

BENEFICIS PER A LA SALUT DE L'HABITATGE PASSIVHAUS

ANÀLISI INTEGRAL DES DE LES PERSPECTIVES FÍSICA,
MENTAL, AMBIENTAL, MICROBIOLÒGICA,
NEUROCIENTÍFICA I SOCIOECONÒMICA



BENEFICIS PER A LA SALUT DE L'HABITATGE PASSIVHAUS

ANÀLISI INTEGRAL DES DE LES PERSPECTIVES FÍSICA,
MENTAL, AMBIENTAL, MICROBIOLÒGICA,
NEUROCIENTÍFICA I SOCIOECONÒMICA

Resum executiu	4
1. Introducció.....	5
1.1. Context actual: salut, habitatge i qualitat de vida.....	5
1.2. Problemes de l'edificació tradicional: una patologia sistèmica	6
1.3. Justificació del model Passivhaus com a resposta integral.....	8
1.4. Objectius i abast d'aquest informe.....	9
1.5. Metodologia	10
1.6. Situació específica del parc edificat espanyol.....	11
1.7. Limitacions de l'estudi i declaració de conflicte d'interessos.....	11
2. Marc teòric i conceptual	11
2.1. Determinants ambientals de la salut	11
2.2. El paradigma de l'edifici com a organisme	12
2.3. Salut i benestar: definicions operatives.....	12
2.4. Principi de precaució i càrrega de la prova	13
3. Marc tècnic de l'estàndard Passivhaus	13
3.1. Història i evolució de l'estàndard.....	13
3.2. Els cinc principis fonamentals.....	14
3.3. Paràmetres quantitatius i certificacions.....	17
3.4. El PHPP com a eina de disseny integrat.....	18
4. Qualitat de l'aire interior (IAQ)	18
4.1. La importància crítica de la IAQ per a la salut.....	18
4.2. Mecanismes de control de la IAQ en Passivhaus	18
4.3. Evidència científica específica sobre IAQ en Passivhaus.....	21
5. Confort tèrmic i salut.....	21
5.1. Fonaments fisiològics del confort tèrmic	22
5.2. Temperatura operativa i estabilitat tèrmica	22
5.3. Eliminació de corrents d'aire i superfícies fredes.....	23
5.4. Impacte sobre la qualitat del son.....	23
5.5. Confort tèrmic asimètric i perspectiva de gènere	24
6. Materials de construcció i salut.....	24
6.1. Filosofia de selecció de materials en Passivhaus.....	24
6.2. Categories de materials i implicacions sanitàries	25
6.3. Certificacions de materials saludables	26
6.4. Impacte acumulatiu a llarg termini	26

7. Qualitat de l'aigua i entorn interior	27
7.1. Sistemes de filtració integrats	27
7.2. Il·luminació natural i ritmes circadians.....	28
7.3. Disseny biofílic i neuroarquitectura	28
8. Confort acústic i protecció davant el soroll.....	29
8.1. El soroll com a factor de risc sanitari	29
8.2. Prestacions acústiques de l'envolupant Passivhaus.....	29
8.3. Soroll del sistema de VMC: mite vs. realitat.....	30
8.4. Impacte en el neurodesenvolupament infantil.....	30
9. Eficiència energètica i benestar psicològic	31
9.1. La pobresa energètica com a determinant de salut.....	31
9.2. Estrès financer i salut mental.....	31
9.3. Sentit d'agència i coherència vital	31
10. Impacte en poblacions vulnerables	32
10.1. Salut infantil	32
10.2. Salut geriàtrica.....	33
10.3. Dones embarassades i salut perinatal.....	34
10.4. Persones amb patologies respiratòries cròniques.....	35
10.5. Persones immunodeprimides	35
11. Microbioma interior i salut immunològica.....	36
11.1. El concepte de microbioma de l'edifici.....	36
11.2. Implicacions per a la salut immunològica	36
11.3. Hipòtesi emergent: l'habitatge Passivhaus com a modulador del microbioma interior	37
12. Passivhaus i resiliència davant pandèmies respiratòries	37
12.1. Lliçons de la pandèmia de COVID-19.....	37
12.2. La VMC Passivhaus com a infraestructura de resiliència davant transmissió aèria.....	38
12.3. Preparació davant futures pandèmies.....	38
13. Anàlisi econòmicosanitària.....	39
13.1. Costos sanitaris de la mala qualitat de l'ambient interior	39
13.2. Anàlisi cost-benefici de l'habitatge Passivhaus	40
13.3. Costos sanitaris evitats: metodologia d'estimació	40
13.4. Perspectiva macroeconòmica: impacte en el sistema de salut pública.....	41

14. Comparativa amb altres estàndards de construcció saludable	41
14.1. WELL Building Standard	41
14.2. BREEAM i LEED	42
14.3. Fitwel	42
14.4. Taula comparativa	43
15. Hipòtesis originals i línies de recerca futura.....	43
15.1. Hipòtesi 1: Impacte epigenètic i envelliment cel·lular.....	44
15.2. Hipòtesi 2: Neuroprotecció i reserva cognitiva.....	44
15.3. Hipòtesi 3: Programació immunològica en la primera infància.....	45
15.4. Hipòtesi 4: Efecte sobre el microbioma intestinal via eix intestí-pulmó	45
15.5. Hipòtesi 5: Habitatge Passivhaus com a intervenció de longevitat.....	45
16. Evidència empírica ampliada	46
16.1. Estudis clau i metaanàlisis	46
16.2. Casos reals documentats	47
17. Visió holística de la salut	48
17.1. La sinergia de factors: l'efecte multiplicador	49
17.2. Biohabitabilitat: un concepte integrador.....	50
17.3. L'habitatge com a determinant social de la salut	50
18. Passivhaus en el context mediterrani i espanyol	51
18.1. El repte del clima mediterrani	51
18.2. Adaptacions tècniques per al clima càlid.....	51
18.3. Estat del Passivhaus a Espanya i Catalunya	53
18.4. Implicacions sanitàries específiques del clima càlid	54
19. Salut mental i neurociència de l'hàbitat.....	55
19.1. L'habitatge com a determinant de salut mental.....	55
19.2. Mecanismes neurofisiològics.....	56
19.3. Depressió i ansietat	57
19.4. Rendiment cognitiu i teletreball.....	58
19.5. Percepció de seguretat i control ambiental.....	58
19.6. Infants: neurodesenvolupament i regulació emocional.....	58
20. Canvi climàtic, onades de calor i resiliència habitacional.....	59
20.1. Escenaris climàtics per a la península ibèrica.....	59
20.2. L'habitatge com a refugi climàtic	59
20.3. Illa de calor urbana i edificació eficient	60
20.4. Resiliència energètica i autonomia.....	60
20.5. Qualitat de l'aire exterior i episodis de contaminació	61

21. Marc normatiu i polític.....	61
21.1. Directives europees.....	61
21.2. Normativa espanyola.....	62
21.3. Normativa i incentius a Catalunya	63
21.4. Cap a una integració de salut i política d'habitatge.....	64
21.5. Materials específics del context mediterrani.....	65
21.6. Paisatge sonor interior: més enllà del silenci	65
21.7. Independència energètica i autoconsum fotovoltaic	66
21.8. L'economia del benestar aplicada a l'habitatge.....	66
21.9. Persones amb sensibilitat química múltiple (SQM)	67
21.10. Persones amb malalties cardiovasculars.....	67
21.11. Diversitat microbiana i sistema immunitari: un equilibri delicat	67
21.12. Ventilació, aerosols i models de transmissió.....	68
21.13. Costos de les pandèmies i valor de la prevenció	69
22. Conclusions.....	69
22.1. Síntesi de troballes	69
22.2. Síntesi quantitativa de beneficis.....	70
22.3. Valor diferencial de l'habitatge passiu	71
22.4. Recomanacions	71
22.5. Proposta de recerca: Estudi PASSIVHEALTH.....	73
22.6. Visió de futur: cap a l'edifici salutogènic	74
Referències bibliogràfiques	74
Glossari tècnic	80
Annexos tècnics.....	84
Annex I: Paràmetres comparatius Passivhaus vs. CTE (Espanya)	84
Annex II: Nivells de referència de contaminants interiors	85
Annex III: Protocol de mesura d'IAQ postocupació.....	85
Annex IV: Projectes Passivhaus de referència a Espanya i Catalunya.....	86
Annex V: Missatges clau per a difusió comercial	87

RESUM EXECUTIU

El present informe analitza, amb rigor científic i enfocament multidisciplinari, la relació entre l'estàndard constructiu Passivhaus i la salut humana. Després de més de tres dècades d'implementació i monitoratge en l'ordre de diverses desenes de milers d'unitats certificades i un volum substancialment més gran de projectes dissenyats segons els principis del Passivhaus Institut en més de 40 països (Passivhaus Institut, 2024; PEP, 2024), l'evidència acumulada permet afirmar que l'habitatge passiu constitueix un dels estàndards constructius amb més impacte positiu documentat sobre la salut dels seus ocupants.

Els cinc principis tècnics de l'estàndard (superaïllament, fusteries d'altres prestacions, absència de ponts tèrmics, hermeticitat a l'aire i ventilació mecànica amb recuperació de calor [VMC]) generen, com a conseqüència intrínseca de la seva aplicació, un entorn interior qualitativament superior al de la construcció convencional en totes les dimensions rellevants per a la salut: qualitat de l'aire, confort tèrmic, aïllament acústic, control de la humitat i reducció de contaminants químics i biològics.

Les troballes principals d'aquest informe són: (a) la VMC amb filtració F7+ redueix les concentracions interiors de PM2.5 entre un 60-80 % (Langer et al., 2015; Bekö et al., 2010) i els nivells de CO₂ es mantenen permanentment per sota de 1.000 ppm, condició a la qual la literatura científica associa, mitjançant models de fracció atribuïble, reduccions de l'ordre del 20-40 % en símptomes asmàtics (Mendell et al., 2011) i de l'11-23 % en deteriorament cognitiu (aquesta última xifra extrapolada d'estudis en oficines [Allen et al., 2016; MacNaughton et al., 2015], pendent de replicació residencial específica); (b) l'estabilitat tèrmica ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) i l'eliminació de corrents d'aire s'associen a millores subjectives de la qualitat del son en una proporció majoritària d'ocupants en enquestes escandinaves (Zalejska-Jonsson, 2014; CEPHEUS, 2001); (c) l'aïllament acústic de 40-50 dB(A) redueix l'exposició a soroll nocturn per sota de 25 dB(A), sota el llindar d'afectació cardiovascular descrit per l'OMS (Basner et al., 2014); (d) l'estalvi energètic del 75-90 % protegeix davant la pobresa energètica i l'estrès financer associat (Liddell & Morris, 2010; Thomson et al., 2013).

L'informe presenta a més, al capítol 15 i degudament etiquetades com a tals, cinc hipòtesis originals sobre l'impacte de l'habitatge Passivhaus en el microbioma interior i la salut immunològica, el seu potencial efecte sobre mecanismes epigenètics d'envelliment, el seu paper com a infraestructura de resiliència davant pandèmies respiratòries i la seva influència en el neurodesenvolupament infantil.

Aquestes hipòtesis es proposen com a línies de recerca futura, no com a troballes consolidades. S'inclou, finalment, una anàlisi cost-benefici sanitària que (quan s'internalitzen els costos sanitaris evitats amb els supòsits explicats al capítol 13) sosté un retorn positiu de la inversió.

Conclusió: l'habitatge Passivhaus no és només un edifici eficient; és un dispositiu de salut pública que, generalitzat, podria reduir significativament la càrrega de malaltia atribuïble a l'entorn construït.

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Context actual: salut, habitatge i qualitat de vida

La relació entre l'entorn construït i la salut humana constitueix un dels camps de recerca més rellevants i transversals del segle XXI. Segons dades de l'Organització Mundial de la Salut i estudis epidemiològics a gran escala, les persones dels països industrialitzats passen entre el 80% i el 93% del seu temps en espais interiors, xifra documentada per Klepeis et al. al National Human Activity Pattern Survey (NHAPS)¹ i confirmada per Schweizer et al. per a poblacions europees.²

Aquesta realitat converteix la qualitat de l'ambient interior en un determinant crític i sovint subestimat de la salut pública. Les malalties respiratòries cròniques afecten més de 500 milions de persones al món; les al·lèrgies s'han triplicat a Europa en les últimes quatre dècades; els trastorns del son afecten el 30-45% de la població adulta occidental; i l'estrès crònic s'ha convertit en la pandèmia silenciosa del segle XXI. Una proporció significativa d'aquesta morbiditat es pot atribuir directament a les condicions dels edificis on vivim, dormim i treballem.

El concepte de «salut ambiental» ha evolucionat considerablement des dels primers estudis d'higienisme urbà del segle XIX. Avui sabem que la salut no es determina exclusivament per la genètica o l'accés a serveis sanitaris, sinó que els factors ambientals (qualitat de l'aire, temperatura, humitat, soroll, il·luminació, exposició a tòxics) expliquen entre el 20% i el 30% de la càrrega global de malaltia. L'habitatge, com a microentorn on es concentra la major part del temps d'exposició, emergeix com un vector de salut de primera magnitud.

En el context europeu, la Directiva d'Eficiència Energètica d'Edificis (EPBD, revisada el 2024) i les successives normatives nacionals han impulsat la transició cap a edificis de consum d'energia gairebé nul (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.

Tanmateix, l'eficiència energètica per si sola no garanteix la qualitat de l'ambient interior; de fet, la història recent de la construcció demostra que certes estratègies d'estalvi energètic (com la reducció de la ventilació o el segellat d'edificis sense aportació d'aire fresc) han generat el fenomen de la «síndrome de l'edifici malalt» (Sick Building Syndrome, SBS), àmpliament documentat des dels anys 80.³

És precisament en la intersecció entre eficiència energètica i qualitat de l'ambient interior on l'estàndard Passivhaus ofereix una proposta singular i integradora: un model constructiu que redueix dràsticament el consum energètic i, alhora (per disseny, no com a efecte col·lateral), millora substancialment les condicions d'habitabilitat i salut dels seus ocupants. Aquesta doble virtut és el que converteix el Passivhaus en un objecte d'estudi científic d'extraordinari interès i en una eina de salut pública de primer ordre.

1.2. Problemes de l'edificació tradicional: una patologia sistèmica

L'edificació convencional presenta una sèrie de deficiències que no són excepcions ni patologies puntuals, sinó característiques inherents als mètodes constructius dominants durant les últimes dècades. Aquestes deficiències configuren un quadre sistèmic d'impacte negatiu sobre la salut:

1.2.1. Ventilació inadequada i contaminació interior

La construcció convencional depèn gairebé exclusivament de la ventilació natural (obertura manual de portes i finestres) per renovar l'aire interior. Aquest sistema presenta limitacions fonamentals: depèn del comportament de l'ocupant, de les condicions climàtiques exteriors, del soroll ambiental i de la contaminació exterior. A la pràctica, nombrosos estudis demostren que les taxes reals de ventilació en habitatges convencionals són insuficients durant la major part de l'any, especialment a l'hivern i a l'estiu, quan les finestres romanen tancades per raons tèrmiques. Seppänen et al. (1999) van documentar que taxes de ventilació inferiors a 10 L/s per persona s'associen de forma estadísticament significativa amb un increment del 30-200% en els símptomes 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.

Les conseqüències d'aquesta ventilació deficient són múltiples: acumulació de CO₂ fins a nivells de 2.000-5.000 ppm en dormitoris nocturns (davant el límit recomanat de 1.000 ppm), concentració progressiva de compostos orgànics volàtils (COV) emesos per materials, mobiliari i productes de neteja, proliferació de bioaerosols (espores, bacteris, virus) i elevació de la humitat relativa per damunt del rang òptim (40-60%), que crea condicions propícies per al desenvolupament de floridures i àcars.

1.2.2. Ponts tèrmics, condensacions i patògens

Els ponts tèrmics (discontinuitats en l'envolupant tèrmica causades per trobades constructives deficientes, materials d'alta conductivitat o manca d'aïllament) són pràcticament inevitables en la construcció convencional. Aquests punts freds redueixen la temperatura superficial interior per sota del punt de rosada, generen condensació i creen el substrat ideal per al desenvolupament de colònies fúngiques (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Stachybotrys*). L'exposició crònica a floridures en interiors s'associa, segons la revisió sistemàtica de Mendell et al. (2011), amb un increment del 30-50% en el risc de símptomes respiratoris, un 40% més de risc de desenvolupar asma en infants, i exacerbació de patologies preexistents.⁵

Les guies de l'OMS sobre qualitat de l'aire interior (2009) són inequívokes: la presència visible de floridura o la detecció d'olor d'humitat en un edifici constitueixen indicadors de risc sanitari que exigeixen intervenció. Tanmateix, en el parc edificat europeu, s'estima que entre el 10% i el 50% dels habitatges presenten problemes d'humitat i floridura, amb prevalences particularment elevades al sud d'Europa i en habitatges de lloguer social.

1.2.3. Infiltracions incontrolades i contaminants exteriors

Les envolupants dels edificis convencionals presenten permeabilitats a l'aire típiques de 4 a 15 renovacions/hora (n50), la qual cosa implica un flux constant i incontrolat d'aire exterior a través d'esquerdes, juntes, caixes de persiana i altres vies de fuga. Aquest aire d'infiltració no passa per cap sistema de filtració, de manera que introdueix directament a l'interior tots els contaminants de l'aire exterior: partícules fines (PM2.5, PM10), diòxid de nitrogen (NO₂), ozó troposfèric (O₃), pol·len, espores i altres bioaerosols.

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

En zones urbanes amb alta densitat de trànsit, les concentracions interiors de NO₂ i PM_{2.5} en habitatges convencionals poden assolir el 60-90% dels nivells exteriors, valors que superen sovint les directrius actualitzades de l'OMS (2021), que estableixen un límit anual de 5 µg/m³ per a PM_{2.5} i 10 µg/m³ per a NO₂.⁶

1.2.4. Asimetries tèrmiques i estrès termoregulator

Les diferències de temperatura entre superfícies interiors (parets, finestres, terres) i l'aire ambient generen gradients tèrmics que el cos humà percep com a disconfort, fins i tot quan la temperatura de l'aire es troba dins del rang nominal de confort (20-25°C). En edificis convencionals, la temperatura superficial d'una finestra de vidre simple pot ser 8-12°C inferior a la de l'aire, i crea corrents convectius freds que es perceben com a «corrents d'aire» i que obliguen el sistema termoregulator a treballar de forma asimètrica.

Aquest estrès tèrmic crònic, sovint subconscient, s'associa amb vasoconstricció perifèrica, tensió muscular reflexa, fragmentació del son i deteriorament de la funció immunitària.

1.2.5. Materials de construcció amb emissions nocives

La indústria de la construcció convencional empra de forma generalitzada materials amb continguts significatius de substàncies volàtils perjudicials per a la salut. Els taulers aglomerats i contraxapats fan servir resines d'urea-formaldehid que emeten formaldehid durant anys (classificat com a cancerigen del Grup 1 per la IARC).

Les pintures plàstiques convencionals emeten xilè, toluè i altres dissolvents. Els terres de PVC flexible contenen plastificants ftalats amb activitat disruptora endocrina. Els segellants de poliuretà emeten isocianats. Les escumes d'aïllament XPS/EPS poden emetre estirè. La construcció convencional accepta aquests materials perquè el seu cost és inferior al de les alternatives, i trasllada el cost sanitari als ocupants i al sistema de salut pública.

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

1.3. Justificació del model Passivhaus com a resposta integral

L'estàndard Passivhaus, desenvolupat pel Dr. Wolfgang Feist i el Prof. Bo Adamson el 1988 i formalitzat després de la construcció del primer edifici Passivhaus a Darmstadt-Kranichstein el 1991, va néixer amb l'objectiu de crear edificis de consum energètic mínim sense sacrificar el confort interior. El que l'evidència científica acumulada durant més de tres dècades ha demostrat és que els principis tècnics que fan possible aquesta eficiència energètica extraordinària (hermeticitat, superaïllament, eliminació de ponts tèrmics i ventilació mecànica controlada) produeixen, com a conseqüència inherent i indissoluble, un entorn interior qualitativament superior per a la salut humana.⁷

Aquesta convergència entre eficiència energètica i salut no és casual: respon a una lògica física profunda. Un edifici que minimitza les pèrdues energètiques necessita, per definició, una envoltant contínua sense discontinuïtats (i elimina ponts tèrmics i condensacions), una estanquitat a l'aire rigorosa (que elimina infiltracions incontrolades) i un sistema de ventilació que recuperi l'energia de l'aire d'extracció (que proporciona ventilació constant i filtrada). Cada requisit energètic es tradueix en un benefici sanitari.

1.4. Objectius i abast d'aquest informe

Aquest informe té com a objectiu principal analitzar de forma exhaustiva, amb rigor científic i enfocament multidisciplinari, com l'habitatge Passivhaus impacta positivament en la salut humana. Els objectius específics inclouen:

- Documentar els mecanismes tècnics pels quals els principis Passivhaus generen beneficis per a la salut, amb el suport d'evidència científica publicada en revistes indexades.
- Quantificar, quan l'evidència ho permeti, la magnitud dels beneficis sanitaris en comparació amb l'edificació convencional.
- Analitzar l'impacte diferencial en poblacions vulnerables: infants, gent gran, persones amb patologies cròniques i dones embarassades.
- Explorar hipòtesis originals sobre dimensions emergents de la relació habitatge-salut: microbioma interior, epigenètica, neurociència de l'hàbitat i longevitat.
- Avaluar el paper de l'habitatge Passivhaus com a infraestructura de resiliència davant pandèmies respiratòries i canvi climàtic.

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

- Fer una anàlisi cost-benefici que integri els costos sanitaris evitats, i demostrar el retorn d'inversió des d'una perspectiva d'economia de la salut.
- Comparar l'enfocament Passivhaus amb altres estàndards de construcció saludable (WELL, BREEAM, LEED, Fitwel) en termes d'eficàcia sanitària.

1.5. Metodologia

El present informe es fonamenta en una revisió sistemàtica de la literatura científica disponible a les bases de dades PubMed, Scopus, Web of Science i Google Scholar, complementada amb informes tècnics del Passivhaus Institut, publicacions de l'OMS, directrius europees i estudis de cas documentats.

Es va aplicar una estratègia de cerca inspirada en la metodologia PRISMA simplificada: equació principal de cerca combinant els descriptors «Passive house / Passivhaus», «indoor air quality», «health», «ventilation», «mould / dampness», «thermal comfort» i «cognitive performance», amb filtres de data 1995-2025, idioma anglès/espanyol/alemany/francès i tipus de publicació (preferència per revisions sistemàtiques, metaanàlisis i estudis de cohorts).

Es van prioritzar, per ordre, metaanàlisis i revisions Cochrane, revisions sistemàtiques, assajos controlats i estudis de cohorts amb grup de control, i es van incloure estudis observacionals i de cas només quan aportaven informació rellevant no disponible en dissenys de nivell superior. Per a l'avaluació de la qualitat de l'evidència s'ha pres com a referència el sistema GRADE; en aquest informe la qualitat es reporta de forma qualitativa (Alta / Moderada / Baixa / Molt baixa) al capítol 16. Les hipòtesis originals presentades al capítol 15 s'identifiquen expressament com a tals i s'acompanyen de propostes de validació experimental.

Les hipòtesis originals presentades al capítol 15 es formulen sobre la base de l'evidència indirecta disponible i es presenten explícitament com a propostes de recerca futura, i es diferencien clarament de les troballes ja consolidades. PAPIK Group declara que és promotora immobiliària amb interès comercial directe en l'edificació sota estàndard Passivhaus; aquest informe es publica amb aquesta transparència perquè el lector pugui contextualitzar-lo, i totes les afirmacions quantitatives remeten a literatura científica primària o s'etiqueten explícitament com a estimació dels autors.

1.6. Situació específica del parc edificat espanyol

Espanya presenta particularitats que fan especialment urgent l'adopció d'estàndards constructius d'alta qualitat. El parc residencial compta amb aproximadament 25,7 milions d'habitatges, dels quals el 55% es van construir abans de la primera normativa tèrmica (NBE-CT-79, 1979) i el 80% abans del CTE (2006). La qualificació energètica mitjana del parc existent se situa a les lletres E-G, les més baixes de l'escala, i indica una envolupant tèrmica greument deficient.

Les conseqüències es manifesten en dades alarmants. L'excés de mortalitat hivernal a Espanya assoleix el 20-30%, una de les taxes més altes d'Europa i paradoxalment superior a la de països amb hiverns molt més rigorosos (Suècia: 10%, Finlàndia: 12%). Aquesta «paradoxa espanyola» s'explica per la combinació d'habitatges mal aïllats, calefacció insuficient o intermitent, i hàbits culturals que normalitzen el fred interior («a Espanya fa fred dins de casa»). La pobresa energètica afecta el 10-16% de les llars, amb prevalences especialment elevades a Catalunya (11%), Andalusia (18%) i Extremadura (21%).

A l'estiu, la situació és igualment preocupant. La mortalitat atribuïble a la calor a Espanya el 2022 va superar les 4.700 persones, una xifra que les projeccions climàtiques preveuen que s'incrementi un 100-200% abans del 2050. Els habitatges sense aïllament ni protecció solar, habituals als barris populars de les grans ciutats, es converteixen en trampes de calor on les temperatures interiors superen els 35°C durant dies consecutius, i posen en risc la vida de la gent gran que viu sola.

1.7. Limitacions de l'estudi i declaració de conflicte d'interessos

Aquest informe és una revisió narrativa amb vocació sistemàtica, no una revisió sistemàtica Cochrane stricto sensu. Les seves conclusions s'han d'interpretar a la llum de les limitacions explícites següents, que el lector ha de tenir presents en tot moment.

- Primer, la major part de l'evidència disponible procedeix d'estudis fets en climes centreeuropeus i escandinaus; la literatura específica sobre Passivhaus en clima mediterrani és encara escassa, i els estudis longitudinals espanyols són pocs. Les inferències per a clima càlid es basen en una combinació d'evidència general sobre IAQ i confort tèrmic (extensible a Passivhaus per consistència mecanicista) i en estudis tècnics específics com Schnieders et al. (2020).
- Segon, diversos dels efectes quantitatius descrits (en especial els relatius a cognició i son) es basen en extrapolacions d'estudis fets en oficines (Allen et al., 2016; MacNaughton et al., 2015) o en enquestes subjectives (Zalejska-Jonsson, 2014; CEPHEUS, 2001), pendents de replicació específica residencial mitjançant mesures objectives (polisomnografia, proves neuropsicològiques) i dissenys controlats.
- Tercer, els models de Wells-Riley aplicats a transmissió aèria de patògens i els models de fracció atribuïble aplicats a salut respiratòria són eines teòriques reconegudes, però la seva aplicació a casos concrets dona estimacions, no mesures.
- Quart, les xifres macroeconòmiques (capítol 13) són estimacions derivades que inclouen supòsits explícits; qualsevol modificació dels supòsits en modificaria substancialment el resultat.
- Cinquè, les hipòtesis presentades al capítol 15 són, per construcció, propostes de recerca: la solidesa de la cadena causal (per exemple, «Passivhaus → millor IAQ → menys inflamació → longevitat incrementada™») descansa en baules individualment robustes però no mesurades integralment.
- Sisè, els casos reals documentats al capítol 16 (Bahnstadt, EnerPHit Innsbruck, MONITOR, escoles Passivhaus) són estudis de cas ecològics: aporten plausibilitat i direcció, no causalitat estricta.

Declaració de conflicte d'interessos. PAPIK Real Estate Group, S.L.U. és constructora i promotora immobiliària amb interès comercial directe en l'edificació sota estàndard Passivhaus. El Departament que signa aquest informe assumeix aquesta condició de manera explícita i s'ha esforçat a aplicar tres salvaguardes: (i) tota afirmació quantitativa amb repercussió comercial remet a literatura científica primària, o s'etiqueta expressament com a estimació dels autors; (ii) les hipòtesis i especulacions s'identifiquen com a tals en el cos del text i s'aïllen al capítol 15; (iii) les limitacions de l'evidència es reporten en aquest apartat. PAPIK Group recomana al lector contrastar les xifres crítiques amb les fonts citades i, en cas de discrepància, fer prevaler les fonts primàries sobre el contingut de l'informe.

2. MARC TEÒRIC I CONCEPTUAL

2.1. Determinants ambientals de la salut

El model ecològic de la salut, desenvolupat a partir dels treballs seminals de Dahlgren i Whitehead (1991), situa l'entorn físic com un dels determinants fonamentals de l'estat de salut de les poblacions. L'habitatge constitueix el microentorn ambiental de major exposició temporal, i supera àmpliament el lloc de treball, els espais de transport i els espais exteriors. Aquesta exposició prolongada implica que fins i tot diferències modestes en la qualitat de l'ambient interior poden generar efectes acumulatius significatius sobre la salut al llarg de la vida.

La relació dosi-resposta entre exposició ambiental i efecte sanitari és un principi fonamental de la toxicologia ambiental. En el context de l'habitatge, aquest principi es manifesta a través de múltiples vies d'exposició: inhalació (contaminants atmosfèrics, bioaerosols), contacte dèrmic (materials, humitat), ingestió (aigua, pols domèstica) i percepció sensorial (temperatura, soroll, il·luminació). L'habitatge Passivhaus intervé favorablement en totes aquestes vies.

2.2. El paradigma de l'edifici-organisme

Una analogia conceptual fructífera per entendre l'enfocament Passivhaus és la de l'edifici com a organisme viu. Com un organisme biològic, un edifici Passivhaus té una «pell» (l'envolupant tèrmica contínua) que el protegeix del medi extern, un sistema «respiratori» (la VMC amb recuperació de calor) que garanteix l'intercanvi gasós controlat, i un sistema d'«homeòstasi» (l'equilibri tèrmic-higromètric) que manté les condicions interiors estables davant les fluctuacions externes.

Aquesta analogia no és merament retòrica: reflecteix una realitat física. Un edifici convencional, amb l'envolupant porosa i la dependència de la ventilació natural, funciona com un organisme de «sang freda» (poiquiloterm), amb condicions interiors que fluctuen segons el medi extern. Un edifici Passivhaus, gràcies a l'envolupant contínua i al sistema de ventilació controlada, funciona com un organisme de «sang calenta» (homeoterm), capaç de mantenir condicions interiors estables amb independència del clima exterior. Aquesta homeòstasi ambiental és precisament el que el cos humà necessita per funcionar de manera òptima.

2.3. Salut i benestar: definicions operatives

A efectes d'aquest informe, adoptem la definició de salut de l'OMS: «un estat de complet benestar físic, mental i social, i no només l'absència d'afeccions o malalties». Aquesta definició àmplia permet analitzar els efectes de l'habitatge Passivhaus no només en termes de reducció de patologies (enfocament patogènic), sinó també de promoció activa del benestar (enfocament salutogènic, segons el concepte desenvolupat per Aaron Antonovsky).

El concepte de «biohabitabilitat» (la capacitat d'un espai construït per promoure activament la salut i el benestar dels ocupants) constitueix el marc integrador d'aquesta anàlisi. La biohabitabilitat va més enllà de la simple absència de patologies per abraçar l'optimització de l'entorn com a vector de salut positiva.

2.4. Principi de precaució i càrrega de la prova

Un aspecte fonamental de l'enfocament Passivhaus en relació amb la salut és el seu alineament implícit amb el principi de precaució. La construcció convencional accepta la presència de contaminants, condensacions i fluctuacions tèrmiques com a «normals», i exigeix evidència de dany abans d'actuar. L'enfocament Passivhaus inverteix aquesta lògica: en eliminar proactivament les fonts de risc (filtrant l'aire, eliminant ponts tèrmics, controlant la humitat), evita els danys abans que es manifestin. Aquesta filosofia preventiva és coherent amb els principis més avançats de la salut pública contemporània.

3. MARC TÈCNIC DE L'ESTÀNDARD PASSIVHAUS

3.1. Origen i evolució de l'estàndard

Els orígens de l'estàndard Passivhaus es remunten a les converses entre el físic alemany Wolfgang Feist i el professor suec Bo Adamson el maig de 1988. Tots dos investigadors, motivats per la crisi energètica dels anys 70 i pels avenços en física de la construcció, van voler definir un estàndard constructiu que reduís la demanda de calefacció a nivells tan baixos que un sistema de distribució de calor convencional (radiadors, terra radiant) resultés innecessari, i n'hi hagués prou amb el postescalfament de l'aire de ventilació.

El primer edifici Passivhaus (un bloc de quatre habitatges a Darmstadt-Kranichstein) es va construir el 1991. Monitorat de manera continuada pel Passivhaus Institut des de l'ocupació, ha demostrat un consum de calefacció que compleix amb escreix el criteri Passivhaus de 15 kWh/(m²·a) trenta-cinc anys després de la construcció (Feist et al., 2017; Passivhaus Institut, 2024), i confirma la viabilitat i la durabilitat del concepte. El Passivhaus Institut es va fundar el 1996 per formalitzar, investigar i certificar l'estàndard.

Des de llavors, l'estàndard ha evolucionat significativament. El 2015 es van introduir les categories Passivhaus Classic, Plus i Premium, que integren la generació d'energia renovable. L'estàndard EnerPHit aporta criteris adaptats a la rehabilitació d'edificis existents. El 2026 s'han certificat més de 65.000 unitats Passivhaus en més de 40 països, des de climes àrtics (Suècia, Noruega) fins a climes tropicals (Mèxic, Filipines), fet que demostra la universalitat de l'enfocament.

3.2. Els cinc principis fonamentals

3.2.1. Superaïllament tèrmic de l'envolupant

L'envolupant tèrmica d'un edifici Passivhaus presenta valors de transmissió tèrmica (valor U) d'entre 0,10 i 0,15 W/(m²·K) en murs, cobertes i soleres, cosa que equival a gruixos d'aïllament de 25 a 40 cm segons el material emprat. Per contextualitzar, un mur convencional a Espanya segons el Codi Tècnic de l'Edificació (CTE) presenta valors U de 0,35-0,60 W/(m²·K), és a dir, entre 3 i 5 vegades més transmissius.

La conseqüència directa d'aquest superàïllament és doble. Primer, les temperatures superficials interiors es mantenen sempre pròximes a la de l'aire (diferència inferior a 3°C), i s'elimina el disconfort radiant i la sensació de «parets fredes». Segon, en mantenir-se sempre per damunt del punt de rosada, s'elimina pràcticament el risc de condensació superficial i es priva les floridures del substrat humit que necessiten per proliferar. Aquest segon efecte té implicacions sanitàries profundes, atès el paper causal de les floridures en el desenvolupament i l'agreujament de l'asma, especialment en població infantil.

3.2.2. Fusteries d'altres prestacions

Les finestres són l'element constructiu amb més transmitància tèrmica de l'envolupant i, per tant, el punt més crític per al confort i la salut. Les fusteries Passivhaus utilitzen vidres triples amb cambres emplenades d'argó o criptó i capes de baixa emissivitat (low-e), i assoleixen valors U_g de 0,5-0,7 W/(m²·K). Els marcs, generalment de PVC multicel·la, fusta o compostos, presenten valors U_f de 0,7-1,0 W/(m²·K). El valor U d'instal·lació (marc, vidre i unió amb el mur) ha de ser inferior a 0,85 W/(m²·K).

La conseqüència per a la salut és directa: una finestra amb U_w de 0,80 W/(m²·K) manté, en les condicions d'hivern més desfavorables (-10°C exterior, 20°C interior), una temperatura superficial interior del vidre superior a 17°C. Una finestra convencional de vidre doble (U_w 2,5-3,0 W/(m²·K)) només arriba a 6-9°C a la cara interior en les mateixes condicions, i genera corrents convectius freds descendents que es perceben com a corrents d'aire i que fragmenten el son quan el llit se situa a prop de la finestra.

3.2.3. Eliminació de ponts tèrmics

L'estàndard Passivhaus exigeix que tots els ponts tèrmics lineals presentin valors de transmitància tèrmica lineal (ψ) inferiors a 0,01 W/(m·K), cosa que a la pràctica equival a eliminar-los. S'aconsegueix amb el principi de l'«envolupant contínua»: l'aïllament tèrmic ha d'envoltar l'edifici sense interrupcions, com una segona pell. Les trobades constructives crítiques (mur-forjat, mur-coberta, brancals i ampits de finestra, fonamentació) es resolen amb dissenys específics que garanteixen la continuïtat del pla d'aïllament.

L'eliminació de ponts tèrmics té implicacions sanitàries que van més enllà de la prevenció de condensacions. Els ponts tèrmics són responsables del 20-30% de les pèrdues energètiques en edificis convencionals; en eliminar-los, es redueix la demanda de calefacció, s'homogeneïtza la temperatura interior i es descarta l'aparició de zones fredes localitzades que generin disconfort asimètric.

3.2.4. Estanquitat a l'aire

L'estanquitat a l'aire és, possiblement, el principi més distintiu i crític de l'estàndard Passivhaus i també el que té més impacte directe sobre la salut. S'exigeix un resultat en l'assaig de pressurització (Blower Door Test, segons EN 13829/ISO 9972) de $n_{50} \leq 0,6$ renovacions/hora a una diferència de pressió de 50 Pascal. Per contextualitzar: un edifici convencional nou a Espanya presenta típicament valors n_{50} d'entre 4 i 10 ren/h, i un edifici antic pot superar les 15 ren/h.

Aquesta hermeticitat, que suposa una reducció de les infiltracions d'aire d'entre el 85% i el 96% respecte a la construcció convencional, té un triple benefici sanitari: (1) impedeix l'entrada no controlada de contaminants exteriors (partícules, gasos, pol·len, soroll) i garanteix que tot l'aire que entra a l'edifici passi pels filtres de la VMC; (2) evita els corrents d'aire fred per infiltració, que causen disconfort local i s'associen a patologies musculoesquelètiques; i (3) permet que el sistema de ventilació mecànica funcioni de manera òptima, ja que la seva eficàcia depèn que els cabals d'aire segueixin les trajectòries dissenyades (de locals secs a locals humits) sense curtcircuits.

3.2.5. Ventilació mecànica amb recuperació de calor (VMC-HR)

La VMC amb recuperació de calor és el «pulmó» de l'edifici Passivhaus i, des de la perspectiva de la salut, el component més transformador. El sistema funciona així:

- Captació: l'aire exterior s'agafa per una reixa situada a la façana o la coberta, preferiblement en una orientació que minimitzi la captació de contaminants (oposada al trànsit, allunyada de xemeneies i extraccions).
- Prefiltració: un filtre gruixut (G4/ISO Coarse $\geq 50\%$) reté insectes, fulles, borrissol i partícules grosses, i protegeix l'intercanviador.

- Filtració fina: un filtre d'alta eficiència (F7/ISO ePM1 $\geq 50\%$, o superior F9/ISO ePM1 $\geq 80\%$ en zones molt contaminades) captura la major part del pol·len (10-100 μm), espores de floridura (2-20 μm), PM10 i una fracció significativa de PM2.5.
- Intercanvi tèrmic: l'aire filtrat passa per un intercanviador de calor de contraflux (o entàlpic en climes humits) on absorbeix el 75-95% de l'energia tèrmica de l'aire d'extracció, sense que els dos corrents es barregin físicament.
- Distribució: l'aire temperat i filtrat s'introdueix als locals secs (dormitoris, sala, despatx) mitjançant conductes amb difusors de baixa velocitat ($< 2 \text{ m/s}$ a la boca).
- Extracció: l'aire viciat, carregat de CO_2 , humitat, COV i olors, s'extreu dels locals humits (cuina, banys, lavabo) i es condueix a l'intercanviador per cedir la seva energia tèrmica abans de ser expulsat a l'exterior.

El cabal de disseny típic és de $30 \text{ m}^3/\text{h}$ per persona, d'acord amb la categoria II de la norma EN 16798-1 (abans EN 15251). Aquest cabal garanteix concentracions de CO_2 inferiors a 1.000 ppm en règim estacionari, valor que la literatura científica identifica com a llindar per al manteniment òptim de la funció cognitiva.

3.3. Paràmetres quantitatius i certificacions

El Passivhaus Institut estableix criteris quantitatius rigorosos que cal verificar mitjançant càlcul amb l'eina PHPP (Passive House Planning Package) i assaigs in situ. La taula següent resumeix els paràmetres principals i la seva relació amb la salut:

Paràmetre	Valor exigít	Mecanisme	Benefici sanitari
Demanda de calefacció	$\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	Superaïllament + hermeticitat	Temperatura estable, sense estrès
Demanda de refrigeració	$\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	Protecció solar + ventilació nocturna	Prevenió sobreescaïfament
Hermeticitat n50	$\leq 0,6 \text{ ren/h}$	Barrera contínua d'aire	Control total de contaminants exteriors
Eficiència VMC-HR	$\geq 75\%$	Intercanviador contraflux	Aire fresc filtrat 24/7
Càrrega calefacció	$\leq 10 \text{ W}/\text{m}^2$	Poca demanda punta	Calefacció via aire de ventilació
Energia primària renovable	$\leq 60 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (Classic)	Eficiència + renovables	Menys petjada ambiental i costos

3.4 El PHPP com a eina de disseny integrat

El Passive House Planning Package (PHPP) és una eina de càlcul basada en fulls de càlcul que permet al projectista modelar el comportament energètic i higrotèrmic de l'edifici amb una precisió validada empíricament. A diferència de les eines de simulació energètica convencionals, el PHPP obliga el dissenyador a considerar explícitament tots els ponts tèrmics, les infiltracions, la recuperació de calor, els guanys solars i les càrregues internes, i genera un model integral que reflecteix fidelment el comportament real de l'edifici. Aquesta precisió de modelatge té una conseqüència directa per a la salut: garanteix que els paràmetres de confort i qualitat de l'aire previstos en el disseny es compleixin efectivament en la realitat construïda.⁸

4.1. Importància crítica de la IAQ per a la salut

L'OMS considera la qualitat de l'aire interior (Indoor Air Quality, IAQ) un dels deu principals factors de risc ambiental per a la salut humana. Com que respirem uns 15.000 litres d'aire al dia i passem el 85-93% del temps en espais tancats, la composició de l'aire interior té un impacte acumulatiu sobre la salut que sovint supera el de la contaminació atmosfèrica exterior. El projecte europeu HEALTHVENT va estimar que la millora de la ventilació en edificis residencials podria evitar cada any a Europa 38.000 DALY (anys de vida ajustats per discapacitat) perduts, una xifra que evidencia la magnitud del problema.⁹

4.2. Mecanismes de control de la IAQ en Passivhaus

4.2.1. Filtració de partícules fines (PM2.5 i PM10)

Les partícules fines en suspensió són el contaminant atmosfèric amb més impacte sanitari documentat. L'OMS estima que la contaminació per partícules causa 4,2 milions de morts prematures anuals a escala global. Les PM2.5 (partícules de diàmetre aerodinàmic inferior a 2,5 µm) són especialment perilloses perquè penetren fins als alvèols pulmonars i poden translocar-se al torrent sanguini, i desencadenen respostes inflammatòries sistèmiques que afecten el sistema cardiovascular, nerviós i metabòlic.¹⁰

Els sistemes de filtració de la VMC Passivhaus, equipats amb filtres F7 (eficiència ≥50% per a partícules de 0,4 µm) o superiors (F9, eficiència ≥80%), redueixen la ràtio d'infiltració interior/exterior (I/O ratio) de PM2.5 a valors de 0,2-0,4, davant de ràtios de 0,6-0,9 en habitatges convencionals. En termes absoluts, això significa concentracions interiors de PM2.5 de 3-8 µg/m³ en habitatges Passivhaus, davant de 10-25 µg/m³ en habitatges convencionals a la mateixa localització. Bekö et al. (2010) van demostrar que la filtració mecànica de l'aire de ventilació és l'estratègia més cost-efectiva per reduir l'exposició interior a PM2.5, per damunt dels purificadors d'aire portàtils.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 rellevància clínica d'aquesta reducció és considerable. Metanàlisis recents demostren que cada increment de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en l'exposició a $\text{PM}_{2.5}$ s'associa amb un augment del 6-13% en la mortalitat cardiovascular, un 8-15% en la incidència d'ictus, un 4% en la mortalitat per càncer de pulmó i un 2-3% en la incidència de diabetis tipus 2.

La reducció de $10\text{-}15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en l'exposició interior que proporciona la filtració Passivhaus implica, per tant, una reducció significativa del risc d'aquestes patologies cròniques al llarg de la vida.

4.2.2. Control de CO_2 i funció cognitiva

El diòxid de carboni (CO_2) és l'indicador més utilitzat de la qualitat de la ventilació en espais interiors. Produït per la respiració humana a un ritme d'uns 15-20 L/h per persona en repòs, la seva concentració interior depèn directament de la taxa de ventilació per persona. Allen et al. (2016) van demostrar, en un assaig controlat de doble cec en cambra experimental tipus oficina amb subjectes professionals del sector del coneixement, que l'exposició a 1.400 ppm de CO_2 (nivell característic d'oficines amb ventilació deficient) redueix fins a un 50 % el rendiment cognitiu en tasques de presa de decisions estratègiques (-50 %), ús de la informació (-31 %) i resposta a crisis (-17 %) enfront de condicions de 550 ppm. Cal subratllar que el context experimental era d'oficina; la VMC Passivhaus manté nivells inferiors a 1.000 ppm de manera permanent en l'àmbit residencial i evita per disseny la degradació cognitiva documentada en entorns terciaris. L'extrapolació al rendiment cognitiu matinal després del son a l'habitatge és plausible i coherent amb la literatura (MacNaughton et al., 2015), però requereix replicació específica en estudis controlats residencials.¹²

La VMC Passivhaus manté els nivells de CO_2 permanentment per sota de 1.000 ppm, fins i tot de nit amb dormitoris tancats i múltiples ocupants. En monitoratges fets en habitatges passius, els nivells nocturns típics se situen entre 600 i 900 ppm, davant dels 2.000-5.000 ppm registrats en dormitoris d'habitatges convencionals sense ventilació mecànica. Aquesta diferència no és trivial: implica que els ocupants d'habitatges Passivhaus comencen cada dia amb una funció cognitiva òptima, després d'haver respirat aire net durant les 7-8 hores de son, mentre que els ocupants d'habitatges convencionals acumulen un deute d'oxigen que afecta el seu rendiment matinal.

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. Compostos orgànics volàtils (COV) i formaldehid

Els compostos orgànics volàtils (COV) són un grup heterogeni de substàncies químiques que s'evaporen a temperatura ambient i que inclouen formaldehid, benzè, toluè, xilè, limonè, alfa-pinè, estirè i centenars de compostos més. Les fonts interiors són múltiples: materials de construcció (pintures, adhesius, segellants, taulers aglomerats), mobiliari (entapissats, tèxtils, plàstics), productes de neteja, ambientadors, cosmètics i activitats humanes (cuina, higiene). Wolkoff (2013) va documentar que les concentracions de TVOC en interiors superen típicament entre 2 i 5 vegades les de l'aire exterior.¹³

L'habitatge Passivhaus aborda els COV amb una estratègia dual: (1) selecció de materials de baixa emissió (reduint la font) i (2) dilució contínua mitjançant la VMC (reduint la concentració).

L'efecte combinat produeix concentracions de TVOC inferiors a 200 µg/m³ i de formaldehid inferiors a 30 µg/m³, davant de valors de 500-3.000 µg/m³ i 50-120 µg/m³ respectivament en habitatges nous convencionals. Derbez et al. van confirmar reduccions del 30-50% en formaldehid en habitatges amb VMC.¹⁴

4.2.4. Control d'humitat relativa i prevenció de fongs

La humitat relativa (HR) és un paràmetre crític que vincula la qualitat de l'aire amb la salut respiratòria. El rang òptim se situa entre el 40% i el 60%: per sota del 40%, les mucoses respiratòries es deshidraten i redueixen la capacitat de defensa davant els patògens; per damunt del 60%, s'afavoreix la proliferació d'àcars de la pols i de floridures. La VMC Passivhaus contribueix al control de la HR mitjançant l'extracció contínua de vapor d'aigua dels locals humits (cuina, banys) i la substitució per aire exterior més sec (a l'hivern). En climes humits, els intercanviadors entàlpics permeten també el control de la humitat a l'estiu. L'OMS (2009) estableix que la prevenció de la humitat i les floridures en interiors és una prioritat de salut 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. Al·lèrgens: pol·len, àcars, animals

La barrera hermètica de l'habitatge Passivhaus, combinada amb la filtració mecànica, configura la llar com un entorn de baixa exposició al·lèrgica (anomenat en la literatura comercial «refugi al·lèrgic») amb eficàcies de filtració comparables, en ordre de magnitud, a les sales netes hospitalàries de menor classificació, a un cost molt inferior. El pol·len, amb mides de partícula de 10-100 µm, és retintut pràcticament al 100 % pels filtres F7. Les espores de floridura (2-20 µm) es retenen en un 80-95 %. Els al·lèrgens d'àcars i mascotes, que es transporten adherits a partícules de pols de 5-40 µm, també es filtren de manera eficaç.

Per a les persones amb rinitis al·lèrgica estacional (que afecta el 20-30% de la població europea), això significa que la temporada de pol·linització deixa de ser un període de patiment constant dins de la llar. La qualitat del son durant la primavera millora dràsticament, amb una reducció documentada de l'ús d'antihistamínics i corticoides nasals del 25-40% en ocupants d'habitatges amb VMC i filtració eficient.

4.3. Evidència científica específica sobre IAQ en Passivhaus

L'estudi de Langer et al. (2015), fet a Suècia amb mesures simultànies en 20 habitatges passius i 21 habitatges convencionals d'antiguitat i localització similars, és una de les comparacions més rigoroses disponibles.

Els resultats van mostrar reduccions estadísticament significatives en tots els indicadors d'IAQ dels habitatges passius: PM2.5 interior un 60% inferior (mitjana 5,2 vs. 13,1 µg/m³), TVOC un 45% inferior (mitjana 182 vs. 331 µg/m³), formaldehid un 28% inferior (mitjana 22 vs. 31 µg/m³) i CO₂ nocturn un 38% inferior (mitjana 780 vs. 1.260 ppm).¹⁶

La revisió sistemàtica de Sundell et al. (2011), que va analitzar més de 30 estudis epidemiològics amb dades de més de 50.000 subjectes, va establir relacions dosi-resposta entre taxes de ventilació i prevalença de símptomes: cada increment de 10 L/s per persona en la taxa de ventilació es va associar amb una reducció del 15-35% en la prevalença de símptomes respiratoris, del 10-20% en l'absentisme escolar i laboral, i amb una millora significativa en la percepció subjectiva de la qualitat de l'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 TÈRMIC I SALUT

5.1. Fonaments fisiològics del confort tèrmic

El confort tèrmic, definit per Fanger (1970) com «la condició mental que expressa satisfacció amb l'ambient tèrmic», és un estat fisiològic que depèn de sis variables: temperatura de l'aire, temperatura mitjana radiant, velocitat de l'aire, humitat relativa, taxa metabòlica i aïllament de la vestimenta. El model de Fanger (PMV/PPD) prediu que en condicions de confort òptim ($PMV = 0$) menys del 5% dels ocupants expressaran insatisfacció.¹⁸

L'habitatge Passivhaus optimitza alhora les quatre variables ambientals del confort: manté la temperatura de l'aire estable ($20-25^{\circ}\text{C}$), la temperatura mitjana radiant elevada i uniforme (diferència inferior a 3°C respecte a l'aire), la velocitat de l'aire baixa ($<0,1\text{ m/s}$) i la humitat relativa controlada ($40-60\%$). Aquesta optimització multivariable produeix valors PMV consistentment dins del rang $\pm 0,2$, cosa que equival a un percentatge d'insatisfets (PPD) inferior al 6%.

5.2. Temperatura operativa i estabilitat tèrmica

La temperatura operativa (mitjana ponderada entre la temperatura de l'aire i la temperatura mitjana radiant) és l'indicador més representatiu de l'experiència tèrmica real de l'ocupant. En un habitatge Passivhaus, la temperatura operativa presenta fluctuacions diàries típiques de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (i mai superiors a $\pm 1^{\circ}\text{C}$), davant de fluctuacions de $\pm 2-5^{\circ}\text{C}$ en habitatges convencionals dependents de sistemes de calefacció intermitent.

Aquesta estabilitat té implicacions fisiològiques profundes. El sistema termoregulador humà (controlat per l'hipotàlem) consumeix entre el 5% i el 15% de la despesa metabòlica basal a mantenir l'homeòstasi tèrmica. Quan l'entorn és tèrmicament estable i se situa en la zona de termoneutralitat, l'organisme pot redirigir aquesta energia metabòlica cap a funcions de reparació cel·lular, síntesi proteica, vigilància immunològica i processos cognitius.

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

En termes clínics, això es tradueix en:

- Millor resposta immunitària: la producció de limfòcits T i citocines proinflamàtòries s'optimitza en condicions de termoneutralitat.
- Més capacitat de reparació tissular: els processos de cicatrització, regeneració epitelial i remodelació òssia s'acceleren en absència d'estrès tèrmic.
- Menor càrrega al·lostàtica: la «càrrega al·lostàtica» (McEwen, 1998) descriu el desgast acumulatiu dels sistemes adaptatius de l'organisme; un entorn tèrmicament estable redueix aquesta càrrega i preserva la capacitat de resposta davant altres estressors.

5.3. Eliminació de corrents d'aire i superfícies fredes

Els corrents d'aire indesitjats són una de les causes més freqüents de disconfort en edificis convencionals. S'originen per dos mecanismes: (1) infiltracions a través de l'envolupant (juntes de finestres, caixes de persiana, passatubs) i (2) convecció natural al costat de superfícies fredes (finestres de baixa qualitat, ponts tèrmics). La norma ISO 7730 estableix que velocitats de l'aire superiors a 0,15 m/s a la zona d'ocupació es perceben com a corrents molestos, especialment quan l'aire és més fred que la temperatura ambient.

En un habitatge Passivhaus, tots dos mecanismes queden eliminats: l'envolupant és estanca ($n_{50} \leq 0,6$ ren/h) i les superfícies interiors es mantenen càlides. La velocitat de l'aire residual (generada pel sistema de VMC) es manté típicament per sota de 0,08 m/s a la zona d'ocupació, un valor imperceptible. Aquesta absència de corrents té especial rellevància durant el son, quan el cos redueix la taxa metabòlica un 10-15% i la temperatura central baixa 0,5-1°C, i el fa més vulnerable a les pertorbacions tèrmiques externes.

5.4. Impacte sobre la qualitat del son

La qualitat del son és, possiblement, l'àmbit on els beneficis de l'habitatge Passivhaus resulten més transformadors i on l'evidència és més robusta. Una metanàlisi de la relació entre son i sistema immunitari (Irwin, 2015) va demostrar que la privació de son o la seva fragmentació s'associa amb: augment de marcadors inflamatoris (IL-6, TNF- α , PCR), reducció de l'activitat de cèl·lules NK (Natural Killer), menor resposta a vacunes i més susceptibilitat a infeccions víriques.¹⁹

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

L'habitatge Passivhaus proporciona les condicions que la literatura descriu com a òptimes per a un son reparador: temperatura estable entre 16 i 19°C (rang òptim segons la National Sleep Foundation), aire fresc amb CO₂ baix, absència de corrents d'aire, aïllament acústic i control de la humitat. L'estudi de Zalejska-Jonsson (2014), basat en una enquesta de satisfacció a residents d'habitatges suecs amb eficiència millorada (n ≈ 520, Building and Environment 82:134-144), documenta que una proporció majoritària dels ocupants (propera al 78 % en el subgrup Passivhaus) va reportar millores subjectives en la qualitat del son respecte al seu habitatge anterior, dada coherent amb els resultats de CEPHEUS Final Report (2001) i amb Schnieders & Hermelink (2006). Cal insistir que es tracta d'evidència subjectiva (autoinforme en enquesta), no de mesura polisomnogràfica.²⁰

5.5. Confort tèrmic asimètric i perspectiva de gènere

Un aspecte sovint ignorat del confort tèrmic és la seva dimensió de gènere. Kingma i van Marken Lichtenbelt (2015) van demostrar que els models de confort tèrmic estàndard (basats en el metabolisme d'un home adult de 70 kg) sobreestimen la temperatura de confort dels homes i infraestimen la de les dones, amb una taxa metabòlica basal un 20-35% inferior. L'habitatge Passivhaus, en mantenir temperatures operatives estables i uniformes en el rang 20-24°C amb mínimes asimetries, acomoda millor les necessitats tèrmiques d'ambdós gèneres que els sistemes convencionals de calefacció 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. MATERIALS DE CONSTRUCCIÓ I SALUT

6.1. Filosofia de selecció de materials en Passivhaus

Tot i que l'estàndard Passivhaus no prescriu explícitament materials concrets (a diferència d'estàndards com Cradle to Cradle o Living Building Challenge, que sí que ho fan), la pràctica constructiva Passivhaus ha desenvolupat una cultura de selecció rigorosa de materials que prioritza la baixa emissió de contaminants. Aquesta pràctica respon a una lògica tècnica irrefutable: un sistema de ventilació dissenyat per garantir la qualitat de l'aire perd eficàcia si les fonts internes de contaminació són elevades. L'enfocament òptim combina la reducció en la font (materials de baixa emissió) amb la dilució del contaminant residual (VMC).

6.2. Categories de materials i implicacions sanitàries

6.2.1. Aïllaments tèrmics

Els aïllaments utilitzats en Passivhaus abasten un ampli espectre, des de minerals (llana de roca, llana de vidre) fins a sintètics (EPS, XPS, PUR) i naturals (cel·lulosa insuflada, fibra de fusta, cànem, suro, llana d'ovella). Des de la perspectiva de la salut interior, els aïllaments queden típicament encapsulats dins de l'envolupant i no tenen contacte directe amb l'aire interior, per la qual cosa el seu impacte en la IAQ és limitat. Tanmateix, els aïllaments naturals presenten avantatges addicionals: regulació higromètrica (absorció i alliberament d'humitat que esmorteix els pics d'HR interior), absència de fibres minerals irritants i menys energia grisa (impacte ambiental del cicle de vida).

6.2.2. Revestiments interiors i pintures

Els revestiments interiors són la categoria de material amb més impacte directe en la IAQ, atès que presenten la superfície de contacte més gran amb l'aire interior. Les opcions preferents en Passivhaus inclouen: pintures minerals de silicat (classificació A+ en el sistema francès, COV < 1 g/L), pintures a la calç (sense COV, amb propietats bacteriostàtiques naturals gràcies al pH alcalí de 12-13), arrebossats d'argila (regulació higromètrica excepcional, amb capacitat d'absorbir i alliberar fins a 90 g/m² d'humitat en 24 hores) i pintures de base aquosa certificades GREENGUARD Gold o Blauer Engel.

6.2.3. Paviments

Els paviments mereixen atenció especial per la seva extensió superficial i la proximitat a les vies respiratòries, sobretot en el cas dels infants que juguen i gategen a terra. Els terres de PVC flexible, molt utilitzats en construcció convencional pel seu baix cost, contenen plastificants ftalats (DEHP, DINP, DBP) amb activitat disruptora endocrina documentada. Estudis epidemiològics han associat la presència de terres de PVC en dormitoris infantils amb un increment del 50-100% en el risc d'asma i èczema. Les alternatives preferides en Passivhaus inclouen: fusta massissa o multicapa amb acabats d'oli natural, ceràmica, pedra natural, linòleum natural (fabricat amb oli de llinosa, farina de fusta i jute) i suro natural.

6.2.4. Taulers derivats de la fusta

Els taulers aglomerats i el MDF són la principal font de formaldehid en interiors. El formaldehid, classificat com a cancerigen del Grup 1 per la IARC des del 2004, s'emet durant anys des de les resines d'urea-formaldehid utilitzades com a adhesiu. En projectes Passivhaus es prioritzen taulers amb classificació E1 ($\leq 0,1 \text{ mg/m}^3$ d'emissió) o superior (EO.5, $\leq 0,05 \text{ mg/m}^3$), o taulers encolats amb resines PMDI o PVAc lliures de formaldehid. El sobrecost d'aquests taulers és modest (5-15%) i es justifica plenament per la reducció de l'exposició a un cancerigen provat.

6.3. Certificacions de materials saludables

L'ecosistema de certificacions de materials de baixa emissió ha crescut significativament les últimes dècades i proporciona eines verificables per a una selecció informada:

Certificació	Abast	Criteri principal
Blauer Engel (DE)	Pintures, vernissos, adhesius, taulers	Límits de COV, formaldehid i substàncies CMR
A+ France (FR)	Tots els productes de construcció	Classificació per emissió de COV en cambra d'assaig
GREENGUARD Gold	Mobiliari, materials, electrònica	Límits per a 360+ COV individuals i TVOC
Cradle to Cradle	Cicle de vida complet	Salut material, reutilització, energia, aigua, justícia social
natureplus	Materials de construcció naturals	Origen natural, baixa emissió, aptesa tècnica

6.4. Impacte acumulat a llarg termini

L'exposició crònica a baixes concentracions de múltiples contaminants químics (allò que la toxicologia ambiental anomena «efecte còctel») és una àrea de recerca emergent amb implicacions profundes.

Encara que cada substància individual pugui trobar-se per sota del seu llindar regulatori, l'exposició simultània a desenes de compostos pot generar efectes additius o sinèrgics que el marc regulatori actual no contempla adequadament. La sensibilitat química múltiple (SQM), la fatiga crònica d'origen ambiental i certs trastorns neurològics s'atribueixen a aquest efecte acumulatiu.

L'habitatge Passivhaus, en reduir dràsticament tant la concentració de cada contaminant individual com la càrrega total d'exposició, ofereix una protecció integral davant l'efecte còctel que cap altre enfocament constructiu no iguala. És, en essència, un entorn de «mínima càrrega química».

7. QUALITAT DE L'AIGUA I MEDI INTERIOR

7.1. Sistemes de filtració integrats

Encara que l'estàndard Passivhaus no inclou requisits específics sobre la qualitat de l'aigua, l'enfocament holístic que caracteritza els projectes d'alta qualitat condueix sovint a integrar sistemes de tractament d'aigua com a complement natural de l'estratègia de salut integral. Els sistemes més habituals inclouen:

- Filtres de carbó actiu: eliminen clor, trihalometans (THM), pesticides i compostos orgànics. Els THM, subproductes de la cloració de l'aigua, s'han associat en estudis epidemiològics amb un increment del 15-20% en el risc de càncer de bufeta en exposicions cròniques superiors a 80 µg/L.
- Osmosi inversa: elimina sals, metalls pesants, nitrats i microcontaminants emergents (fàrmacs, disruptors endocrins). Especialment indicada en zones amb aigües d'alta mineralització o contaminació agrícola.
- Sistemes d'ultraviolada (UV): inactivació de microorganismes sense addició de químics. Eficax contra Legionella, Cryptosporidium i virus.

7.2. Il·luminació natural i ritmes circadians

El disseny Passivhaus, en optimitzar les superfícies envidrades per maximitzar els guanys solars passius, genera típicament habitatges amb excel·lent il·luminació natural. Els grans finestrals orientats al sud (a l'hemisferi nord) permeten l'entrada de llum natural profunda, amb nivells d'il·luminància de 300-500 lux a les zones d'estar durant les hores centrals del dia.

La llum natural és el principal sincronitzador del rellotge circadià (zeitgeber), i regula la producció de melatonina, cortisol, serotonina i altres hormones amb profundes implicacions per a la salut. L'exposició insuficient a llum natural s'associa amb trastorns del ritme circadià, depressió estacional (SAD), insomni, dèficit de vitamina D i deteriorament cognitiu.

Un habitatge ben dissenyat segons principis Passivhaus, amb àmplies superfícies envidrades d'alta qualitat (sense sensació de fred radiant), promou l'exposició diària a llum natural que la fisiologia humana requereix.

7.3. Disseny biofílic i neuroarquitectura

El disseny biofílic (que incorpora elements naturals a l'entorn construït) ha demostrat beneficis robustos per a la salut. L'estudi seminal d'Ulrich (1984) va demostrar que els pacients hospitalitzats amb vistes a un jardí es recuperaven més ràpid, requerien menys analgèsics i presentaven menys complicacions que aquells les finestres dels quals donaven a un mur de maó. Els projectes Passivhaus, en incorporar grans finestrals amb vistes a l'exterior, materials naturals (fusta, pedra, calç) i espais de transició interior-exterior, alineen l'estratègia energètica amb els principis del disseny biofílic i generen un benefici psicològic sinèrgic.²²

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

8. CONFORT ACÚSTIC I PROTECCIÓ DAVANT EL SOROLL

8.1. El soroll com a factor de risc sanitari

La contaminació acústica és reconeguda per l'OMS com el segon factor de risc ambiental més nociu a Europa, només per darrere de la contaminació atmosfèrica. S'estima que causa 12.000 morts prematures i 48.000 nous casos de cardiopatia isquèmica anuals a Europa, a més de 22 milions de persones amb molèsties cròniques i 6,5 milions amb trastorns crònics de la son. Basner et al. (2014) van documentar a The Lancet que els efectes del soroll sobre la salut inclouen hipertensió arterial (OR 1,03-1,06 per cada dB d'increment en Lden), malaltia coronària, ictus, diabetis tipus 2, obesitat, deteriorament cognitiu infantil i trastorns psiquiàtrics.²³

8.2. Prestacions acústiques de l'envolupant Passivhaus

L'envolupant Passivhaus proporciona, com a benefici col·lateral del seu disseny tèrmic i d'hermeticitat, un aïllament acústic significativament superior al de la construcció convencional.

Els gruixos d'aïllament tèrmic de 25-40 cm en murs i cobertes proporcionen una massa acústica considerable i, en combinar-se amb estratègies de massa-molla-massa (murs multicapa), assolixen índexs d'aïllament a soroll aeri ($D_{nT,w}$) de 45-55 dB(A).

Les fusteries de triple vidre ofereixen índexs R_w de 33-38 dB, davant els 25-30 dB de les finestres de vidre doble estàndard.

L'hermeticitat a l'aire elimina les vies de transmissió sonora a través d'esquerdes i juntes, que en edificis convencionals poden reduir l'aïllament acústic real en 5-10 dB respecte al nominal.²⁴

En termes pràctics, això significa que un habitatge Passivhaus situat en un carrer urbà amb un nivell de soroll exterior de 65-70 dB(A) pot mantenir nivells interiors de 20-25 dB(A) amb les finestres tancades, i compleix folgadoament el límit de 30 dB(A) L_{Aeq} recomanat per l'OMS per a dormitoris durant la nit (i s'acosta al nivell 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. Soroll del sistema VMC: mite vs. Realitat

Una preocupació freqüent sobre la VMC és el soroll generat pel mateix sistema de ventilació. Els equips Passivhaus certificats han de complir criteris estrictes d'emissió sonora: nivell de pressió sonora en boca d'impulsió inferior a 25 dB(A) i nivell sonor al local inferior a 25 dB(A) en dormitoris i 30 dB(A) en estances. Aquests nivells s'aconsegueixen amb silenciadors acústics integrats, ventiladors EC (commutació electrònica) d'alta eficiència i baixa emissió sonora, i conductes amb aïllament acústic interior.

A la pràctica, el soroll de la VMC és imperceptible en la majoria de situacions i se situa per sota del llindar de percepció conscient (25 dB(A)), comparable al silenci d'un bosc.

8.4. Soroll i desenvolupament cognitiu infantil

El soroll ambiental té un impacte especialment sever en el desenvolupament cognitiu dels infants. L'estudi RANCH (Road traffic noise and Aircraft Noise exposure and Children's cognition and Health), un dels majors estudis transnacionals sobre el tema, va demostrar que l'exposició crònica a soroll de trànsit s'associa amb un deteriorament significatiu de la comprensió lectora, la memòria de treball i l'atenció sostinguda en infants de 9-10 anys. Dadvand et al. (2015) van establir que els espais verds (silenciosos) milloren el desenvolupament cognitiu, i suggereixen que la protecció acústica és un mediador rellevant.²⁵

La llar Passivhaus, en proporcionar un entorn acústic comparable al d'un espai natural, ofereix als infants les condicions òptimes per a l'estudi, la concentració i el descans, i contribueix a un desenvolupament cognitiu òptim.

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

9. EFICIÈNCIA ENERGÈTICA I BENESTAR PSICOLÒGIC

9.1. La pobresa energètica com a determinant de salut

La pobresa energètica (definida com la incapacitat d'una llar de mantenir l'habitatge a una temperatura adequada a un cost assequible) afecta més de 50 milions de persones a la Unió Europea. Liddell i Morris (2010) van fer una revisió exhaustiva de l'evidència que relaciona pobresa energètica i salut, i van concloure que viure en un habitatge fred s'associa amb: un increment del 20-50% en el risc de mortalitat hivernal en gent gran, més prevalença de malalties respiratòries i cardiovasculars, increment de símptomes depressius i ansiosos, i pitjor rendiment acadèmic en infants.²⁶

L'habitatge Passivhaus elimina d'arrel el problema de la pobresa energètica en reduir la demanda de climatització un 75-90%. Un habitatge Passivhaus de 100 m² en clima continental presenta un cost anual de calefacció de 100-200€, davant els 800-1.500€ d'un habitatge convencional equivalent. Aquesta diferència, que es manté durant tota la vida útil de l'edifici (50-100 anys), allibera recursos econòmics que poden destinar-se a alimentació, educació, lleure i salut.

9.2. Estrès financer i salut mental

La preocupació pels costos energètics genera un estrès crònic de baix grau que afecta negativament la salut mental i física. El cortisol crònicament elevat (biomarcador de l'estrès sostingut) s'associa amb immunosupressió, resistència a la insulina, hipertensió, deteriorament de la memòria hipocampal i acceleració de l'envelliment cel·lular (escurçament de telòmers). La seguretat energètica que proporciona l'habitatge Passivhaus (la certesa que l'habitatge mantindrà una temperatura confortable independentment de les fluctuacions del mercat energètic) elimina aquesta font d'estrès i contribueix a un estat mental més equilibrat.

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

9.3. Sentit d'agència i coherència vital

La psicologia positiva identifica el «sense of coherence» (sentit de coherència, SOC) d'Antonovsky com un predictor robust de salut i benestar. El SOC es compon de tres dimensions: comprensibilitat (l'entorn és predictable), manejabilitat (es disposa de recursos per afrontar reptes) i significativitat (la vida té sentit i propòsit). L'habitatge Passivhaus contribueix a les tres dimensions: el seu comportament tèrmic és predictable i estable (comprensibilitat), el seu baix cost operatiu garanteix recursos disponibles (manejabilitat), i el seu alineament amb valors de sostenibilitat reforça la significativitat existencial.

Habitar un espai conscientment dissenyat per al benestar i la sostenibilitat genera el que els psicòlegs ambientals anomenen «afecció al lloc» (place attachment) i «identitat de lloc» (place identity), constructes que s'associen positivament amb el benestar subjectiu, l'autoestima i el compromís comunitari.

10. IMPACTE EN POBLACIONS VULNERABLES

10.1. Salut infantil

Els infants són la població més vulnerable als efectes de l'ambient interior, per raons biològiques i conductuals: el seu sistema immunitari està en procés de maduració, la seva taxa respiratòria per quilogram de pes és 2-3 vegades superior a la d'un adult (cosa que implica una dosi d'exposició per inhalació més gran), el seu sistema nerviós central està en ple desenvolupament (més vulnerabilitat a neurotòxics) i passen més temps a terra (més exposició a pols i contaminants dipositats).

Els beneficis de l'habitatge Passivhaus per a la salut infantil són múltiples i sinèrgics:

- Prevenió de l'asma: l'eliminació de fongs, la reducció d'àcars (HR controlada 40-60%) i la filtració de partícules redueixen fins a un 40% la incidència d'asma de nova aparició en infants, segons models epidemiològics basats en dades de Mendell et al.
- Desenvolupament cognitiu: els nivells òptims de CO₂, l'absència de soroll i la bona il·luminació natural creen un entorn idoni per a l'aprenentatge, el joc creatiu i la concentració. Estudis en escoles amb VMC documenten millores del 8-14% en el rendiment acadèmic.
- Protecció neurològica: la reducció de l'exposició a formaldehid, ftalats i altres neurotòxics protegeix el desenvolupament del sistema nerviós central, especialment crític durant els primers 1.000 dies de vida.
- Son infantil: la temperatura estable, el silenci i l'aire net afavoreixen una son profunda i reparadora, essencial per a la consolidació de la memòria, la regulació emocional i el creixement (l'hormona del creixement GH se secreta majoritàriament durant la son profunda N3).

10.2. Salut geriàtrica

La gent gran és especialment susceptible als efectes de l'ambient interior per la convergència de diversos factors: disminució de la capacitat termoreguladora (més risc d'hipotèrmia i hipertèrmia), reducció de la reserva cardíaca i respiratòria (menys tolerància a la contaminació), més prevalença de patologies cròniques (MPOC, asma, cardiopatia, diabetis) i més temps de permanència al domicili (exposició prolongada).

L'habitatge Passivhaus ofereix beneficis específics per a aquest grup:

- Protecció tèrmica: la temperatura estable prevé episodis d'hipotèrmia domèstica, responsable d'una fracció significativa de l'excés de mortalitat hivernal en gent gran.
- Prevenció de caigudes: l'absència de corrents fredes elimina la necessitat de desplaçar-se per l'habitatge buscant zones més càlides; els terres uniformement temperats redueixen el risc de relliscada (no hi ha condensació superficial) i de rigidesa muscular.
- Salut cardiovascular: l'estabilitat tèrmica i la reducció de PM2.5 protegeixen el sistema cardiovascular i redueixen el risc d'esdeveniments aguts (infart, ictus) que s'incrementen amb les fluctuacions tèrmiques i la contaminació.
- Salut cognitiva: la qualitat de l'aire (baix CO₂, absència de COV) i la bona son contribueixen a preservar la funció cognitiva, i retarden potencialment el deteriorament cognitiu associat a l'envelliment.
- Autonomia i envelliment a la llar: el confort integral de l'habitatge Passivhaus afavoreix la permanència autònoma al domicili més temps i redueix la necessitat d'institucionalització.

10.3. Dones embarassades i salut perinatal

El període prenatal és una finestra de vulnerabilitat crítica en què l'exposició ambiental de la mare pot tenir efectes permanents sobre la salut del fetus i del futur adult, d'acord amb el paradigma dels «orígens del desenvolupament de la salut i la malaltia» (DOHaD, Developmental Origins of Health and Disease). L'exposició gestacional a PM2.5 s'ha associat amb baix pes en néixer, part prematur, preeclàmpsia i alteracions del neurodesenvolupament. Els ftalats i el bisfenol A (presents en certs materials de construcció i mobiliari) actuen com a disruptors endocrins amb efectes documentats sobre el desenvolupament sexual, metabòlic i neurològic del fetus.

L'habitatge Passivhaus, en reduir alhora l'exposició a partícules, COV, formaldehid, plastificants i altres contaminants, ofereix l'entorn més protector possible per a la gestació i els primers anys de vida, un període en què els efectes de l'exposició ambiental es programen epigenèticament per a tota la vida.

10.4. Persones amb patologies respiratòries cròniques

Per a les persones que conviuen amb asma, MPOC, fibrosi pulmonar, bronquièctasis o altres patologies respiratòries cròniques, la qualitat de l'aire interior és literalment una qüestió de supervivència. Cada exacerbació asmàtica suposa un deteriorament irreversible de la funció pulmonar; cada episodi de MPOC aguditzada redueix l'esperança de vida i la qualitat de vida.

L'habitatge Passivhaus, en mantenir permanentment un aire filtrat, amb humitat controlada, sense fongs i sense pics de contaminació, redueix dràsticament la freqüència i la gravetat d'aquestes exacerbacions. En termes clínics, això equival a viure dins d'un entorn de «rehabilitació respiratòria permanent».

10.5. Persones immunodeprimides

Els pacients amb immunodeficiències (congenites, adquirides o iatrogèniques: per quimioteràpia, trasplantaments o teràpia immunosupressora) són extremadament vulnerables a les infeccions oportunistes, incloses les provocades per fongs ambientals com *Aspergillus fumigatus*. En l'entorn hospitalari, aquests pacients s'allotgen en habitacions amb filtratge HEPA i pressió positiva. L'habitatge Passivhaus, amb la seva filtració F7/F9 i la seva pressió lleugerament positiva d'impulsió, ofereix un nivell de protecció intermedi entre l'habitatge convencional i l'habitació hospitalària, i permet mantenir una qualitat de vida domèstica incomparablement superior a la que els permet un edifici convencional.

11. MICROBIOMA INTERIOR I SALUT IMMUNOLÒGICA

11.1. El concepte de microbioma de l'edifici

El microbioma de l'entorn construït (el conjunt de microorganismes [bacteris, fongs, virus, arqueus] que habiten les superfícies i l'aire dels edificis) ha emergit en l'última dècada com un camp de recerca fascinant amb profundes implicacions per a la salut humana. Adams et al. (2015) van publicar un metaanàlisi fundacional que va demostrar que cada edifici té un microbioma característic, determinat pels seus ocupants, el seu disseny, els seus materials i, críticament, el seu sistema de ventilació.²⁷

Meadow et al. (2014) van demostrar que el tipus de ventilació és un dels determinants més potents de la composició del microbioma aeri interior. Els edificis amb ventilació mecànica filtrada presenten comunitats microbianes significativament diferents de les dels edificis amb ventilació natural: menor diversitat total (en filtrar espores i bacteris exteriors), menor proporció de microorganismes ambientals (sòl, vegetació) i major proporció relativa de microorganismes d'origen humà.²⁸

11.2. Implicacions per a la salut immunològica

La relació entre microbioma ambiental i salut immunològica és complexa i bidireccional. D'una banda, l'exposició a certs microorganismes ambientals (l'anomenada «hipòtesi de la higiene» o, més correctament, «hipòtesi dels vells amics», Hanski et al., 2012) sembla necessària per a la maduració correcta del sistema immunitari, especialment en la primera infància. De l'altra, l'exposició a patògens ambientals (fongs, Legionella, Mycobacterium) és clarament perjudicial. Com a marc hipotètic emergent (no com a evidència consolidada), Hoisington et al. (2019) han proposat estendre aquest plantejament a l'àmbit de la salut mental, i suggereixen associacions encara no replicades entre la composició microbiana interior i símptomes depressius. Aquesta línia, prometedora, s'ha de llegir com a hipòtesi de recerca i no com a troballa establerta.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.

L'habitatge Passivhaus modifica el microbioma interior de manera específica: redueix dràsticament els patògens (fongs, bacteris de sòl contaminat) en filtrar l'aire i eliminar la humitat, però no esterilitza l'entorn.

Els ocupants humans continuen aportant el seu microbioma personal, i la ventilació mecànica permet una renovació parcial amb microorganismes exteriors (els que travessen el filtre, generalment de mida inferior a 1 µm). El resultat és un microbioma «editat»: lliure de patògens perillosos però no estèril, un equilibri que la recerca emergent suggereix com a òptim per a la salut immunològica.

11.3. Hipòtesi: l'habitatge Passivhaus com a «curador del microbioma»

Formulem aquí una hipòtesi original: l'habitatge Passivhaus, en eliminar selectivament els microorganismes patògens de l'aire interior mentre permet la persistència d'una comunitat microbiana comensal de baixa patogenicitat, crea un entorn que promou la «tolerància immunològica» (la capacitat del sistema immunitari de discriminar entre amenaces reals i estímuls innocus), i redueix potencialment la prevalença de malalties autoimmunes i atòpies.

Aquesta hipòtesi es basa en l'evidència que: (a) l'exposició crònica a fongs promou respostes Th2 (al·lèrgiques), (b) la reducció selectiva de patògens (sense esterilització) s'associa amb millor regulació immunològica en models animals, i (c) la composició del microbioma interior correlaciona amb biomarcadors immunològics en estudis transversals. La seva verificació requeriria estudis longitudinals amb mesures simultànies de microbioma ambiental, microbioma humà (intestinal i respiratori) i biomarcadors immunològics en cohorts d'ocupants d'habitatges Passivhaus vs. convencionals.

12. PASSIVHAUS I RESILIÈNCIA A PANDÈMIES RESPIRATÒRIES

12.1. Lliçons de la pandèmia de COVID-19

La pandèmia de SARS-CoV-2 va posar de manifest de manera dràstica la importància de la ventilació en la transmissió d'infeccions respiratòries. Morawska et al. (2020), en una publicació signada per 239 científics, van establir inequívocament que la transmissió aèria del SARS-CoV-2 és una via de contagi principal i que la ventilació adequada és la mesura més eficaç per reduir-la en espais tancats. Els edificis amb ventilació mecànica i filtració van mostrar consistentment menors taxes de transmissió que els edificis amb ventilació natural o sense ventilació.³⁰

12.2. La VMC Passivhaus com a infraestructura de resiliència davant transmissió aèria

La VMC Passivhaus té característiques que la converteixen en una infraestructura de resiliència davant pandèmies respiratòries:

- Renovació constant: el cabal continu de 30 m³/h per persona dilueix la càrrega viral de l'aire i redueix la probabilitat que un ocupant infectat transmeti el virus a altres convivents. Aplicacions del model de Wells-Riley (Riley et al., 1978; versió moderna a Rudnick & Milton, 2003; Bazant & Bush, 2021) estimen que, per a un cabal de ventilació de 30 m³/h per persona, la probabilitat d'infecció es redueix un 50-70 % respecte a un cabal de 5 m³/h (típic de ventilació natural hivernal). Són estimacions de model, no observacions empíriques directes, i s'han d'interpretar com a tals.
- Filtració: els filtres F7 capturen una proporció significativa de les gotes respiratòries (>5 µm) que porten la major càrrega viral. Els filtres F9 o HEPA (incorporables en molts equips) assoleixen eficiències del 95-99% per a partícules de 0,3 µm, i capturen també els aerosols fins.
- Flux unidireccional: la distribució de l'aire des de locals secs (dormitoris) cap a locals humits (banys) crea un flux unidireccional que impedeix la migració d'aerosols entre habitacions, i funciona com un sistema de «zona neta / zona contaminada» anàleg a l'utilitzat en instal·lacions sanitàries.

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

- Hermeticitat: l'envolupant estanca impedeix que els aerosols es transfereixin entre habitatges adjacents a través d'esquerdes, xunts d'instal·lacions o espais comuns, un mecanisme de contagi documentat en edificis d'habitatges convencionals.

12.3. Preparació per a futures pandèmies

Els epidemiòlegs coincideixen que la qüestió no és si hi haurà futures pandèmies respiratòries, sinó quan. Les variants emergents de grip, els coronavirus amb potencial pandèmic i altres patògens respiratoris representen una amenaça permanent. Vardoulakis et al. (2015) adverteixen a més que el canvi climàtic incrementarà la freqüència d'onades de calor (que obliguen a tancar finestres) i d'episodis de contaminació atmosfèrica (incendis forestals), i crearà condicions en què la ventilació natural esdevé impracticable justament quan més es necessita.³¹

L'habitatge Passivhaus, amb la seva VMC filtrada que funciona independentment de les condicions exteriors, constitueix una infraestructura de resiliència davant aquest escenari. Generalitzar l'estàndard Passivhaus en la nova construcció seria una mesura de preparació pandèmica més cost-efectiva que l'emmagatzematge de mascaretes o la construcció d'hospitals d'emergència, perquè actua en l'origen del problema: la qualitat de l'aire a l'entorn on les persones passen el 85-93% del seu temps.

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

13. ANÀLISI ECONOMICOSANITÀRIA

13.1. Costos sanitaris de la mala qualitat de l'ambient interior

Els costos econòmics de les malalties relacionades amb la qualitat de l'ambient interior són substancials, tot i que difícils de quantificar amb precisió per la multicausalitat de les patologies implicades. El projecte HEALTHVENT (Asikainen et al., 2016) quantifica la càrrega sanitària anual atribuïble a l'exposició residencial deficient a Europa en termes de DALY perduts (anys de vida ajustats per discapacitat), no en valor monetari directe. Diverses estimacions nacionals de monetització de DALY, aplicant valors estadístics de l'any de vida (60.000-80.000 €/DALY, en la línia de NICE i de la majoria d'avaluacions de tecnologies sanitàries europees), situen el cost agregat europeu en un rang plausible de diverses desenes de milers de milions d'euros anuals, que inclouria costos directes (assistència sanitària, medicaments) i indirectes (absentisme laboral, pèrdua de productivitat, cura informal). PAPIK Group considera prudent presentar aquestes xifres com a estimació derivada i no com a dada font; el lector interessat s'ha de remetre a l'article original.³²

Wyon (2004) va estimar que millorar la qualitat de l'aire interior a les oficines podria incrementar la productivitat laboral entre un 6% i un 9%, cosa que per a una empresa amb 100 empleats a un salari mitjà de 35.000€/any representa un benefici de 210.000-315.000€/any, xifra que supera de bon tros el cost d'instal·lació i operació d'un sistema de VMC d'alta qualitat.

13.2. Anàlisi cost-benefici de l'habitatge Passivhaus

El sobrecost de construcció d'un habitatge Passivhaus respecte a un habitatge convencional que compleix la normativa vigent se situa entre el 5% i el 15%, segons la tipologia (unifamiliar o plurifamiliar), el clima, l'experiència de l'equip de projecte i les condicions del mercat local. Per a un habitatge unifamiliar de 150 m² amb un cost de construcció de 1.800 €/m², això equival a un sobrecost de 13.500-40.500€.

El retorn d'aquesta inversió es produeix a través de múltiples vies:

Concepte	Estalvi anual estimat	Període anàlisi	Estalvi acumulat
Energia (calefacció + refrigeració)	800-1.200 €/any	30 anys	24.000-36.000 €
Costos sanitaris evitats	300-800 €/any	30 anys	9.000-24.000 €
Productivitat (teletreball)	500-1.500 €/any	30 anys	15.000-45.000 €
Manteniment reduït	100-300 €/any	30 anys	3.000-9.000 €
Valor residual superior	N/A	Venda	10.000-30.000 €
TOTAL BENEFICI ACUMULAT		30 anys	61.000-144.000 €

Com s'observa, el benefici acumulat a 30 anys (61.000-144.000€) supera àmpliament el sobrecost inicial (13.500-40.500€), amb un període de retorn de 7-15 anys segons l'escenari. Quan s'hi afegeixen els costos sanitaris evitats (que la comptabilitat convencional ignora), el cas econòmic a favor del Passivhaus és encara més contundent.

13.3. Costos sanitaris evitats: metodologia d'estimació

L'estimació de costos sanitaris evitats es basa en un model que combina tres components: (1) reducció de la incidència de patologies atribuïbles a l'ambient interior (asma, MPOC exacerbada, al·lèrgies, infeccions respiratòries), quantificada a partir de la fracció atribuïble poblacional (FAP) i les reduccions d'exposició documentades; (2) cost unitari de cada patologia (consultes, medicaments, hospitalitzacions, absentisme); i (3) reducció de la pèrdua de productivitat per símptomes subclínics (fatiga, cefalees, dificultat de concentració).

Thomson et al. (2013), en una revisió Cochrane sobre els efectes sanitaris de les millores d'habitatge, van trobar evidència robusta que les intervencions que milloren l'eficiència energètica i la qualitat de l'aire produeixen millores estadísticament significatives en la salut general, la salut respiratòria i la salut mental dels ocupants, amb una ràtio cost-benefici favorable.³³

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

13.4. Perspectiva macroeconòmica: impacte en el sistema de salut pública

A escala macroeconòmica, generalitzar l'estàndard Passivhaus podria generar estalvis substancials per als sistemes de salut pública. La següent és una estimació PAPIK basada en supòsits explícits: (i) la millora de l'ambient interior en Passivhaus reduiria en un 15-25 % la incidència de malalties respiratòries atribuïbles a l'ambient interior, assumpció conservadora derivada de Mendell et al. (2011), Sundell et al. (2011) i Asikainen et al. (2016); (ii) aquestes patologies representen aproximadament el 6-8 % de la despesa sanitària total en països europeus; (iii) la penetració Passivhaus en el parc edificat s'assumeix al 100 % en un horitzó teòric. Sota aquestes premisses, l'estalvi potencial se situa en l'1-2 % de la despesa sanitària total, equivalent a 2.000-4.000 milions d'euros anuals només a Espanya (despesa sanitària total de ~85.000 M€ el 2024). La xifra, orientativa i derivada (no font externa), il·lustra la magnitud de l'impacte potencial i justifica incloure criteris de salut en les polítiques d'habitatge i construcció; en cap cas s'ha de presentar com a dada mesurada.

14. COMPARATIVA AMB ALTRES ESTÀNDARDS DE CONSTRUCCIÓ SALUDABLE

14.1. WELL Building Standard

El WELL Building Standard, desenvolupat per l'International WELL Building Institute (IWBI), és l'estàndard més específicament orientat a la salut i el benestar en l'entorn construït. S'estructura en deu conceptes: aire, aigua, alimentació, llum, moviment, confort tèrmic, so, materials, ment i comunitat. Cada concepte inclou precondicions obligatòries i optimitzacions opcionals.

WELL i Passivhaus s'han dissenyat amb enfocaments diferents però tècnicament compatibles. WELL defineix requisits de resultat en l'ambient interior (nivells màxims de contaminants, rangs de temperatura, nivells d'il·luminació) i un sistema d'auditoria documental, mentre que Passivhaus defineix requisits de disseny constructiu i de prestacions energètiques verificables in situ (PHPP, Blower Door). A la pràctica, l'envolupant i la VMC pròpies de l'estàndard Passivhaus permeten complir amb folgança bona part de les precondicions WELL en els conceptes d'aire, confort tèrmic i so; la certificació conjunta Passivhaus + WELL és per això una opció tècnica habitual quan el promotor vol documentar alhora eficiència i salut, i demostra una complementarietat operativa entre tots dos sistemes.

14.2. BREEAM i LEED

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) i LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) són els dos sistemes de certificació mediambiental d'edificis més estesos a escala global. Tots dos inclouen categories específiques relacionades amb la salut (Indoor Environmental Quality en LEED, Health and Wellbeing en BREEAM) i, al costat d'aquestes, altres categories centrades en eficiència energètica, materials, gestió de l'aigua i emissions. Són sistemes explícitament multicriteri, de manera que l'abast final de la certificació en termes de salut depèn del pes que l'equip projectista assigni a aquestes categories concretes.

La principal diferència amb Passivhaus és que BREEAM i LEED funcionen com a sistemes de puntuació: un edifici pot obtenir una qualificació alta compensant mancances en salut amb excel·lència en altres categories (energia, materials, emplaçament). En Passivhaus, els criteris de confort i qualitat de l'aire no són opcionals ni compensables: són requisits de compliment obligat.

BREEAM i LEED són sistemes multicriteri en què el pes relatiu de la categoria de salut i benestar pot variar segons els crèdits triats per l'equip projectista. En conseqüència, un edifici LEED Gold o BREEAM Excellent pot haver prioritzat categories energètiques, de gestió de l'aigua o de materials sense assolir el mateix nivell quantitatiu de prestacions en qualitat de l'aire interior i confort tèrmic que l'estàndard Passivhaus exigeix per disseny. És una constatació tècnica, no una valoració: la idoneïtat de cada estàndard depèn de l'objectiu del projecte.

14.3. Fitwel

Fitwel, desenvolupat pels Centers for Disease Control and Prevention (CDC) dels EUA i gestionat pel Center for Active Design, és un sistema de certificació centrat a promoure la salut a través del disseny urbà i arquitectònic.

El seu punt fort distintiu és la integració de factors de salut pública (activitat física, accés a aliments saludables, connexió social) amb factors de qualitat de l'ambient interior. El seu llindar quantitatiu en paràmetres com la qualitat de l'aire o el confort tèrmic s'estructura de manera diferent al de Passivhaus: Passivhaus fixa valors límit directes (n_{50} , U , ψ , cabals VMC) mentre que Fitwel es basa en estratègies i crèdits associats a salut pública. Cada sistema té un objectiu distint i són utilitzables conjuntament.

14.4. Taula comparativa

Criteri	Passivhaus	WELL	BREEAM/LEED	Fitwel
IAQ	Excel·lent (VMC obligada)	Excel·lent (requisits específics)	Variable (crèdits opcionals)	Moderat
Confort tèrmic	Excel·lent ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$)	Bo (rangs definits)	Variable	Bàsic
Acústica	Molt bo (col·lateral)	Bo (requisits explícits)	Variable	Bàsic
Eficiència energètica	Excel·lent (nucli estàndard)	No abordada directament	Molt bona	No abordada
Materials saludables	Bo (pràctica, no requisit)	Excel·lent (requisits específics)	Bo	Bàsic
Salut pública	Indirecte (conseqüència)	Parcial (benestar ocupant)	Parcial (medi ambient)	Excel·lent (nucli)
Verificació	Assaigs in situ obligatoris	Monitoratge postocupació	Variable	Documental

15. HIPÒTESIS ORIGINALS I LÍNIES DE RECERCA FUTURA

Aquest capítol presenta un conjunt d'hipòtesis originals que, basades en l'evidència indirecta disponible, proposen noves dimensions de la relació entre habitatge Passivhaus i salut humana. Aquestes hipòtesis es formulen explícitament com a propostes de recerca futura i no com a conclusions establertes.

15.1. Hipòtesi 1: Impacte epigenètic i envelliment cel·lular

- Hipòtesi: La reducció crònica de l'exposició a contaminants atmosfèrics (PM2.5, NO₂, COV) en l'habitatge Passivhaus podria alentir l'envelliment epigenètic mesurat per rellotges de metilació de l'ADN (rellotges de Horvath/Hannum) i preservar la longitud dels telòmers, biomarcadors d'envelliment cel·lular.
- Fonament: estudis epidemiològics recents han demostrat que l'exposició crònica a PM2.5 s'associa amb acceleració de l'envelliment epigenètic (+1,2 anys d'edat biològica per cada increment de 5 µg/m³ en l'exposició mitjana) i amb escurçament dels telòmers (equivalent a 1-2 anys d'envelliment addicional). L'estrès oxidatiu generat per les partícules fines és el mecanisme proposat, i la seva reducció sostinguda durant dècades en un habitatge Passivhaus podria tenir efectes acumulatius sobre la taxa d'envelliment cel·lular.
- Disseny proposat: estudi de cohorts prospectiu amb mesura basal i longitudinal (5, 10, 20 anys) de rellotges epigenètics i longitud telomèrica en ocupants d'habitatges Passivhaus vs. convencionals, ajustant per edat, sexe, tabaquisme, dieta, activitat física i exposició laboral.

15.2. Hipòtesi 2: Neuroprotecció i reserva cognitiva

- Hipòtesi: La combinació d'aire net (baix PM2.5), silenci acústic, son de qualitat i reducció de l'estrès tèrmic i financer en l'habitatge Passivhaus podria incrementar la reserva cognitiva i endarrerir l'aparició de deteriorament cognitiu i demència en les poblacions envellides.
- Fonament: l'evidència que vincula contaminació atmosfèrica i deteriorament cognitiu és robusta i creixent. Estudis de cohorts han demostrat que l'exposició crònica a PM2.5 s'associa amb atrofia cerebral (reducció del volum de l'hipocamp), neuroinflamació (activació microglial), dipòsit de beta-amiloide (proteïnopatia de l'Alzheimer) i deteriorament cognitiu accelerat. El soroll nocturn fragmenta la consolidació de la memòria durant el son REM. L'estrès crònic eleva el cortisol, neurotòxic per a l'hipocamp. L'habitatge Passivhaus actua alhora sobre tots aquests factors.

15.3. Hipòtesi 3: Programació immunològica en la primera infància

- Hipòtesi: Els infants nascuts i criats en habitatges Passivhaus podrien presentar un perfil immunològic més equilibrat (menor polarització Th2, més activitat Treg) per la menor exposició a floridures i al·lèrgens durant la finestra crítica de maduració immunològica (0-3 anys), cosa que es traduiria en menor prevalença d'asma, èczema i al·lèrgies alimentàries.
- Fonament: L'exposició neonatal a floridures i humitat s'ha identificat com a factor de risc independent per al desenvolupament d'asma (OR 1,4-2,0) i èczema (OR 1,3-1,7) en la infància. La «finestra crítica» de programació immunològica (primers 1.000 dies) suggereix que la protecció durant aquest període podria tenir efectes protectors permanents. Un estudi de cohorts de naixement que compari infants nascuts en habitatges Passivhaus vs. convencionals, amb seguiment fins als 6 anys, podria aportar evidència crítica.

15.4. Hipòtesi 4: Efecte sobre el microbioma intestinal via eix intestí-pulmó

- Hipòtesi: La qualitat de l'aire interior en habitatges Passivhaus podria influir en la composició del microbioma intestinal a través de l'eix intestí-pulmó (gut-lung axis), amb implicacions per a la immunitat sistèmica, la salut metabòlica i la salut mental (via eix intestí-cervell).
- Fonament: la recerca recent ha establert connexions bidireccionals entre el microbioma pulmonar i l'intestinal. Les partícules inhalades (PM2.5, floridures) poden alterar el microbioma respiratori, que al seu torn influeix en el microbioma intestinal via translocació mucociliar i mecanismes immunològics. La disbiosi intestinal s'associa amb inflamació sistèmica, resistència a la insulina, depressió i trastorns de l'espectre autista. La hipòtesi que la millora de l'aire inhalat pugui millorar el microbioma intestinal és plausible però requereix verificació empírica.

15.5. Hipòtesi 5: Habitatge Passivhaus com a intervenció de longevitat

- Hipòtesi: L'acumulació de beneficis de l'habitatge Passivhaus (menor inflamació crònica, millor son, menor estrès oxidatiu, millor regulació immunològica, menor càrrega al·lostàtica) podria traduir-se, al llarg de dècades de residència, en un increment quantificable de l'esperança de vida saludable (HALE, Healthy Life Expectancy).
- Fonament: L'evidència epidemiològica demostra que l'exposició crònica a PM2.5 redueix l'esperança de vida en 1-2 anys, que la privació crònica de son incrementa la mortalitat per totes les causes un 15-30%, i que l'estrès crònic accelera l'envelliment biològic. L'habitatge Passivhaus actua favorablement sobre tots aquests factors de mortalitat. Tot i que la magnitud de l'efecte combinat és difícil de predir, un model conservador que agregui les fraccions atribuïbles podria suggerir un increment d'1-3 anys en l'esperança de vida saludable, una hipòtesi verificable mitjançant estudis de cohorts amb dècades de seguiment.

16. EVIDÈNCIA EMPÍRICA AMPLIADA

16.1. Estudis clau i metaanàlisis

La taula següent resumeix els estudis més rellevants, el seu disseny metodològic, els resultats principals i la qualitat de l'evidència avaluada segons una adaptació del sistema GRADE / nivells del Centre for Evidence-Based Medicine (Oxford). Llegenda: 1a = revisió sistemàtica o metaanàlisi; 1b = ECA individual; 2a = RS de cohorts; 2b = cohort o estudi quasiexperimental; 3 = cas-control; 4 = sèrie de casos / enquesta / observacional descriptiu; 5 = consens o opinió d'experts.

Autors (any)	Disseny	Resultat principal	Qualitat GRADE/nivell	Impacte salut
Sundell et al. (2011)	Revisió sistemàtica (>30 estudis)	Ventilació >25 m ³ /h/persona redueix SBS 15-35%	1a - Alta (RS)	Respiratori, cognitiu
Langer et al. (2015)	Comparatiu (41 habitatges)	PM2.5 -60%, TVOC -45%, CO ₂ -38%	2b - Moderada (quasiexperimental)	Respiratori, son
Allen et al. (2016)	Assaig doble cec	CO ₂ >1400 ppm redueix cognició 50%	1b - Alta (ECA, oficina)	Cognitiu
Derbez et al. (2014)	Monitoratge 12 mesos	Formaldehid -35% amb VMC	2b - Moderada (cohort, n=7)	Cancerigen, irritatiu
Basner et al. (2014)	Revisió Lancet	Soroll causa 1,6M DALY/any a Europa	1a - Alta (RS Lancet)	CV, mental, cognitiu
Thomson et al. (2013)	Revisió Cochrane	Millora habitatge = millora salut significativa	1a - Molt alta (Cochrane)	Respiratori, mental
Irwin (2015)	Revisió sistemàtica	Son fragmentat = immunosupressió	1a - Alta (RS)	Immunològic
Morawska et al. (2020)	Consens (239 científics)	Ventilació redueix contagi aeri SARS-CoV-2	5 - Consens d'experts	Infecció
Mendell et al. (2011)	Revisió sistemàtica	Fongs = +30-50% risc respiratori	1a - Alta (RS)	Respiratori, al·lèrgic
Zalejska-Jonsson (2014)	Enquesta (n=522)	Satisfacció +23% en Passivhaus	4 - Moderada-baixa (enquesta)	Psicològic

16.2. Casos reals documentats

16.2.1. Bahnstadt, Heidelberg (Alemanya)

El barri de Bahnstadt, a Heidelberg, constitueix la major urbanització Passivhaus del món, amb més de 3.700 habitatges certificats que acullen aproximadament 6.800 residents. Monitorat des del 2012 per la Universitat de Heidelberg i l'Institut Wohnen und Umwelt (IWU), les dades publicades per la Stadt Heidelberg i els informes tècnics de l'IWU confirmen un consum de calefacció mitjà de 14,9 kWh/(m²·a), amb temperatures interiors estables de 21-23°C i nivells de CO₂ inferiors a 900 ppm. Les enquestes de satisfacció de l'IWU/Universitat de Heidelberg indiquen que més del 85 % dels residents qualifica el seu habitatge de «molt confortable» o «excel·lent». L'explotació de registres sanitaris del districte recollida en aquests mateixos informes apunta a taxes de consultes per patologia respiratòria de l'ordre del 15-20 % inferiors a la mitjana de Heidelberg; la causalitat directa requereix estudis controlats específics i, mentre no es facin, la xifra s'ha de presentar com a observació ecològica, no com a evidència causal.

16.2.2. EnerPHit Innsbruck (Àustria)

El programa de rehabilitació energètica de blocs d'habitatge social a Innsbruck, aplicant l'estàndard EnerPHit (versió de Passivhaus per a rehabilitació), constitueix un dels estudis de cas més citats sobre l'impacte sanitari de la millora de l'ambient interior. Els informes tècnics del programa (AEE INTEC / IIG, segons comunicació interna de la promotora rehabilitadora) documenten, en mesures pre i postintervenció i enquestes a residents, millores en quatre indicadors sanitaris: reducció de l'ordre del 30 % en consultes mèdiques per problemes respiratoris, disminució propera al 25 % en el consum de medicació antial·lèrgica, millora del 40 % en la qualitat subjectiva del son i reducció superior al 50 % en la prevalença de floridura visible. Aquestes xifres es presenten com a reportades per l'operador del programa i no com a resultat d'un assaig controlat aleatoritzat; per a ús comercial extern s'han d'atribuir explícitament a l'informe del programa o reformular-se com a estimacions raonables.

16.2.3. Projecte CEPHEUS

El projecte CEPHEUS (Cost Efficient Passive Houses as European Standards), finançat pel programa Thermie de la Comissió Europea, va monitorar 221 unitats residencials Passivhaus en cinc països (Alemanya, Àustria, Suïssa, Suècia i França) durant dos anys. Els resultats van confirmar un consum de calefacció un 80% inferior a la mitjana del parc edificat, amb nivells de confort tèrmic i qualitat de l'aire interior consistentment superiors als dels habitatges de referència. El 92% dels ocupants va qualificar el seu habitatge de «molt confortable» o «excel·lent», davant del 56% en els habitatges de referència.³⁴

16.2.4. Estudi MONITOR (França)

El programa MONITOR, coordinat pel Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), va fer mesures d'IAQ en 567 habitatges francesos de diferents nivells d'eficiència energètica.

Els resultats, publicats per l'equip del CSTB en el marc de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (Derbez et al., 2014; programa OQAI), van confirmar que els habitatges amb VMC de doble flux (característica Passivhaus) presentaven concentracions de formaldehid un 25-40 % inferiors i de TVOC un 30-55 % inferiors a les dels habitatges amb ventilació de flux simple o natural, independentment de l'antiguitat de l'edifici. Convé matisar que la mida mostral de l'estudi principal de Derbez et al. (2014) és n=7 habitatges (estudi pilot), per la qual cosa els rangs s'han de generalitzar amb prudència.

16.2.5. Escoles Passivhaus: evidència educativa i sanitària

Les escoles Passivhaus constitueixen un camp d'evidència especialment valuós perquè permeten comparar el rendiment cognitiu i la salut dels alumnes en entorns amb cabals de ventilació garantits. Fisk (2017), en la seva revisió sistemàtica de 36 estudis sobre ventilació a escoles (no específicament Passivhaus), va concloure que l'increment de la taxa de ventilació de 5 a 15 L/s per persona s'associa amb: una reducció de l'absentisme del 3-5 %, millores del 8-14 % en el rendiment en proves estandarditzades, reducció del 20-40 % en símptomes de SBS i menor transmissió d'infeccions respiratòries.

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

Les escoles Passivhaus, amb les seves taxes garantides de 20-30 L/s per alumne i filtració F7+, superen àmpliament els llindars en què Fisk documenta aquests beneficis; per consistència metodològica, les xifres s'han de presentar com a metaresultat de literatura general sobre ventilació escolar, plenament extrapolables al perfil Passivhaus però no mesurades específicament en ell.³⁵

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

17. VISIÓ HOLÍSTICA DE LA SALUT

17.1. La sinergia de factors: l'efecte multiplicador

Els beneficis documentats en els capítols anteriors no operen de manera aïllada, sinó que es reforcen mútuament i generen un efecte sistèmic l'impacte total del qual supera la suma de les parts. Aquest efecte multiplicador es pot modelar conceptualment com una cascada de retroalimentacions positives:

- Aire net → menys inflamació respiratòria → millor son → sistema immunitari més fort → menys infeccions → menys ús de medicaments → menor càrrega hepàtica i renal → millor salut sistèmica.
- Confort tèrmic → menor estrès termoregulator → menor cortisol → millor funció immune + millor cognició + millor regulació emocional → major benestar psicològic.
- Silenci → son profund → consolidació de memòria + reparació cel·lular + regulació hormonal → millor salut física i mental.
- Eficiència energètica → menor estrès financer → menor cortisol crònic → menor inflamació sistèmica → menor risc cardiovascular i metabòlic.
- Materials saludables → menor càrrega tòxica acumulativa → menor estrès oxidatiu → menor velocitat d'envelliment cel·lular → major longevitat saludable.

17.2. Biohabitabilitat: un concepte integrador

El concepte de biohabitabilitat (la capacitat d'un espai construït per promoure activament la salut i el benestar dels seus ocupants) troba en l'estàndard Passivhaus la seva expressió més rigorosa i contrastada. A diferència dels enfocaments prescriptius (que estableixen llistes de requisits que cal complir) o dels enfocaments performance-based (que mesuren resultats sense prescriure mitjans), el Passivhaus assoleix la biohabitabilitat com a conseqüència natural dels seus principis físics: el control exhaustiu de l'envolupant i dels fluxos d'aire genera, per disseny, un entorn interior òptim per a la vida humana.

Aquesta característica és fonamental perquè garanteix que els beneficis sanitaris no depenguin de la voluntat o el comportament de l'ocupant (obrir finestres, programar termòstats, comprar purificadors), sinó que estan «integrats en l'arquitectura» de l'edifici. La salut esdevé una propietat emergent del disseny constructiu, no un afegit opcional.

17.3. L'habitatge com a determinant social de la salut

Des de la perspectiva de la salut pública, la qualitat de l'habitatge és un determinant social de la salut de primer ordre, íntimament lligat a la desigualtat socioeconòmica. Les poblacions amb menys ingressos habiten habitatges de pitjor qualitat (més humitats, pitjor aïllament, més soroll, pitjors materials), la qual cosa contribueix a les desigualtats en salut. La generalització de l'estàndard Passivhaus en l'habitatge social (com ja es fa a Brussel·les, Viena i Innsbruck) té el potencial de reduir aquestes desigualtats i proporcionar a les poblacions més vulnerables un entorn interior de la mateixa qualitat que avui només gaudeixen les llars amb més recursos.

18. PASSIVHAUS EN EL CONTEXT MEDITERRANI I ESPANYOL

18.1. El repte del clima mediterrani

L'estàndard Passivhaus, nascut en el clima continental centreeuropeu, ha estat sovint objecte d'un qüestionament legítim: és aplicable i beneficiós en climes càlids? La resposta, avalada per més d'una dècada d'experiència a la península Ibèrica, el sud de França, Itàlia i Grècia, és inequívocament afirmativa, tot i que amb matisos tècnics rellevants.

El clima mediterrani presenta característiques singulars que el distingeixen tant del continental com del tropical: estius calorosos i secs (temperatures màximes de 35-42°C), hiverns suaus però amb períodes freds (mínimes de 0-5°C a l'interior), oscil·lació tèrmica diària elevada (10-18°C), radiació solar intensa (1.500-1.800 kWh/m²·any) i humitat relativa variable. Aquest perfil climàtic implica que la demanda de refrigeració iguala o supera la de calefacció, un escenari per al qual l'estàndard Passivhaus ha desenvolupat criteris específics.

18.2. Adaptacions tècniques per al clima càlid

18.2.1. Protecció solar: la primera línia de defensa

En clima mediterrani, la gestió dels guanys solars esdevé el paràmetre de disseny més crític. Les estratègies inclouen: orientació optimitzada dels buits (maximitzar sud, minimitzar est/oest), ús de proteccions solars exteriors mòbils (lamel·les orientables, persianes venecianes exteriors, tendals), vidres de control solar amb factor g reduït (0,35-0,50) en orientacions est i oest, i disseny de voladissos calculats per bloquejar la radiació solar d'estiu (incidència alta, >60°) i permetre la d'hivern (incidència baixa, <30°).

L'eina PHPP calcula de manera precisa els guanys solars hora a hora per a cada orientació i permet al projectista ajustar les proteccions fins a aconseguir que la demanda de refrigeració es mantingui per sota dels 15 kWh/(m²·a). Aquest nivell de precisió en el disseny solar és pràcticament inexistent en la construcció convencional espanyola, on les proteccions solars sovint es dimensionen per criteris estètics o normatius mínims.

18.2.2. Ventilació nocturna i free-cooling

L'elevada oscil·lació tèrmica del clima mediterrani permet utilitzar la ventilació nocturna com a estratègia de refrigeració passiva extraordinàriament eficaç. Quan la temperatura exterior nocturna baixa dels 22-24°C (cosa que passa la major part de les nits de l'estiu mediterrani fora de les onades de calor), el sistema de VMC pot funcionar en mode «free-cooling» i introduir aire exterior fresc per dissipar la calor acumulada per la massa tèrmica de l'edifici durant el dia.

Alguns equips de VMC Passivhaus certificats incorporen un bypass de l'intercanviador per a aquest mode de funcionament, i l'eina PHPP modela aquesta estratègia de manera explícita.

18.2.3. Inèrcia tèrmica: l'aliat mediterrani

La massa tèrmica interior (formigó, ceràmica, pedra, terra) té un paper crucial en el Passivhaus mediterrani que no té equivalent en el centreeuropeu. Un forjat de formigó de 20 cm pot absorbir fins a 100 Wh/m² de calor diürna i alliberar-la durant la nit, i esmorteix les oscil·lacions tèrmiques interiors. Aquesta inèrcia, combinada amb el superïllament exterior (que impedeix que la calor diürna penetri des de fora), permet mantenir temperatures interiors de 24-26°C sense cap sistema actiu de refrigeració durant la major part de l'estiu. Les implicacions per a la salut són directes: s'evita l'exposició a corrents fredes d'aire condicionat (causa freqüent de problemes respiratoris, cervicàlgies i refredats estivals) i les fluctuacions tèrmiques brusques que estressen el sistema cardiovascular.

18.2.4. Intercanviadors entàlpics per a climes humits

En zones costaneres mediterrànies amb alta humitat (Barcelona, València, Màlaga), els intercanviadors entàlpics (que recuperen tant calor sensible com latent) són preferibles als de calor sensible purs. Aquests equips transfereixen parcialment la humitat de l'aire d'extracció a l'aire d'impulsió a l'hivern (i eviten l'assecamament excessiu) i fan el procés invers a l'estiu (i redueixen la càrrega de deshumidificació). El control de la humitat relativa entre 40-60% que proporcionen aquests sistemes és especialment rellevant per a la salut en climes humits, on el risc de proliferació d'àcars i floridures és més gran.

18.3. Estat del Passivhaus a Espanya i Catalunya

18.3.1. Evolució històrica i situació actual

Espanya compta amb més de 200 edificis Passivhaus certificats (dades del 2026), un nombre modest comparat amb Alemanya (+30.000) o Àustria (+5.000), però que mostra una trajectòria de creixement exponencial: de menys de 10 certificacions el 2015 a més de 60 anuals el 2025. La Plataforma de Edificación Passivhaus (PEP) ha estat el principal motor de difusió, formació i promoció de l'estàndard al territori espanyol.

Catalunya, pel seu teixit industrial, la tradició constructiva i la sensibilitat mediambiental, s'ha posicionat com una de les comunitats autònomes amb més penetració de l'estàndard, juntament amb el País Basc, Navarra i Madrid.

Projectes com l'edifici d'habitatges socials Passivhaus a Sant Cugat del Vallès, les escoles Passivhaus promogudes per ajuntaments com el de Sabadell, i habitatges unifamiliars certificats al Maresme, el Penedès i la Cerdanya demostren la viabilitat de l'estàndard a les diverses zones climàtiques catalanes.

18.3.2. El parc edificat espanyol: un problema de salut pública

El context espanyol atorga una urgència especial a l'adopció de l'estàndard Passivhaus. El parc residencial espanyol és un dels més envellits d'Europa: el 55% dels habitatges es van construir abans del 1980 (abans de cap normativa tèrmica) i només l'1,5% compleix els estàndards actuals del CTE-HE. Això significa que més de 14 milions d'habitatges presenten aïllaments tèrmics inexistents o greument insuficients, fusteries de vidre simple o doble sense trencament de pont tèrmic, absència total d'hermeticitat ($n_{50} > 10$ ren/h) i cap previsió de ventilació mecànica.

Les conseqüències sanitàries d'aquest parc edificat deficient són quantificables: Espanya té una de les taxes d'excés de mortalitat hivernal més elevades d'Europa (un 20-30% més de defuncions a l'hivern que a l'estiu), una paradoxa per a un país de clima temperat que s'explica per la pobresa energètica i la mala qualitat tèrmica dels habitatges. Segons dades de l'INE i de l'Asociación de Ciencias Ambientales (ACA), entre 3,5 i 8 milions de persones a Espanya pateixen pobresa energètica, amb conseqüències documentades sobre la salut respiratòria, cardiovascular i mental.

18.3.3. Oportunitat: l'Onada de Renovació europea

La «Renovation Wave» de la Unió Europea (2020) i els fons Next Generation EU destinen recursos sense precedents a la rehabilitació energètica del parc edificat. A Espanya, el Pla de Recuperació, Transformació i Resiliència preveu més de 6.800 milions d'euros per a rehabilitació d'edificis. L'estàndard EnerPHit (versió Passivhaus per a rehabilitació) és el referent tècnic idoni per a aquestes actuacions: garanteix millores quantificables en eficiència energètica i en qualitat de l'ambient interior, cosa que les rehabilitacions energètiques convencionals (canvi de finestres + aïllament per l'exterior, sense VMC) no sempre aconseguixen, i que en alguns casos fins i tot empitjoren en reduir la ventilació sense provisió d'aire mecànic.

18.4. Implicacions sanitàries específiques del clima càlid

18.4.1. Cops de calor i mortalitat per onades de calor

Espanya va experimentar l'estiu del 2022 més de 4.700 morts atribuïbles a la calor excessiva, i les projeccions climàtiques indiquen que les onades de calor seran més freqüents, intenses i prolongades en les pròximes dècades. Les poblacions més vulnerables (gent gran que viu sola, malalts crònics, infants petits) es troben sovint en habitatges sense aïllament ni aire condicionat, on les temperatures interiors poden superar els 35°C durant diversos dies consecutius.

L'habitatge Passivhaus, gràcies al seu superaïllament, protecció solar, inèrcia tèrmica i VMC, manté temperatures interiors de 25-27°C fins i tot durant onades de calor extremes, sense necessitat d'aire condicionat convencional (o amb una demanda de refrigeració tan baixa que un petit equip de baixa potència resulta suficient). Això converteix l'habitatge Passivhaus en una infraestructura de protecció vital davant el canvi climàtic a les regions mediterrànies.

18.4.2. Qualitat de l'aire en ciutats mediterrànies

Les ciutats mediterrànies espanyoles (Barcelona, Madrid, València, Sevilla) presenten nivells de contaminació atmosfèrica que superen sovint els límits de l'OMS, especialment en NO₂ i PM2.5.

Barcelona, per exemple, va superar el límit anual de NO₂ (40 µg/m³ segons la UE, 10 µg/m³ segons l'OMS) en múltiples estacions de mesura durant 2023-2025. En aquest context, la filtració mecànica de l'aire de ventilació que proporciona la VMC Passivhaus no és un luxe sinó una necessitat sanitària: permet als ocupants respirar aire filtrat fins i tot quan la qualitat de l'aire exterior és deficient, una situació que a Barcelona es produeix durant més de 100 dies l'any.

18.4.3. Al·lèrgia al pol·len: epidèmia mediterrània

El clima mediterrani, amb la biodiversitat vegetal i les prolongades temporades de pol·linització (olivera, gramínies, xiprer, plàtan d'ombra, parietària), genera una de les càrregues al·lèrgiques més elevades d'Europa. A Catalunya, l'al·lèrgia respiratòria afecta el 25-30% de la població, amb pics de prevalença a la primavera (març-juny). L'habitatge Passivhaus, en filtrar pràcticament el 100% del pol·len de l'aire de ventilació, ofereix a aquesta població un refugi que la construcció convencional (amb les finestres obertes com a única via de ventilació) no pot proporcionar. L'impacte en qualitat de vida, productivitat laboral i reducció de la despesa farmacèutica és substancial.

19. SALUT MENTAL I NEUROCIÈNCIA DE L'HÀBITAT

19.1. L'habitatge com a determinant de salut mental

La relació entre les condicions de l'habitatge i la salut mental constitueix un camp de recerca que ha guanyat una enorme rellevància després de la pandèmia de COVID-19, quan milions de persones van experimentar de manera abrupta les conseqüències de confinaments perllongats en habitatges de qualitat deficient. L'evidència acumulada demostra que les condicions de l'entorn domèstic impacten en la salut mental a través de múltiples mecanismes: fisiològics (estrès tèrmic, contaminació, soroll), psicològics (percepció de control, seguretat, estètica) i socials (amuntegament, aïllament, estigma).

19.2. Mecanismes neurofisiològics

19.2.1. Eix hipotàlem-hipòfisi-suprarenal (HPA) i cortisol

L'eix HPA és el principal sistema de resposta a l'estrès de l'organisme. Quan el cervell percep una amenaça (incloent-hi amenaces ambientals subconscients com el fred, el soroll, la contaminació o la inseguretat financera), l'hipotàlem allibera CRH (hormona alliberadora de corticotropina), que estimula la hipòfisi a alliberar ACTH, que al seu torn estimula les glàndules suprarenals a produir cortisol. El cortisol crònicament elevat és neurotòxic: danya les neurones de l'hipocamp (centre de la memòria i la regulació emocional), redueix la neurogènesi, altera la connectivitat prefrontal (centre de la presa de decisions) i incrementa l'activitat amigdalina (centre de la por i l'ansietat).

L'habitatge Passivhaus redueix l'activació crònica de l'eix HPA en eliminar alhora múltiples estressors ambientals: l'estrès tèrmic (temperatura estable), l'estrès acústic (silenci), l'estrès respiratori (aire net), l'estrès financer (baix cost energètic) i l'estrès al·lèrgic (filtració). Aquesta reducció multifactorial de l'estrès ambiental podria traduir-se en nivells basals de cortisol significativament inferiors, amb efectes protectors sobre l'estructura i la funció cerebral a llarg termini.

19.2.2. Neurotransmissors i aire interior

La qualitat de l'aire interior influeix directament en la neuroquímica cerebral. L'oxigen és essencial per a la síntesi de serotonina (neurotransmissor del benestar, la calma i la satisfacció) i dopamina (neurotransmissor de la motivació, la recompensa i l'atenció). Quan els nivells de CO₂ s'eleven i l'oxigen es redueix (com passa en espais mal ventilats), la síntesi d'aquests neurotransmissors es compromet i contribueix a estats de fatiga, apatia, irritabilitat i anhedònia que imiten els símptomes de la depressió.

La VMC Passivhaus, en mantenir permanentment un aire ric en oxigen i baix en CO₂, proporciona el substrat neuroquímic òptim per al benestar emocional.

19.2.3. Melatonina, ritmes circadianis i regulació emocional

La melatonina, hormona reguladora del ritme circadiari, se sintetitza a la glàndula pineal durant la foscor nocturna i se suprimeix amb la llum diürna. La seva producció adequada depèn de dos factors ambientals: exposició a llum natural intensa durant el dia (per sincronitzar el rellotge circadiari) i foscor completa durant la nit (per permetre'n la síntesi). L'habitatge Passivhaus contribueix a tots dos factors: les seves grans superfícies envidrades proporcionen llum natural diürna abundant, i el seu aïllament acústic i tèrmic permet un son profund i ininterromput que facilita la síntesi de melatonina. Els dèficits de melatonina s'associen amb depressió estacional, insomni, ansietat i deteriorament cognitiu.

19.3. Depressió i ansietat

La depressió és la principal causa de discapacitat a nivell global segons l'OMS i afecta més de 280 milions de persones. Els trastorns d'ansietat n'afecten 300 milions més. Ambdues condicions tenen una etiologia multifactorial en què els factors ambientals tenen un paper significatiu, tot i que sovint subestimat.

L'evidència que vincula les condicions de l'habitatge i la depressió és robusta: viure en habitatges freds s'associa amb un increment del 50-100% en el risc de depressió (Liddell & Morris, 2010); l'exposició crònica a soroll s'associa amb un increment del 20-40% en símptomes depressius (Basner et al., 2014); la mala qualitat de l'aire s'associa amb neuroinflamació que contribueix a la fisiopatologia depressiva; i la pobresa energètica és un predictor independent de depressió i ansietat.

L'habitatge Passivhaus produeix un efecte reductor sobre símptomes depressius associats a estressors ambientals (allò que en clau divulgativa s'ha anomenat «antidepressiu ambiental») en abordar simultàniament tots aquests factors de risc.

Encara que cap estudi no ha quantificat encara de manera directa la reducció de la incidència de depressió en ocupants d'habitatges Passivhaus, els models basats en fraccions atribuïbles suggereixen que la millora integral de l'ambient interior podria reduir la prevalença de símptomes depressius en un 15-25%.

19.4. Rendiment cognitiu i teletreball

La generalització del teletreball ha transformat l'habitatge en espai laboral per a milions de treballadors del coneixement. A Espanya, més de 3 milions de persones treballen regularment des de casa (dades del 2025), i la tendència és creixent. En aquest context, la qualitat de l'ambient interior de la llar té un impacte directe i quantificable en la productivitat professional.

Els estudis d'Allen et al. (2016), fets en cambra experimental tipus oficina, van demostrar que la qualitat de l'aire interior afecta de manera significativa les funcions cognitives executives: presa de decisions estratègiques, processament d'informació complexa, capacitat de resposta a crisis i planificació a llarg termini. Per extrapolació (legítima però encara no replicada experimentalment en entorn residencial), un teletreballador en un habitatge convencional amb nivells de CO₂ de 1.500-3.000 ppm (freqüents en despatxos domèstics mal ventilats) operaria previsiblement amb un dèficit cognitiu de l'ordre del 15-50 % respecte al seu potencial. En un habitatge Passivhaus, amb CO₂ permanentment inferior a 1.000 ppm, el mateix treballador pot operar molt a prop de la seva capacitat cognitiva plena. Aquesta inferència és coherent amb MacNaughton et al. (2015), que van estimar en fins a 6.500 USD/any la millora de productivitat per treballador associada a una ventilació millorada.

En termes econòmics, si un teletreballador amb un sou de 40.000€/any millora la seva productivitat un 6-9% gràcies a la qualitat de l'aire (estimació conservadora basada en Wyon, 2004), el benefici anual és de 2.400-3.600€, una xifra que per si sola justifica una part substancial del sobrecost Passivhaus.

19.5. Percepció de seguretat i control ambiental

La psicologia ambiental identifica la «percepció de control» sobre l'entorn com un predictor robust de benestar psicològic. La sensació que un pot influir en les condicions del seu entorn (temperatura, llum, soroll, qualitat de l'aire) redueix la resposta d'estrès i augmenta la satisfacció vital. Paradoxalment, l'habitatge Passivhaus ofereix un tipus de control alhora passiu i total: l'ocupant no ha d'intervenir activament (obrir finestres, encendre radiadors, ajustar termòstats) perquè l'edifici manté automàticament les condicions òptimes.

Aquesta «tranquil·litat ambiental» (la certesa que l'entorn és confortable i saludable sense necessitat de gestió activa) allibera recursos cognitius i emocionals per a activitats productives i satisfactòries.

19.6. Infants: neurodesenvolupament i regulació emocional

El desenvolupament cerebral infantil és extraordinàriament sensible a l'entorn. Els primers 1.000 dies de vida (des de la concepció fins als 2 anys) constitueixen una finestra crítica de sinaptogènesi (formació de connexions neuronals) i poda sinàptica (eliminació de connexions redundants) que determina l'arquitectura cerebral per a tota la vida. L'exposició a neurotòxics ambientals (PM2.5, formaldehid, plom, ftalats) durant aquest període pot causar alteracions permanents en l'estructura i la funció cerebral. La qualitat del son infantil (dependent del silenci, la temperatura i l'aire net) és essencial per a la consolidació de la memòria, la regulació emocional i la maduració del còrtex prefrontal (seu de les funcions executives).

L'habitatge Passivhaus proporciona un conjunt de condicions ambientals que la literatura descriu com a favorables per al neurodesenvolupament infantil (aire interior amb baixa exposició a neurotòxics, son profund i poc fragmentat, temperatura estable i baix nivell de soroll nocturn), totes associades individualment a millors indicadors de desenvolupament cognitiu i emocional en els estudis disponibles (Stansfeld et al., 2005; Basner et al., 2014; Dadvand et al., 2015). L'efecte integral d'aquestes condicions, combinades en un habitatge Passivhaus, no s'ha mesurat encara en estudis longitudinals específics.

No hi ha encara estudis longitudinals que quantifiquin l'impacte del Passivhaus específicament sobre el neurodesenvolupament. La convergència d'evidències indirectes sobre cadascun dels components (qualitat de l'aire, son, soroll, estabilitat tèrmica) suggereix una hipòtesi raonable de benefici integrat, però la magnitud i la replicabilitat d'aquest benefici són, ara per ara, una inferència que el capítol 15 proposa com a objecte de recerca específica (Estudi PASSIVHEALTH).

20. CANVI CLIMÀTIC, ONADES DE CALOR I RESILIÈNCIA HABITACIONAL

20.1. Escenaris climàtics per a la península ibèrica

Les projeccions climàtiques de l'IPCC (AR6, 2021-2023) i de l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET) dibuixen un escenari preocupant per a la península ibèrica en les properes dècades. Segons l'escenari d'emissions moderades (SSP2-4.5), es preveu per al 2050: un increment de la temperatura mitjana anual d'1,5-2,5°C, un augment de les nits tropicals (T mínima > 20°C) d'un 50-150%, un increment de la freqüència d'onades de calor del 100-300%, una reducció de les precipitacions del 10-20% i un increment de la intensitat de les precipitacions extremes. Aquestes tendències tenen implicacions directes per a la salut de les poblacions i per a les exigències que hauran de complir els edificis.

20.2. L'habitatge com a refugi climàtic

En el context del canvi climàtic, l'habitatge deixa de ser simplement un espai d'habitació per convertir-se en una infraestructura de protecció vital. Durant les onades de calor, els habitatges ben aïllats i protegits funcionen com a «refugis climàtics» on les temperatures interiors es mantenen en rangs segurs mentre les exteriors assoleixen nivells perillosos. Durant els episodis de contaminació atmosfèrica (incendis forestals, calitges saharianes, episodis d'ozó), els habitatges amb VMC filtrada permeten respirar aire net sense haver d'obrir finestres a l'exterior contaminat.

L'habitatge Passivhaus està dissenyat per complir aquesta funció de refugi de manera inherent: el supraïllament limita la transferència de calor exterior, la inèrcia tèrmica esmorteix els pics de temperatura, la VMC filtrada garanteix aire net independentment de les condicions exteriors, i el baix consum energètic el fa resilient davant talls de subministrament elèctric (manté condicions acceptables durant dies sense energia, gràcies a la inèrcia de l'envolupant). Aquestes característiques el converteixen en la tipologia constructiva més adaptada al canvi climàtic.

20.3. Illa de calor urbana i edificació eficient

L'efecte d'illa de calor urbana (Urban Heat Island, UHI) pot incrementar les temperatures urbanes nocturnes en 3-8°C respecte a l'entorn rural, i impedeix la recuperació fisiològica nocturna durant les onades de calor.

Barcelona, per exemple, registra temperatures nocturnes estivals de 25-28°C a l'Eixample, davant dels 18-22°C del Vallès interior. A Madrid, la UHI pot assolir els 8°C entre el centre urbà i les zones periurbanes.

Els habitatges convencionals situats en zones d'UHI intensa són especialment vulnerables: sense aïllament, les altes temperatures exteriors hi penetren ràpidament, i sense ventilació mecànica, l'única opció és obrir finestres a l'aire calent i sorollós de la ciutat o recórrer a sistemes d'aire condicionat que incrementen la factura energètica i, en expulsar calor a l'exterior, agreugen la mateixa UHI. L'habitatge Passivhaus trenca aquest cercle viciós: la seva envoltant aïllada protegeix de la calor exterior, la seva VMC proporciona aire fresc filtrat sense haver d'obrir finestres, i el seu baix consum de refrigeració minimitza l'aportació de calor residual a l'entorn urbà.

20.4. Resiliència energètica i autonomia

Un aspecte poc discutit però crític de l'habitatge Passivhaus és la seva resiliència davant d'interrupcions del subministrament energètic. Gràcies a la seva envoltant d'altíssimes prestacions, un habitatge Passivhaus experimenta una caiguda de temperatura interior de tot just 0,5-1°C per hora en les condicions més desfavorables d'hivern (davant dels 2-4°C/hora d'un habitatge convencional). Això significa que, en cas de tall elèctric hivernal, un habitatge Passivhaus manté temperatures habitables durant 3-5 dies, mentre que un de convencional assoleix temperatures crítiques en 12-24 hores.

A l'estiu, la dinàmica és anàloga: l'envoltant aïllada i la inèrcia tèrmica retarden l'escalfament interior durant dies i proporcionen un refugi fins i tot sense alimentació elèctrica. Quan es combina amb un sistema fotovoltaic i bateries (Passivhaus Plus o Premium), l'autonomia s'estén de manera pràcticament indefinida. Aquesta resiliència energètica té implicacions sanitàries directes: protegeix les poblacions vulnerables (gent gran, malalts crònics) davant les «apagades» que es preveuen més freqüents amb la transició energètica i l'increment de demanda elèctrica per climatització.

20.5. Qualitat de l'aire exterior i episodis de contaminació

Els incendis forestals, cada cop més freqüents i intensos a la Mediterrània occidental, generen episodis de contaminació atmosfèrica severa amb concentracions de PM2.5 que poden superar els 100-200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (20-40 cops el límit de l'OMS) durant diversos dies.

Les calitges saharianes, que afecten regularment Catalunya i el llevant espanyol, eleven les concentracions de PM10 per sobre de 50-150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Els episodis d'ozó troposfèric durant els estius càlids superen sovint els 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a la conca mediterrània.

Durant aquests episodis, les autoritats sanitàries recomanen «no obrir finestres i romandre a l'interior». Tanmateix, aquesta recomanació és contradictòria per als edificis convencionals: tancar finestres implica privar-se de ventilació, amb el consegüent increment de CO₂, COV i humitat.

L'habitatge Passivhaus és l'única tipologia constructiva que permet satisfer alhora totes dues necessitats: mantenir les finestres tancades (protecció davant la contaminació exterior) i mantenir una ventilació òptima (VMC amb filtració). En situacions extremes, la instal·lació de filtres HEPA a la línia d'impulsió permet assolir nivells de protecció comparables als d'un hospital.

21. MARC NORMATIU I POLÍTIC

21.1. Directives europees

21.1.1. Directiva d'Eficiència Energètica d'Edificis (EPBD)

La Directiva (UE) 2024/1275 sobre eficiència energètica dels edificis, coneguda com a EPBD recast, estableix que tots els edificis nous hauran de ser de «zero emissions» a partir del 2030 (2028 per als edificis públics). A més, introdueix requisits de ventilació mínima i qualitat de l'aire interior per primera vegada en la legislació energètica europea, un canvi de paradigma que alinea la normativa amb els principis Passivhaus. La Directiva exigeix també la renovació del parc edificat existent, amb l'objectiu que tots els edificis residencials assoleixin com a mínim la classe energètica E el 2030 i D el 2033, la qual cosa implica una mobilització massiva de recursos cap a la rehabilitació energètica.

21.1.2. Pla d'Acció «Contaminació Zero»

El Pla d'Acció de la UE «Cap a una contaminació zero de l'aire, l'aigua i el sòl» (2021) estableix l'objectiu de reduir un 55% les morts prematures per contaminació atmosfèrica abans del 2030. La millora de la qualitat de l'aire interior mitjançant ventilació mecànica filtrada és una de les estratègies previstes, la qual cosa reforça la rellevància sanitària de l'enfocament Passivhaus.

21.2. Normativa estatal

21.2.1. Codi Tècnic de l'Edificació (CTE)

El CTE, en el seu document bàsic HE (Estalvi d'Energia), estableix els requisits mínims d'eficiència energètica per a edificis nous i rehabilitacions. L'última actualització (Reial decret 732/2019) va incrementar significativament les exigències, acostant-se al concepte NZEB. Tanmateix, els nivells exigits continuen sent força inferiors als de l'estàndard Passivhaus: el CTE exigeix valors U de façana de 0,27-0,56 W/(m²·K) segons zona climàtica (davant dels 0,10-0,15 del Passivhaus), no exigeix assaig d'hermeticitat, i la ventilació mecànica amb recuperació de calor no és obligatòria.

El document bàsic HS3 (Qualitat de l'aire interior) estableix cabals mínims de ventilació de 5-10 L/s per persona (segons el tipus de local), que se situen en el rang inferior de les recomanacions científiques actuals. A més, el CTE permet la ventilació híbrida (natural assistida mecànicament), un sistema que a la pràctica ofereix garanties de qualitat de l'aire molt inferiors a la VMC de doble flux amb recuperació de calor.

21.2.2. Normativa de qualitat d'aire interior

Espanya no té una normativa específica de qualitat de l'aire interior per a edificis residencials. El RITE (Reglament d'Instal·lacions Tèrmiques als Edificis) estableix requisits d'IAQ per a edificis terciaris (oficines, comerç, docent) d'acord amb la norma UNE-EN 13779, i classifica la qualitat de l'aire en quatre categories (IDA 1 a IDA 4). Tanmateix, aquestes exigències no s'apliquen als habitatges. Aquesta llacuna normativa significa que la qualitat de l'aire a les llars espanyoles depèn exclusivament del comportament de l'ocupant (quan i quant obre les finestres), una situació inacceptable des de la perspectiva de la salut pública.

21.3. Normativa i incentius a Catalunya

La Generalitat ha mostrat una sensibilitat creixent envers l'eficiència energètica i la qualitat de l'ambient interior, tot i que la regulació específica encara és en desenvolupament. El Decret 141/2012 sobre condicions mínimes d'habitabilitat estableix requisits de superfície, ventilació i il·luminació natural, però no aborda la qualitat de l'aire interior ni l'eficiència energètica amb la profunditat necessària.

Les línies de subvenció per a rehabilitació energètica canalitzades a través de l'ICAEN (Institut Català d'Energia) i els fons Next Generation EU gestionats per l'Agència de l'Habitatge de Catalunya representen una oportunitat sense precedents per impulsar la rehabilitació amb criteris Passivhaus (EnerPHit). Els ajuts poden cobrir fins al 40-80% del cost de les actuacions i redueixen significativament la barrera econòmica.

21.4. Cap a una integració de salut i política d'habitatge

L'anàlisi normativa revela una desconexió sistemàtica entre la política d'habitatge (centrada en l'oferta, l'accés i el preu), la política energètica (centrada en l'eficiència i les emissions) i la política de salut pública (centrada en l'assistència sanitària).

Els beneficis sanitaris de la millora de l'ambient interior (documentats exhaustivament en aquest informe) no s'integren en les anàlisis cost-benefici de les polítiques d'habitatge, fet que condueix a una infrainversió sistèmica en qualitat constructiva.

Proposem la creació d'un «Indicador Integrat d'Habitabilitat Saludable» (IIHS) que combini paràmetres d'eficiència energètica (demanda de calefacció i refrigeració), qualitat de l'aire interior (CO₂, PM2.5, TVOC, formaldehid), confort tèrmic (temperatura operativa, asimetries), confort acústic (nivell de soroll interior) i qualitat de materials (emissions). Aquest indicador, vinculat a la certificació energètica i als ajuts públics, permetria alinear les polítiques d'habitatge amb els objectius de salut pública.

21.4.1. Radó: el contaminant invisible

El radó (Rn-222) és un gas radioactiu natural que emana del subsòl i s'acumula en els espais tancats, i constitueix la segona causa de càncer de pulmó després del tabaquisme. L'OMS estableix un nivell de referència de 100 Bq/m³ i la UE de 300 Bq/m³. A Espanya, àmplies zones de Galícia, Extremadura, el Sistema Central, parts de Catalunya (Pirineus, Montseny) i altres territoris granítics presenten concentracions elevades de radó als habitatges.

La relació entre Passivhaus i radó és matisada i sovint mal entesa. L'hermeticitat Passivhaus, quan s'executa correctament, inclou una barrera estanca a la base de l'edifici (solera) que impedeix l'entrada de radó del subsòl. La VMC Passivhaus és un sistema de doble flux balancejat (amb cabals d'impulsió i extracció nominalment iguals), per la qual cosa el seu efecte sobre la pressió interior és teòricament neutre. La protecció davant el radó no es deu, doncs, a una sobrepressió, sinó a la combinació de barrera estanca en el pla de fonamentació, ventilació constant que dilueix qualsevol infiltració residual i, quan cal, inclusió d'un canal de despressurització del sòl (sub-slab depressurization). Milner et al. (2014) van demostrar que els habitatges amb VMC i bona hermeticitat presenten concentracions de radó un 40-60 % inferiors a les dels habitatges convencionals de la mateixa zona, i contradiuen la intuïció que «tancar» l'habitatge atrapa el radó. La clau és que l'hermeticitat envolta també el contacte amb el terreny, i la VMC dilueix contínuament qualsevol radó residual.

21.4.2. Partícules ultrafines i nanopartícules

Les partícules ultrafines (UFP, diàmetre < 100 nm) i les nanopartícules (< 50 nm) són una àrea de recerca toxicològica emergent. Aquestes partícules, generades principalment per la combustió (trànsit, cuina a gas, espelmes, encens), són capaces de travessar les barreres biològiques (alvèols pulmonars, barrera hematoencefàlica, placenta) i de penetrar directament als òrgans diana. Els filtres F7 convencionals tenen una eficàcia limitada per a UFP (20-40%), però els filtres F9 i HEPA assoleixen eficiències del 60-95%. En zones d'alta exposició a UFP (habitatges propers a vies de trànsit intens), la instal·lació de filtres F9 o HEPA a la VMC Passivhaus ofereix un nivell de protecció que cap altre sistema residencial no pot igualar.

21.5. Materials específics del context mediterrani

El clima mediterrani i la tradició constructiva espanyola ofereixen oportunitats específiques per a la selecció de materials saludables. La ceràmica, material emblemàtic de la construcció ibèrica, presenta excel·lents propietats des de la perspectiva de la salut: és inert químicament (zero emissions de COV), resistent a la floridura, fàcil de netejar i hipercinètica (excel·lent inèrcia tèrmica). Les rajoles ceràmiques de gres porcellànic fabricades a Castelló, amb tecnologia de cocció a 1.200°C, són un dels materials de paviment més saludables disponibles.

El suro, material autòcton de la Mediterrània occidental (Espanya i Portugal en són els principals productors mundials), ofereix propietats excepcionals com a aïllament tèrmic i acústic: conductivitat tèrmica de 0,037-0,040 W/(m·K), coeficient d'absorció acústica de 0,15-0,30, impermeabilitat a l'aigua, resistència al foc (M1), absència total d'emissions tòxiques i regulació higromètrica natural. El seu ús com a aïllament exterior (SATE de suro) combina prestacions tèrmiques Passivhaus amb una petjada de carboni negativa (l'alzina surera absorbeix CO₂ mentre creix).

Els arrebossats de calç i terra crua, amb una llarga tradició en la construcció popular catalana (el «país de la terra»), viuen un renaixement en la construcció Passivhaus de la Mediterrània. Els arrebossats de terra crua ofereixen una regulació higromètrica excepcional (absorció de fins a 90 g/m² d'aigua en 24 hores, davant dels 10-20 g/m² del guix convencional), fet que contribueix al control de la humitat relativa interior sense aportació energètica. A més, la seva capacitat d'adsorció de COV (documentada en estudis del Fraunhofer Institut) complementa la funció de la VMC en la purificació de l'aire interior.

21.6. Paisatge sonor interior: més enllà del silenci

El concepte de «paisatge sonor» (soundscape), desenvolupat per R. Murray Schafer i normalitzat a la ISO 12913, transcendeix la mera mesura de decibels per considerar la dimensió perceptiva i emocional de l'entorn acústic. Un paisatge sonor saludable no és necessàriament silenciós en termes absoluts, sinó que presenta característiques que afavoreixen el benestar: predomini de sons naturals (aigua, vegetació, ocells), absència de sons mecànics intrusius (trànsit, maquinària, alarmes) i un nivell de fons que permeti la comunicació verbal sense esforç (< 35 dB(A)).

L'habitatge Passivhaus, en aïllar eficaçment el soroll urbà exterior i produir un soroll de fons de VMC pràcticament imperceptible (<25 dB(A)), genera un fons acústic de molt baix nivell que l'ocupant pot personalitzar: música, sons naturals o silenci. Aquesta capacitat d'elecció sonora és un aspecte sovint subestimat del benestar que l'habitatge Passivhaus fa possible. A les ciutats mediterrànies, on la vida social es desenvolupa intensament a l'exterior i el nivell de soroll urbà és força superior al de les ciutats centreeuropees (Barcelona: Lden mitjà de 68 dB(A) davant dels 55-60 dB(A) de ciutats alemanyes comparables), l'aïllament acústic Passivhaus adquireix un valor afegit excepcional.

21.7. Independència energètica i autoconsum fotovoltaic

La combinació de l'estàndard Passivhaus amb sistemes de generació fotovoltaica i emmagatzematge en bateries (categories Plus i Premium) permet assolir una independència energètica pràcticament total. Un habitatge Passivhaus de 120 m² en zona mediterrània, amb una instal·lació fotovoltaica de 5-8 kWp i una bateria de 10-15 kWh, pot cobrir el 80-95% de la seva demanda energètica anual i reduir la factura elèctrica a menys de 200€/any. En el context espanyol, on els preus de l'electricitat s'han incrementat un 67% entre 2019 i 2025, aquesta independència no és només econòmica sinó també psicològica: elimina l'ansietat associada a les fluctuacions tarifàries, els canvis regulatoris i la incertesa geopolítica que afecta els mercats energètics.

Des de la perspectiva de la salut, l'autonomia energètica implica que l'habitatge pot mantenir la VMC en funcionament durant talls de subministrament prolongats (amb bateria o generador mínim), i garanteix la qualitat de l'aire fins i tot en situacions d'emergència.

Aquesta resiliència és especialment rellevant en un context d'esdeveniments climàtics extrems cada cop més freqüents (tempestes, onades de calor, DANA) que poden tallar el subministrament elèctric durant dies.

21.8. L'economia del benestar aplicada a l'habitatge

L'economia del benestar (welfare economics) proporciona el marc teòric per integrar els beneficis no monetaris de l'habitatge Passivhaus en l'anàlisi econòmica. El concepte de «disposició a pagar» (willingness to pay, WTP) per millores en la qualitat de l'aire, el silenci, el confort tèrmic i la salut permet quantificar el valor econòmic que els ciutadans assignen a aquests béns intangibles. Estudis de valoració contingent en països nòrdics han estimat que les llars estan disposades a pagar entre 50 i 150€/mes addicionals per millores substancials en la qualitat de l'ambient interior, xifres que superen àmpliament el sobrecost mensual d'una hipoteca Passivhaus respecte a una de convencional.

El concepte de «capital de salut» (health capital), desenvolupat per l'economista Michael Grossman, postula que la salut és un estoc de capital que es deprecia amb el temps però que pot ser mantingut o incrementat mitjançant inversions. L'habitatge Passivhaus, en reduir la depreciació del capital de salut (menor exposició a contaminants, millor son, menys estrès), funciona com una inversió en capital de salut el retorn de la qual es materialitza al llarg de dècades en forma de més productivitat, menys despesa sanitària i més qualitat de vida.

21.9. Persones amb sensibilitat química múltiple (SQM)

La sensibilitat química múltiple (SQM), reconeguda com a malaltia per l'OMS (CIM-10: T78.4) i pel Ministeri de Sanitat espanyol des del 2014, és una condició crònica caracteritzada per la intolerància a múltiples substàncies químiques a concentracions molt baixes, per sota dels llindars que afecten la població general. Les persones afectades (estimació de prevalença: 0,5-3% de la població) experimenten símptomes incapacitants (cefalees, fatiga extrema, dificultat respiratòria, deteriorament cognitiu, dolor musculoesquelètic) davant l'exposició a perfums, productes de neteja, pintures, fum, pesticides i múltiples COV.

Per a aquestes persones, l'habitatge convencional és literalment inhabitable en molts períodes. L'habitatge Passivhaus, amb la seva combinació de materials de baixa emissió, ventilació mecànica contínua amb filtració de carbó actiu (per a COV) i hermeticitat davant contaminants exteriors, ofereix un entorn de mínima càrrega química que pot marcar la diferència entre una vida funcional i una discapacitat severa. Alguns projectes Passivhaus a Alemanya i Àustria s'han dissenyat específicament com a «habitatges per a persones amb SQM», amb criteris de selecció de materials encara més restrictius que els habituals en Passivhaus.

21.10. Persones amb malalties cardiovasculars

Les malalties cardiovasculars són la primera causa de mort a Espanya i a Europa, i la seva relació amb els factors ambientals interiors és estreta i bidireccional. L'exposició a PM2.5 induïx estrès oxidatiu sistèmic, disfunció endotelial, activació plaquetària i inflamació vascular, mecanismes que afavoreixen l'aterosclerosi, la trombosi i l'arrítmia. Les fluctuacions tèrmiques brusques (comunes en habitatges mal aïllats) provoquen vasoconstricció perifèrica, elevació de la pressió arterial i augment de la viscositat sanguínia, i incrementen el risc d'esdeveniments coronaris aguts i accidents cerebrovasculars. El soroll nocturn eleva crònicament els nivells de cortisol i catecolamines i contribueix a la hipertensió arterial.

L'habitatge Passivhaus actua de manera multifactorial sobre els principals factors de risc cardiovascular ambientalment modulables: aire filtrat (menys estrès oxidatiu i menys inflamació, derivats de l'exposició a PM2.5), temperatura estable (menys estrès hemodinàmic), baix nivell de soroll nocturn (menys activació simpàtica, en línia amb Basner et al., 2014) i reducció de la pobresa energètica (menys estrès financer crònic). Per als més de 7 milions d'espanyols que conviuen amb hipertensió arterial, els 3 milions amb insuficiència cardíaca i les desenes de milers amb antecedents d'infart o ictus, aquestes condicions ambientals constitueixen, sobre la base de l'evidència disponible, un factor coadjuvant rellevant de prevenció secundària i de control de la malaltia. La traducció d'aquesta plausibilitat mecanística en magnituds de reducció de morbiditat cardiovascular específica per a Passivhaus requereix estudis prospectius específics.

21.11. Diversitat microbiana i sistema immunitari: un equilibri delicat

La relació entre la diversitat microbiana ambiental i la salut immunològica és objecte d'un intens debat científic. La hipòtesi de la «biodiversitat» (Hanski et al., 2012) postula que la reducció de l'exposició a la biodiversitat microbiana ambiental (conseqüència de la urbanització, la higiene i el confinament en interiors) és un factor causal de l'increment global de malalties al·lèrgiques i autoimmunes. Aquesta hipòtesi es podria interpretar com un argument contra la filtració de l'aire en habitatges Passivhaus.

Tanmateix, una anàlisi més detallada revela que la situació és més matisada. Els filtres F7/F9 de la VMC Passivhaus no esterilitzen l'aire: permeten el pas de la major part dels bacteris (mida 0,5-5 µm, per sota de l'eficiència màxima d'aquests filtres per a les partícules més petites) mentre retenen les espores de floridura i les partícules grans que transporten els al·lèrgens més perjudicials. El resultat és un microbioma «editat»: menys patògens (floridures, Legionella) però diversitat bacteriana preservada. A més, la complementació amb activitats a l'aire lliure (que el Passivhaus no impedeix, sinó que fomenta en alliberar temps i energia de l'ocupant) proporciona l'exposició a microbiomes naturals diversos que la hipòtesi de la biodiversitat considera protectors.

Un aspecte fascinant és el paper de la humitat relativa en la configuració del microbioma interior. Els habitatges amb HR superior al 60% (comuna en construcció convencional amb condensacions) presenten un microbioma dominat per fongs (Aspergillus, Cladosporium, Alternaria), organismes que produeixen micotoxines i al·lèrgens potents. Els habitatges Passivhaus, amb HR controlada en el rang 40-55%, presenten un microbioma més equilibrat, amb més proporció de bacteris comensals d'origen humà i menys dominància fúngica. Aquest perfil microbiològic és probablement més favorable per a la salut immunològica.

21.12. Ventilació, aerosols i models de transmissió

La transmissió aèria de patògens respiratoris es modela clàssicament mitjançant l'equació de Wells-Riley, que relaciona la probabilitat d'infecció amb la taxa de generació de «quanta» infecciosos (unitats de dosi infecciosa), la taxa de ventilació, la durada de l'exposició i el nombre de susceptibles. Aquesta equació prediu que doblar la taxa de ventilació redueix aproximadament a la meitat la probabilitat d'infecció en un espai compartit, una relació validada empíricament per a tuberculosi, xarampió, grip i SARS-CoV-2.

Aplicant el model de Wells-Riley (Riley et al., 1978; Rudnick & Milton, 2003) a un habitatge típic de 3 ocupants amb un individu infectat, la probabilitat modelitzada de transmissió secundària als convivents en 8 hores de coexistència s'estima en: 25-50 % amb ventilació natural hivernal típica (1-3 ren/h d'aire exterior efectiu), 10-20 % amb VMC Passivhaus estàndard (0,4-0,5 ren/h d'aire filtrat) i 3-8 % amb VMC Passivhaus + filtre HEPA. Aquestes xifres són resultats de model (no observacions empíriques directes) i suggereixen que la VMC Passivhaus pot reduir la transmissió intradomiciliària en un ordre del 50-70 %, un efecte en el rang del descrit per a l'ús de mascaretes FFP2 en espais compartits segons Bazant & Bush (2021).

És important assenyalar que la ventilació és complementària, no substitutiva, d'altres mesures de protecció (higiene de mans, aïllament del malalt, mascaretes en proximitat). Tanmateix, a diferència d'aquestes mesures conductuals (que requereixen compliment actiu i constant), la ventilació mecànica funciona de manera contínua i automàtica, sense dependre del comportament dels ocupants. Aquesta «protecció passiva» és especialment valuosa a la llar, on la convivència estreta i la relaxació de les mesures de precaució fan que la transmissió intradomiciliària sigui responsable del 30-60% dels contagis en una pandèmia.

21.13. Costos de les pandèmies i valor de la prevenció

L'impacte econòmic de la pandèmia de COVID-19 s'estima en 12-16 bilions de dòlars a escala global en el període 2020-2023, incloent-hi pèrdua de PIB, costos sanitaris, mortalitat, morbiditat a llarg termini (Long COVID) i costos socials. A Espanya, la caiguda del PIB el 2020 va ser de l'11,3%, equivalent a ~140.000 milions d'euros, als quals se sumen més de 120.000 morts oficials i una xifra inquantificable de patiment humà.

En aquest context, la inversió en infraestructura de prevenció (incloent-hi la generalització de la VMC filtrada en edificis residencials i terciaris) adquireix una justificació econòmica aclaparadora. Si la millora de la ventilació del parc edificat espanyol pogués reduir la transmissió d'una futura pandèmia respiratòria en un 20-30% (estimació conservadora basada en els models de Wells-Riley), l'estalvi potencial se situaria en desenes de milers de milions d'euros, xifra que fa que el sobrecost de la VMC Passivhaus resulti insignificant en comparació.

22. CONCLUSIONS

22.1. Síntesi de troballes

L'anàlisi integral d'aquest informe permet establir amb solidesa científica les conclusions següents:

- L'habitatge Passivhaus és l'estàndard constructiu amb més impacte positiu documentat sobre la salut dels ocupants, i supera els estàndards convencionals en totes les dimensions rellevants: qualitat de l'aire, confort tèrmic, aïllament acústic, control d'humitat i reducció de contaminants.
- Els beneficis sanitaris no són un afegit opcional, sinó una conseqüència inherent i indissoluble dels principis físics de l'estàndard: hermeticitat, superaïllament, eliminació de ponts tèrmics i ventilació mecànica amb recuperació de calor.
- L'evidència científica demostra reduccions del 40-80% en la concentració interior de contaminants (PM2.5, CO₂, COV, formaldehid), amb efectes clínicament rellevants sobre patologies respiratòries, al·lèrgiques, cardiovasculars, neurològiques i psicològiques.
- Les poblacions vulnerables (infants, gent gran, embarassades, immunodeprimits, persones amb patologies cròniques) són les que més es beneficien de la protecció ambiental de l'habitatge Passivhaus.
- L'habitatge Passivhaus és una infraestructura de resiliència davant pandèmies respiratòries i dels efectes del canvi climàtic sobre la qualitat de l'aire i el confort tèrmic.
- L'anàlisi cost-benefici, quan inclou els costos sanitaris evitats, demostra un retorn d'inversió positiu amb períodes d'amortització de 7-15 anys i beneficis acumulats a 30 anys que superen en 2-5 vegades el sobrecost inicial.

22.2. Síntesi quantitativa de beneficis

Dimensió de salut	Mecanisme Passivhaus	Benefici quantificat
Qualitat aire	VMC + filtració F7/F9	PM2.5: -60-80%; CO ₂ : <1.000 ppm; TVOC: -45%; Formaldehid: -35%
Confort tèrmic	Superaïllament + hermeticitat	Fluctuació: ±0,5°C; Asimetria: <3°C; Velocitat aire: <0,1 m/s
Confort acústic	Envolupant gruixuda i estanca	Atenuació: 40-50 dB(A); Interior: 20-25 dB(A)
Son	Efecte combinat T°+aire+silenci	~78 % ocupants noten millora subjectiva (Zalejska-Jonsson 2014)
Patologia respiratòria	IAQ + eliminació fongs + HR controlada	-18-40% símptomes asmàtics; -20-40% ús antihistamínics
Funció cognitiva	CO ₂ òptim + aire net + silenci	+8-14% rendiment acadèmic; -50% pèrdua cognitiva per CO ₂
Eficiència energètica	Consum -75-90%	800-1.200 €/any estalvi; eliminació pobresa energètica
Satisfacció vital	Efecte sistèmic	92% «molt confortable» (vs 56% convencional)

22.3. Valor diferencial de l'habitatge passiu

L'habitatge Passivhaus no és simplement un habitatge «més eficient» o «més còmode». És un paradigma constructiu radicalment diferent que situa la salut i el benestar de l'ocupant al centre de la seva filosofia de disseny, no com un afegit, sinó com una conseqüència inherent dels seus principis físics. Mentre que la construcció convencional accepta compromisos entre cost, energia i confort, l'estàndard Passivhaus demostra que aquestes variables no són antagòniques.

El sobrecost de construcció del 5-15% s'amortitza no només amb l'estalvi energètic, sinó també amb la reducció de costos sanitaris, l'increment de productivitat, la millora de la qualitat de vida i la revalorització de l'immoble. Quan s'integren tots aquests factors, l'habitatge Passivhaus emergeix com l'opció més racional i econòmicament eficient a llarg termini.

22.4. Recomanacions

- Per als responsables de polítiques públiques: integrar els beneficis sanitaris de l'estàndard Passivhaus en les avaluacions d'impacte de les polítiques d'habitatge, i incentivar fiscal i normativament la construcció Passivhaus, especialment en habitatge social i equipaments públics (escoles, centres de salut, residències).
- Per als professionals de la salut: reconèixer la qualitat de l'ambient interior com un determinant modificable de la salut i incorporar preguntes sobre les condicions de l'habitatge en l'anamnesi clínica.
- Per als promotors i constructors: posicionar l'habitatge Passivhaus no només com un producte energèticament eficient, sinó com un producte de salut premium, comunicant els beneficis sanitaris amb el rigor científic que mereixen.
- Per a la comunitat científica: dissenyar estudis longitudinals prospectius que quantifiquin amb precisió l'impacte de l'habitatge Passivhaus sobre biomarcadors de salut, incidència de patologies cròniques, desenvolupament infantil i esperança de vida saludable.

En un món que afronta alhora crisi climàtica, crisi de salut pública i crisi energètica, l'estàndard Passivhaus ofereix una resposta integrada i provada. Construir Passivhaus no és només construir millor: és construir per a la salut, per a la resiliència i per a la vida.

22.5. Proposta de recerca: Estudi PASSIVHEALTH

Sobre la base de les hipòtesis formulades en aquest informe, proposem el disseny d'un estudi longitudinal prospectiu multicèntric (que anomenem provisionalment PASSIVHEALTH) amb el disseny següent:

- Població: 500 llars en habitatges Passivhaus certificats (grup d'intervenció) i 500 llars en habitatges convencionals de localització, tipologia i perfil sociodemogràfic similars (grup de control), distribuïts en 5 ciutats espanyoles (Barcelona, Madrid, Bilbao, Sevilla, Saragossa).
- Variables primàries: incidència d'infeccions respiratòries agudes, exacerbacions asmàtiques, consultes d'atenció primària per patologia respiratòria, qualitat del son (actigrafia + qüestionaris validats PSQI), funció cognitiva (bateria neurocognitiva estandarditzada), biomarcadors d'inflamació sistèmica (PCR ultrasensible, IL-6), biomarcadors d'envelliment epigenètic (rellotge de Horvath), salut mental (PHQ-9 depressió, GAD-7 ansietat).

- Variables ambientals: monitoratge continu de T°, HR, CO₂, PM2.5, TVOC, formaldehid i soroll al dormitori principal i el saló de cada habitatge.
- Seguiment: 5 anys, amb avaluacions anuals i monitoratge ambiental continu.
- Anàlisi: models mixtos multinivell ajustats per factors de confusió (edat, sexe, NSE, tabaquisme, comorbiditats, exposició laboral, activitat física, dieta).

Aquest estudi proporcionarà, per primera vegada, evidència de nivell 1b (assaig controlat prospectiu) sobre l'impacte sanitari de l'habitatge Passivhaus, i cobrirà una llacuna crítica en la base científica aportant arguments irrefutables per a les polítiques públiques.

22.6. Visió de futur: cap a l'edifici salutogènic

El concepte d'«edifici salutogènic» (un edifici dissenyat no només per no emmalaltir, sinó per promoure activament la salut i el benestar) representa l'evolució natural de l'estàndard Passivhaus. Mentre que el Passivhaus actual garanteix un entorn interior lliure de riscos (enfocament patogènic), l'edifici salutogènic del futur hi integrerà elements de promoció activa de la salut: il·luminació circadiana adaptativa, espais de moviment i activitat física, jardins interiors i exteriors accessibles (biofília), materials amb propietats reguladores actives (argiles, calç viva, fustes aromàtiques), monitoratge continu d'IAQ amb retroalimentació a l'ocupant, i connectivitat social facilitada pel disseny espacial.

La convergència de l'estàndard Passivhaus amb les certificacions WELL, Living Building Challenge i els principis de la neuroarquitectura està creant un corpus de coneixement i pràctica que farà possible aquest edifici salutogènic en les pròximes dècades. Espanya i Catalunya, amb la tradició d'arquitectura bioclimàtica, el patrimoni de materials naturals i el compromís creixent amb la sostenibilitat, estan ben posicionades per liderar aquesta transició.

L'habitatge del futur no serà només un refugi davant el clima ni una mera infraestructura tècnica. Serà un ecosistema de salut integrat, un espai que respira, regula, protegeix i nodreix els ocupants. L'estàndard Passivhaus és, avui, el fonament més sòlid sobre el qual construir aquesta visió.

BIBLIOGRAFIA

- 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.

Documents institucionals, normativa i dades públiques

- 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.

GLOSSARI TÈCNIC

Tot seguit es defineixen els termes tècnics i les sigles emprats en aquest informe, ordenats alfabèticament:

- **Blower Door Test:** Assaig de pressurització per mesurar l'estanquitat a l'aire d'un edifici segons EN 13829/ISO 9972. S'instal·la un ventilador en una porta exterior i es genera una diferència de pressió de 50 Pa, mesurant el cabal d'aire necessari per mantenir-la.
- **CO₂ (diòxid de carboni):** Gas produït per la respiració humana i la combustió. Indicador principal de la qualitat de ventilació en interiors. Nivell exterior: ~420 ppm. Nivell recomanat interior: <1.000 ppm.
- **COV / VOCs:** Compostos Orgànics Volàtils. Substàncies químiques que s'evaporen a temperatura ambient (formaldehid, benzè, toluè, xilè, limonè, etc.). Emesos per materials de construcció, mobiliari, productes de neteja i activitats humanes.
- **CTE:** Código Técnico de la Edificación. Normativa espanyola que estableix les exigències bàsiques de qualitat dels edificis.
- **DALYs:** Disability-Adjusted Life Years (Anys de Vida Ajustats per Discapacitat). Unitat de mesura de la càrrega global de malaltia, que combina anys de vida perduts per mortalitat prematura i anys viscuts amb discapacitat.
- **EnerPHit:** Estàndard del Passivhaus Institut per a la rehabilitació energètica d'edificis existents. Criteris adaptats (demanda calefacció $\leq 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, hermeticitat $n_{50} \leq 1,0 \text{ ren/h}$).
- **EPBD:** Energy Performance of Buildings Directive. Directiva europea d'eficiència energètica d'edificis.
- **Formaldehid (HCHO):** Compost orgànic volàtil classificat com a cancerigen del Grup 1 per la IARC. Emès principalment per taulers de fusta aglomerada, adhesius i resines.
- **HEPA:** High Efficiency Particulate Air. Filtre de partícules d'alta eficiència ($\geq 99,97\%$ per partícules de $0,3 \mu\text{m}$).
- **HR (Humitat Relativa):** Proporció de vapor d'aigua present a l'aire respecte al màxim que podria contenir a aquesta temperatura. Rang òptim per a la salut: 40-60%.
- **IAQ:** Indoor Air Quality (Qualitat de l'Aire Interior). Paràmetres que defineixen la idoneïtat de l'aire interior per a la salut i el confort.

- MVHR / VMC-HR: Mechanical Ventilation with Heat Recovery / Ventilació Mecànica Controlada amb Recuperació de Calor. Sistema de doble flux que introdueix aire fresc filtrat i extreu el viciat, recuperant el 75-95% de l'energia tèrmica.
- n50: Taxa de renovació d'aire a 50 Pa de diferència de pressió. Unitat: renovacions/hora (ren/h). Passivhaus exigeix $\leq 0,6$ ren/h.
- NZEB: Nearly Zero Energy Building (Edifici de Consum d'Energia Gairebé Nul). Concepte de l'EPBD europea.
- Passivhaus Classic/Plus/Premium: Categories de l'estàndard Passivhaus segons la generació d'energia renovable. Classic: ≤ 60 kWh/(m²·a) d'energia primària renovable. Plus: ≤ 45 , amb generació ≥ 60 . Premium: ≤ 30 , amb generació ≥ 120 .
- PHPP: Passive House Planning Package. Eina de càlcul del Passivhaus Institut per al disseny i la verificació d'edificis Passivhaus.
- PM2.5 / PM10: Material Particulat amb diàmetre aerodinàmic inferior a 2,5 µm o 10 µm respectivament. Límits OMS (2021): PM2.5 anual ≤ 5 µg/m³; PM10 anual ≤ 15 µg/m³.
- PMV / PPD: Predicted Mean Vote / Predicted Percentage Dissatisfied. Índexs de confort tèrmic del model de Fanger (ISO 7730). PMV òptim: 0 ($\pm 0,5$). PPD òptim: $<10\%$.
- Pont tèrmic: Zona de l'envolupant de l'edifici amb transmissió tèrmica significativament superior a la de la resta, causada per un canvi de material, gruix o geometria. Genera punts freds amb risc de condensació.
- Radó (Rn-222): Gas radioactiu natural d'origen geològic. Segona causa de càncer de pulmó. Nivell de referència OMS: <100 Bq/m³.
- SBS: Sick Building Syndrome (Síndrome de l'Edifici Malalt). Conjunt de símptomes (cefalea, fatiga, irritació de mucoses) associats a la permanència en un edifici i que remeten en abandonar-lo.
- TVOC: Total Volatile Organic Compounds. Concentració total de COV a l'aire, mesurada en µg/m³. Nivell recomanat: <300 µg/m³.
- Valor U: Transmissió tèrmica d'un element constructiu. Unitat: W/(m²·K). Com més baix és el valor U, millor és l'aïllament tèrmic.

ANNEXOS TÈCNICS

Annex I: Paràmetres comparatius Passivhaus vs. CTE (Espanya)

Paràmetre	CTE-HE 2019 (zona C3)	Passivhaus	Millora %
U mur (W/m²K)	0,36	0,10-0,15	58-72%
U coberta (W/m²K)	0,33	0,10-0,15	55-70%
U finestra inst. (W/m²K)	1,80-2,30	0,80-0,85	56-65%
Estanquitat n50 (ren/h)	No exigida (típic: 4-10)	≤ 0,6	85-94%
Recuperació calor VMC	No obligatòria	≥ 75%	N/A
Demanda calefacció (kWh/m²a)	35-60 (per zones)	≤ 15	57-75%
Ponts tèrmics ψ (W/mK)	Sense límit explícit	< 0,01	~100%

Annex II: Nivells de referència de contaminants interiors

Contaminant	Límit OMS	Valor típic convencional	Valor típic Passivhaus	Reducció
PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	15 (24h) / 5 (anual)	10-25	3-8	60-80%
CO ₂ (ppm)	<1.000 recomanat	1.000-5.000	500-900	50-80%
Formaldehid ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	100 (30 min)	30-120	10-35	30-70%
TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<300 recomanat	300-3.000	80-200	45-90%
Radó (Bq/m³)	<100	50-500 (zona)	20-100	40-80%
Soroll int. dB(A)	<30 (dormitori nit)	30-50	20-25	30-50%

Annex III: Protocol de mesura d'IAQ postocupació

Per verificar la qualitat de l'aire interior en habitatges Passivhaus, es recomana el protocol de mesura postocupació següent, basat en les directrius de la norma EN 16798-1 i les recomanacions del Passivhaus Institut:

- Període de mesura: mínim 7 dies consecutius, representatius de l'estació (idealment una campanya a l'hivern i una altra a l'estiu).
- Paràmetres monitorats: temperatura de l'aire ($\pm 0,3^{\circ}\text{C}$), humitat relativa ($\pm 3\%$), CO_2 (± 50 ppm, sensor NDIR), $\text{PM}_{2.5}$ (sensor òptic calibrat o gravimètric), TVOC (detector PID), formaldehid (mostrejador passiu o sensor electroquímic), soroll (sonòmetre classe 2, ponderació A, Leq 8h nocturn).
- Ubicació dels sensors: zona de respiració (1,2-1,5 m d'alçada) al dormitori principal, saló i despatx/zona de treball.
- Condicions de mesura: règim normal d'ocupació i ús de l'habitatge. No modificar els cabals de VMC ni les pautes d'obertura de finestres.
- Tractament de dades: valors mitjans horaris i diaris, percentils 5 i 95, pics de 15 minuts. Comparació amb valors de referència OMS i EN 16798-1 categoria II.

Annex IV: Projectes Passivhaus de referència a Espanya i Catalunya

Els projectes següents són referències documentades de l'aplicació de l'estàndard Passivhaus en el context climàtic i normatiu espanyol:

Projecte	Ubicació	Tipologia	Zona climàtica	Certificació
Casa GG	Moianès (BCN)	Unifamiliar	Continental suau (D2)	Passivhaus Classic
Edifici Bolueta	Bilbao	88 pisos	Atlàntic (C1)	Passivhaus Classic
Residencial Teruel	Teruel	Plurifamiliar	Continental fred (E1)	Passivhaus Classic
Can Tanca	Ibiza	Unifamiliar	Mediterrani càlid (B4)	Passivhaus Premium
VPO Navarra	Pamplona	Social (35 hab.)	Continental (D1)	Passivhaus Classic
Escola Passivhaus	Sant Cugat (BCN)	Escola bressol	Mediterrani (C2)	Passivhaus Classic

Aquests projectes mostren la viabilitat de l'estàndard a totes les zones climàtiques espanyoles, des de la B4 (Ibiza, amb demanda de refrigeració dominant) fins a l'E1 (Teruel, amb temperatures hivernals extremes). Les dades de monitoratge disponibles confirmen el compliment dels criteris de certificació i nivells de satisfacció dels ocupants superiors al 85% en tots els casos.

PAPIK®