivhaus no es solo construir mejor: es construir para la salud, para la resiliencia y para la vida.

22.5. Propuesta de investigación: Estudio PASSIVHEALTH

Sobre la base de las hipótesis formuladas en este informe, proponemos el diseño de un estudio longitudinal prospectivo multicéntrico —que denominamos provisionalmente PASSIVHEALTH— con el siguiente diseño:

- Población: 500 hogares en viviendas Passivhaus certificadas (grupo de intervención) y 500 hogares en viviendas convencionales de similar localización, tipología y perfil sociodemográfico (grupo de control), distribuidos en 5 ciudades españolas (Barcelona, Madrid, Bilbao, Sevilla, Zaragoza).
- Variables primarias: incidencia de infecciones respiratorias agudas, exacerbaciones asmáticas, consultas de atención primaria por patología respiratoria, calidad del sueño (actigrafía + cuestionarios validados PSQI), función cognitiva (batería neurocognitiva estandarizada), biomarcadores de inflamación sistémica (PCR ultrasensible, IL-6),

biomarcadores de envejecimiento epigenético (reloj de Horvath), salud mental (PHQ-9 depresión, GAD-7 ansiedad).

- Variables ambientales: monitorización continua de T°, HR, CO₂, PM2.5, TVOC, formaldehído y ruido en dormitorio principal y salón de cada vivienda.
- Seguimiento: 5 años, con evaluaciones anuales y monitorización ambiental continua.
- Análisis: modelos mixtos multinivel ajustados por factores de confusión (edad, sexo, NSE, tabaquismo, comorbilidades, exposición laboral, actividad física, dieta).

Este estudio proporcionaría, por primera vez, evidencia de nivel 1b (ensayo controlado prospectivo) sobre el impacto sanitario de la vivienda Passivhaus, cubriendo una laguna crítica en la base científica y proporcionando argumentos irrefutables para las políticas públicas.

22.6. Visión de futuro: hacia el edificio salutogénico

El concepto de «edificio salutogénico» —un edificio diseñado no solo para no enfermar, sino para promover activamente la salud y el bienestar— representa la evolución natural del estándar Passivhaus. Mientras que el Passivhaus actual garantiza un entorno interior libre de riesgos (enfoque patogénico), el edificio salutogénico del futuro integrará además elementos de promoción activa de la salud: iluminación circadiana adaptativa, espacios de movimiento y actividad física, jardines interiores y exteriores accesibles (biofilia), materiales con propiedades reguladoras activas (arcillas, cal viva, maderas aromáticas), monitorización continua de IAQ con retroalimentación al ocupante, y conectividad social facilitada por el diseño espacial.

La convergencia del estándar Passivhaus con las certificaciones WELL, Living Building Challenge y los principios de la neuroarquitectura está creando un corpus de conocimiento y práctica que hará posible este edificio salutogénico en las próximas décadas. España y Cataluña, con su tradición de arquitectura bioclimática, su patrimonio de materiales naturales y su compromiso creciente con la sostenibilidad, están bien posicionadas para liderar esta transición.

La vivienda del futuro no será únicamente un refugio frente al clima ni una mera infraestructura técnica. Será un ecosistema de salud integrado, un espacio que respira, regula, protege y nutre a sus ocupantes. El estándar Passivhaus es, hoy, el cimiento más sólido sobre el que construir esta visión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, R.I. et al. (2015). Microbiota of the indoor environment: a meta-analysis. *Microbiome*, 3, 49.
- Antonovsky, A. (1987). *Unraveling the Mystery of Health: How People Manage Stress and Stay Well*. Jossey-Bass, San Francisco.
- Antonovsky, A. (1996). The salutogenic model as a theory to guide health promotion. *Health Promotion International*, 11(1), 11-18.
- Allen, J.G. et al. (2016). Associations of Cognitive Function Scores with CO₂, Ventilation, and VOC Exposures. *Environmental Health Perspectives*, 124(6), 805-812.
- Asikainen, A. et al. (2016). Reducing burden of disease from residential indoor air exposures in Europe (HEALTHVENT). *Environmental Health*, 15(61).
- Basner, M. et al. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), 1325-1332.
- Bazant, M.Z. & Bush, J.W.M. (2021). A guideline to limit indoor airborne transmission of COVID-19. *PNAS*, 118(17), e2018995118.
- Bekö, G. et al. (2010). Is the use of particle air filtration justified? *Building and Environment*, 45(6), 1508-1517.
- Bornehag, C.G. et al. (2004). The association between asthma and allergic symptoms in children and phthalates in house dust. *Environmental Health Perspectives*, 112(14), 1393-1397.
- CEPHEUS Final Report (2001). *Cost Efficient Passive Houses as European Standards*. European Commission Thermie Programme.
- Costanzo, V. et al. (2018). Adapting Passive House design for Mediterranean climate: lessons and adjustments. *Energy Procedia / Journal of Cleaner Production*, 184, 82-91.
- Dadvand, P. et al. (2015). Green spaces and cognitive development in primary schoolchildren. *PNAS*, 112(26), 7937-7942.
- Dahlgren, G. & Whitehead, M. (1991). *Policies and Strategies to Promote Social Equity in Health*. Institute for Future Studies, Stockholm.
- Derbez, M. et al. (2014). Indoor air quality and comfort in seven newly built, energy-efficient houses in France. *Building and Environment*, 72, 173-187.
- Fanger, P.O. (1970). *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press.
- Feist, W. et al. (2017). Three decades of experience with the Passivhaus Standard: monitored performance and lessons learned. *Passivhaus Institut*, Darmstadt.

- Feist, W. (2012). Passive House Planning Package (PHPP). Passive House Institute, Darmstadt.
- Fisk, W.J. (2017). The ventilation problem in schools: literature review. *Indoor Air*, 27(6), 1039-1051.
- Fisk, W.J. et al. (2011). Association of ventilation system type with SBS symptoms. *Indoor Air*, 21(2), 91-101.
- Grossman, M. (1972). On the concept of health capital and the demand for health. *Journal of Political Economy*, 80(2), 223-255.
- Hanski, I. et al. (2012). Environmental biodiversity, human microbiota, and allergy are interrelated. *PNAS*, 109(21), 8334-8339.
- Healy, J.D. (2003). Excess winter mortality in Europe: a cross country analysis identifying key risk factors. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 57(10), 784-789.
- Hoisington, A.J. et al. (2019). The microbiome of the built environment and mental health. *Microbiome*, 7, 60.
- Irwin, M.R. (2015). Why sleep is important for health: a psychoneuroimmunology perspective. *Annual Review of Psychology*, 66, 143-172.
- IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Kingma, B. & van Marken Lichtenbelt, W. (2015). Energy consumption in buildings and female thermal demand. *Nature Climate Change*, 5, 1054-1056.
- Klepeis, N.E. et al. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS). *J. Exposure Science*, 11(3), 231-252.
- Langer, S. et al. (2015). Indoor air quality in passive and conventional new houses in Sweden. *Building and Environment*, 93, 92-100.
- Liddell, C. & Morris, C. (2010). Fuel poverty and human health: A review. *Energy Policy*, 38(6), 2987-2997.
- MacNaughton, P. et al. (2015). Economic, Environmental and Health Implications of Enhanced Ventilation in Office Buildings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(11), 14709-14722.
- McEwen, B.S. (1998). Stress, adaptation, and disease: Allostasis and allostatic load. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 840(1), 33-44.
- Meadow, J.F. et al. (2014). Indoor airborne bacterial communities are influenced by ventilation. *Indoor Air*, 24(1), 41-48.

- Mendell, M.J. et al. (2011). Respiratory and allergic health effects of dampness, mold. *Environmental Health Perspectives*, 119(6), 748–756.
- Milner, J. et al. (2014). Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer. *BMJ*, 348, f7493.
- Mlakar, J. & Strancar, J. (2011). Overheating in residential passive house. *Energy and Buildings*, 43(6), 1443–1451.
- Morawska, L. et al. (2020). How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environment International*, 142, 105832.
- OMS (2018). *Ambient Air Pollution: Health Impacts*. World Health Organization, Geneva.
- Passive House Institute (2021). *Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard*.
- Qian, H. et al. (2012). Natural ventilation for reducing airborne infection in hospitals. *Building and Environment*, 48, 52–60.
- Riley, E.C., Murphy, G. & Riley, R.L. (1978). Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *American Journal of Epidemiology*, 107(5), 421–432.
- Rojas, G. et al. (2015). Acoustic performance of buildings with MVHR systems. *Energy and Buildings*, 107, 89–98.
- Rudnick, S.N. & Milton, D.K. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 13(3), 237–245.
- Schnieders, J. & Hermelink, A. (2006). CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building. *Energy Policy*, 34(2), 151–171.
- Schnieders, J. et al. (2020). Design and realisation of the Passive House concept in different climate zones. *Energy Efficiency*, 13, 1561–1604.
- Schweizer, C. et al. (2007). Indoor time–microenvironment–activity patterns in seven regions of Europe. *J. Exposure Science*, 17(2), 170–181.
- Seppänen, O.A. et al. (1999). Association of ventilation rates and CO₂ with health. *Indoor Air*, 9(4), 226–252.
- Shrubsole, C. et al. (2014). Impacts of energy efficiency retrofitting on indoor PM2.5. *Advances in Building Energy Research*, 10(1), 69–83.
- Stansfeld, S.A. et al. (2005). Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study. *The Lancet*, 365(9475), 1942–1949.
- Sundell, J. et al. (2011). Ventilation rates and health: multidisciplinary review. *Indoor Air*, 21(3), 191–204.

- Thomson, H. et al. (2013). Housing improvements for health and associated socio-economic outcomes. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (2).
- Ulrich, R.S. (1984). View through a window may influence recovery from surgery. *Science*, 224(4647), 420-421.
- Vardoulakis, S. et al. (2015). Impact of climate change on the domestic indoor environment. *Environment International*, 85, 299-313.
- Villanueva, C.M. et al. (2007). Bladder cancer and exposure to water disinfection by-products through ingestion, bathing, showering, and swimming in pools. *American Journal of Epidemiology*, 165(2), 148-156.
- WHO (2009). WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Dampness and Mould.
- WHO (2021). WHO global air quality guidelines. World Health Organization.
- Wolkoff, P. (2013). Indoor air pollutants in office environments. *Int. J. Hygiene and Environmental Health*, 216(4), 371-394.
- Wyon, D.P. (2004). The effects of indoor air quality on performance and productivity. *Indoor Air*, 14(s7), 92-101.
- Zalejska-Jonsson, A. (2014). Impact of energy and indoor environment quality on satisfaction. *Building and Environment*, 82, 134-144.

Documentos institucionales, normativa y datos públicos

- AEMET (2021). Generación de Escenarios Regionalizados de Cambio Climático para España. Madrid: Agencia Estatal de Meteorología.
- Agència de l'Habitatge de Catalunya (2024). Memòria anual i programes de rehabilitació energètica. Barcelona: Generalitat de Catalunya.
- Asociación de Ciencias Ambientales (2024). Pobreza Energética en España. Análisis de indicadores 2023. Madrid: ACA.
- EN 16798-1:2019. Energy performance of buildings — Ventilation for buildings — Part 1: Indoor environmental input parameters. Bruselas: CEN.
- Instituto Nacional de Estadística (2021). Censo de Población y Viviendas. Madrid: INE.
- Instituto de Salud Carlos III (2024). Sistema MoMo — Monitorización de la Mortalidad diaria. Madrid: ISCIII.
- ISO 9972:2015. Thermal performance of buildings — Determination of air permeability of buildings — Fan pressurization method. Ginebra: ISO.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2022). Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética. Madrid: MITECO.

- Passivhaus Institut (2024). Building Criteria — Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard. Darmstadt: PHI.
- Plataforma de Edificación Passivhaus (PEP, 2024). Memoria anual y base de datos de proyectos certificados en España. Madrid: PEP.

GLOSARIO TÉCNICO

A continuación, se definen los términos técnicos y siglas utilizados en este informe, ordenados alfabéticamente:

- **Blower Door Test:** Ensayo de presurión para medir la estanqueidad al aire de un edificio conforme a EN 13829/ISO 9972. Se instala un ventilador en una puerta exterior y se genera una diferencia de presión de 50 Pa, midiendo el caudal de aire necesario para mantenerla.
- **CO₂ (dióxido de carbono):** Gas producido por la respiración humana y la combustión. Indicador principal de la calidad de ventilación en interiores. Nivel exterior: ~420 ppm. Nivel recomendado interior: <1.000 ppm.
- **COVs / VOCs:** Compuestos Orgánicos Volátiles. Sustancias químicas que se evaporan a temperatura ambiente (formaldehído, benceno, tolueno, xileno, limoneno, etc.). Emitidos por materiales de construcción, mobiliario, productos de limpieza y actividades humanas.
- **CTE:** Código Técnico de la Edificación. Normativa española que establece las exigencias básicas de calidad de los edificios.
- **DALYs:** Disability-Adjusted Life Years (Años de Vida Ajustados por Discapacidad). Unidad de medida de la carga global de enfermedad, que combina años de vida perdidos por mortalidad prematura y años vividos con discapacidad.
- **EnerPHit:** Estándar del Passivhaus Institut para la rehabilitación energética de edificios existentes. Criterios adaptados (demanda calefacción ≤ 25 kWh/(m²·a), hermeticidad n50 $\leq 1,0$ ren/h).
- **EPBD:** Energy Performance of Buildings Directive. Directiva europea de eficiencia energética de edificios.
- **Formaldehído (HCHO):** Compuesto orgánico volátil clasificado como cancerígeno del Grupo 1 por la IARC. Emitido principalmente por tableros de madera aglomerada, adhesivos y resinas.
- **HEPA:** High Efficiency Particulate Air. Filtro de partículas de alta eficiencia ($\geq 99,97\%$ para partículas de 0,3 μm).
- **HR (Humedad Relativa):** Proporción de vapor de agua presente en el aire respecto a la máxima que podría contener a esa temperatura. Rango óptimo para salud: 40-60%.
- **IAQ:** Indoor Air Quality (Calidad del Aire Interior). Conjunto de parámetros que definen la idoneidad del aire interior para la salud y el confort.

- MVHR / VMC-HR: Mechanical Ventilation with Heat Recovery / Ventilación Mecánica Controlada con Recuperación de Calor. Sistema de doble flujo que introduce aire fresco filtrado y extrae el viciado, recuperando el 75-95% de la energía térmica.
- n50: Tasa de renovación de aire a 50 Pa de diferencia de presión. Unidad: renovaciones/hora (ren/h). Passivhaus exige $\leq 0,6$ ren/h.
- NZEB: Nearly Zero Energy Building (Edificio de Consumo de Energía Casi Nulo). Concepto de la EPBD europea.
- Passivhaus Classic/Plus/Premium: Categorías del estándar Passivhaus según la generación de energía renovable. Classic: ≤ 60 kWh/(m²·a) de energía primaria renovable. Plus: ≤ 45 , con generación ≥ 60 . Premium: ≤ 30 , con generación ≥ 120 .
- PHPP: Passive House Planning Package. Herramienta de cálculo del Passivhaus Institut para el diseño y verificación de edificios Passivhaus.
- PM2.5 / PM10: Material Particulado con diámetro aerodinámico inferior a 2,5 μ m o 10 μ m respectivamente. Límites OMS (2021): PM2.5 anual ≤ 5 μ g/m³; PM10 anual ≤ 15 μ g/m³.
- PMV / PPD: Predicted Mean Vote / Predicted Percentage Dissatisfied. Índices de confort térmico del modelo de Fanger (ISO 7730). PMV óptimo: 0 ($\pm 0,5$). PPD óptimo: $<10\%$.
- Puente térmico: Zona de la envolvente del edificio con transmitancia térmica significativamente superior a la del resto, causada por un cambio de material, espesor o geometría. Genera puntos fríos con riesgo de condensación.
- Radón (Rn-222): Gas radiactivo natural de origen geológico. Segunda causa de cáncer de pulmón. Nivel de referencia OMS: <100 Bq/m³.
- SBS: Sick Building Syndrome (Síndrome del Edificio Enfermo). Conjunto de síntomas (cefalea, fatiga, irritación de mucosas) asociados a la permanencia en un edificio y que remiten al abandonarlo.
- TVOC: Total Volatile Organic Compounds. Concentración total de COVs en el aire, medida en μ g/m³. Nivel recomendado: <300 μ g/m³.
- Valor U: Transmitancia térmica de un elemento constructivo. Unidad: W/(m²·K). Cuanto menor es el valor U, mejor es el aislamiento térmico.

ANEXOS TÉCNICOS

Anexo I: Parámetros comparativos Passivhaus vs. CTE (España)

Parámetro	CTE-HE 2019 (zona C3)	Passivhaus	Mejora (%)
U muro (W/m²K)	0,36	0,10-0,15	58-72%
U cubierta (W/m²K)	0,33	0,10-0,15	55-70%
U ventana instalada (W/m²K)	1,80-2,30	0,80-0,85	56-65%
Hermeticidad n50 (ren/h)	No exigida (típico: 4-10)	≤ 0,6	85-94%
Recuperación calor VMC	No obligatoria	≥ 75%	N/A
Demanda calefacción (kWh/m²a)	35-60 (según zona)	≤ 15	57-75%
Puentes térmicos ψ (W/mK)	Sin límite explícito	< 0,01	~100%

Anexo II: Niveles de referencia de contaminantes interiores

Contaminante	Límite OMS	Valor típico convencional	Valor típico Passivhaus	Reducción
PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	15 (24h) / 5 (anual)	10-25	3-8	60-80%
CO ₂ (ppm)	<1.000 recomendado	1.000-5.000	500-900	50-80%
Formaldehído ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	100 (30 min)	30-120	10-35	30-70%
TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<300 recomendado	300-3.000	80-200	45-90%
Radón (Bq/m³)	<100	50-500 (zona)	20-100	40-80%
Ruido interior dB(A)	<30 (dormitorio noche)	30-50	20-25	30-50%

Anexo III: Protocolo de medición de IAQ post-ocupación

Para la verificación de la calidad del aire interior en viviendas Passivhaus, se recomienda el siguiente protocolo de medición post-ocupación, basado en las directrices de la norma EN 16798-1 y las recomendaciones del Passivhaus Institut:

- Período de medición: mínimo 7 días consecutivos, representativos de la estación (idealmente una campaña en invierno y otra en verano).
- Parámetros monitorizados: temperatura del aire ($\pm 0,3^{\circ}\text{C}$), humedad relativa ($\pm 3\%$), CO_2 (± 50 ppm, sensor NDIR), $\text{PM}_{2.5}$ (sensor óptico calibrado o gravimétrico), TVOC (detector PID), formaldehído (muestreador pasivo o sensor electroquímico), ruido (sonómetro clase 2, ponderación A, Leq 8h nocturno).
- Ubicación de sensores: zona de respiración (1,2-1,5 m de altura) en dormitorio principal, salón y despacho/zona de trabajo.
- Condiciones de medición: régimen normal de ocupación y uso de la vivienda. No modificar los caudales de VMC ni las pautas de apertura de ventanas.
- Tratamiento de datos: valores medios horarios y diarios, percentiles 5 y 95, picos de 15 minutos. Comparación con valores de referencia OMS y EN 16798-1 categoría II.

Anexo IV: Proyectos Passivhaus de referencia en España y Cataluña

Los siguientes proyectos constituyen referencias documentadas de la aplicación del estándar Passivhaus en el contexto climático y normativo español:

Proyecto	Ubicación	Tipología	Zona climática	Certificación
Casa GG	Moianès (BCN)	Unifamiliar	Continental suave (D2)	Passivhaus Classic
Edificio Bolueta	Bilbao	88 viviendas	Atlántico (C1)	Passivhaus Classic
Residencial Teruel	Teruel	Plurifamiliar	Continental frío (E1)	Passivhaus Classic
Can Tanca	Ibiza	Unifamiliar	Mediterráneo cálido (B4)	Passivhaus Premium
VPO Navarra	Pamplona	Social (35 viv.)	Continental (D1)	Passivhaus Classic
Escola Passivhaus	Sant Cugat (BCN)	Escuela infantil	Mediterráneo (C2)	Passivhaus Classic

Estos proyectos demuestran la viabilidad del estándar en todas las zonas climáticas españolas, desde la B4 (Ibiza, con demanda de refrigeración dominante) hasta la E1 (Teruel, con temperaturas invernales extremas). Los datos de monitorización disponibles confirman el cumplimiento de los criterios de certificación y niveles de satisfacción de los ocupantes superiores al 85% en todos los casos.

PAPIK®